

超音波式波高計の開発について

高橋 智晴*・鈴木 禎実*・佐々木 弘**

1. ま え が き

港湾あるいは海岸に関する技術的諸問題を扱う場合、現地波浪の実測資料の重要性はいうまでもない。基本的な波浪特性等の研究、構造物の計画・設計、災害原因の究明、施工計画・管理等にあたって常に信頼性の高い波浪諸元の適確な表示が求められ、近時波浪の不規則性の認識とともにその必要性は著しく高まっている。

しかしながら現状における実測資料の質は、その解析能力あるいは活用内容にくらべて必ずしも満足すべきものではなく、目的とする波浪諸元の表示はほとんどの場合において表面波形によってなされているにもかかわらず大部分の現地波浪観測は圧力波形の測定によって行なわれ、一方測定機器の性能についても個々の特性に差異がありながら、被測定現象に対応した測定値の相関についてはあまり吟味されぬまま、それぞれの測定値は爾後の解析・活用にほとんど無条件で使用されている。このような事実は基本的な研究を行なう場合にのみ提起される問題ではなく、すべての目的の波浪観測成果の活用に対して共通した問題として考えられなければならない。

このような観点から、表面波形の測定を目的とした汎用性の高い波高計の実現を意図して超音波を応用した波高計の開発研究を促進し、一応満足すべき性能を有するものを実用化し得たので、機器の概要を取得データの一例とともに報告する。

2. 超音波式波高計の開発

(1) 開発経過

超音波式波高計とは、媒質中における超音波の伝播特性と、異種の媒質が形成する境界層における反射特性を利用したもので、ある点に固定設置された一対の超音波送受波器より海水面までの距離を、短時間間隔で繰り返し発・受信する超音波パルスの伝播速度から継続的に測定し、ある点（微小海面域内）における水位の時間的変化すなわち海面の進行波形を求める装置である。

超音波を応用した波高計の方式としては、

- ① 被測定海面に対して空中より超音波を発射し、海面からの反射波を空中で受信する方法(空中発射型)

- ② 水中より海面に向かって超音波を発射し、その反射波を海中で受信する方法(水中発射型)

に大別される。いずれの方式も現地および実験室において在来の超音波機器を直接的に利用して試みられた例はあるが、波高計として考慮した具備すべき諸条件と実体に即した対応策についての究明はなされておらず、本機の開発研究にあたっては特に現地使用条件下における超音波伝播特性と海面での反射特性および受信信号特性についての実態の把握を、水槽における種々の特性実験、機器装置の試作・改良と常に平行して重点的に実施した。この間、超音波の模擬境界層における反射特性、伝播経路の水質・障害物による雑音信号の介入、減衰特性等の実験に際しては、平面水槽を使用した2次元的手法も試みた。本機の開発研究経過は下記のとおりである。

昭和 37 年度：予備実験（東京電力技術研究所、沖電気工業KKと共同研究）および研究計画の策定

38 ～ 39 年度：基礎的な実験、観測（東電技研と共同研究、海上電機KKの協力）

第1号機（除記録部）の試作（科学技術庁特別研究促進調整費による）

40 ～ 41 年度：アナログ記録装置の試作および現地観測の実施（鹿島港の協力）

42 ～ 43 年度：現地観測による追試（防災センター平塚支所の協力、港研アシカ島）・雑音信号除去回路の研究、Tr 化等、機器装置の改良開発（海上電機KKの協力）

(2) 超音波発射方式の検討

上記の基礎的な実験および観測を通じ、超音波式波高計としての水中発射型と空中発射型の性能はつぎのように指摘することができる。

- ① 水路実験の結果から、通常の進行波における場合の測定受信感度は水中発射型の方が全般的に安定しているが、相対的な受信入力レベルの安定度は長周期波に対しては空中発射型、短周期波に対しては水中発射型が良好である。

- ② 波頭にくずれを生じ水中に気泡を巻込む状態になると、水中発射型は顕著な影響を受けペン書き記録の場合には測定が困難となる。一方空中発射型の場合、現地においては碎波や強風によって海面上に生ずる水飛沫や

* 正会員 運輸省 港湾技術研究所

** 運輸省 港湾技術研究所

降雨・雪によって類似の現象が起こる。

③ 水中発射型の場合には超音波伝播経路上の水質条件、浮遊物・魚等の介在により、屈折、不正反射等を生じて誤測・欠測を招く場合がある。このような現象は空中伝播経路上にも同様に考え得るが影響の度合いは少ないと思われる。

④ 空中発射型の場合には送受波器面に水滴が付着し、水中発射型の場合には貝や海藻等が付着することにより感度が低減するが、その減衰効果は比較的少ない。

⑤ 超音波伝播経路に近接した構造物等の影響により、サイドローブによる反射波を受信し、あるいは超音波の伝播媒質が乱され上記②、③に準じた現象を惹起する可能性は、いずれの方式においてもほぼ同様である。

⑥ 海面での基本的な反射率は海中発射の場合の方が理論的にやや有利であるが、実効的には無視し得る。

⑦ 気体中における超音波の吸収は、水中における場合の10倍程度以上で伝播中の減衰がきわめて大きいため、波高の測定レンジが数メートル以上におよぶ現地用波高計の場合に、1個(対)の送受波器により安定した反射信号を得ることは空中発射型では困難である。

以上の検討結果と設置条件の一般に有利なことから超音波式波高計の超音波発射方式は水中発射型とした。

また、超音波の発振周波数および指向角は波高計としての特性を決定するうえに①受信確度の向上、②雑音信号介入の回避、③測定精度の確保、等と密接な相互関係があり波高計の実用効果を大きく左右する。しかしながらこれらの仕様を理論的、室内実験的に決定しても実効的にはほとんど無意味であるため、約2年間の現地観測による観察結果と波高計として汎用性を有する構造、材質、取扱い、製作上の問題を検討し、通常現地用波高計の場合には発振周波数200kHz、半減半角3°と決定した。この観察実験は、周波数50kHz~1MHz、半減半角1°~6°の5組の送受波器の組合せによって逐次行ない、同時に雑音信号除去回路の効果もあわせて検討した。

注：超音波式波高計現地用の場合には水中発射方式を採用したが、室内実験用の波高計の場合には空中発射方式の方が利点が多いと思われる。

3. 超音波式波高計(水中発射型)

(1) 測定原理

図-1に示すように海中(海底または適当な水深位置)に超音波送受波器を鉛直上方に向けて固定し、鋭いビームの超音波パルスを発射して大気との境界層を形成する海面からの反射波を受信しその間に要する経過時間を測定すれば、送受波から海面までの距離(l)は伝播所要時間(t)と超音波の海中伝播速度(C)との関係から式(1)

によって求めることができる。

$$l = \frac{1}{2} \cdot C \cdot t \dots \dots \dots (1)$$

海水中の超音波の伝播速度は、水温、塩分濃度、水圧等によって変化し詳細な研究もなされているが、実用公式の一例として式(2)で表わされる。

$$C = 1410 + 4.21T - 0.037T^2 \\ + 1.14S + 0.0168h \\ \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 C ：音波の水中伝播速度(m/sec)、 T ：水温(°C)、 S ：塩分濃度(‰)、 h ：水深(m)

このような測定操作をごく短時間間隔で継続的にくり返すことにより、送受波器鉛直上方海面における水位の時間的变化を知ることができ、この水位変化を連続的な電圧出力に変換して記録装置に導入すれば、その海面を通過する表面波形記録を得ることができる。

(2) 機器の回路構成および動作

この波高計の測定電気回路は、当初電子管を使用し、測定はケーブル伝送による遠隔自記録方式により開発した(USW-I型)¹⁾。爾後雑音信号除去回路の付加、機器装置の改良、回路のソリッドステート化を進めて、ケーブル伝送方式(USW-III型)および簡易無線テレメータ方式(USW-V型)による標準品を完成した。

a) USW-III型

本装置一式の外観を写真-1に、測定回路のブロックダイアグラムを図-2に示す。

写真-1において、①は超音波発振、受信信号変換出力回路等を収納する円筒型水密筐体とその上部に装置された超音波送受波用振動子からなる送受波部で、②に示す陸上観測所内の演算増幅部と4芯ケーブルにより接続される。演算増幅部②は時間基準発生、雑音信号除去、測定値検出、D-A変換等の回路が組込まれ、③に示す制御の記録部と接続される。制御・記録部③は観測時刻および時間を自動的に設定するための時限装置、

写真-1 U.S.W.-III型

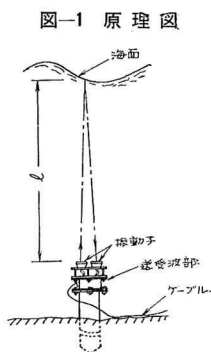
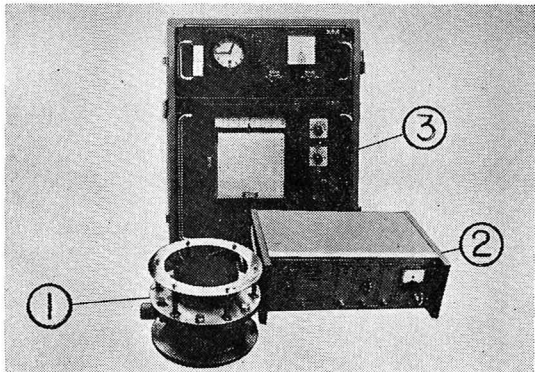
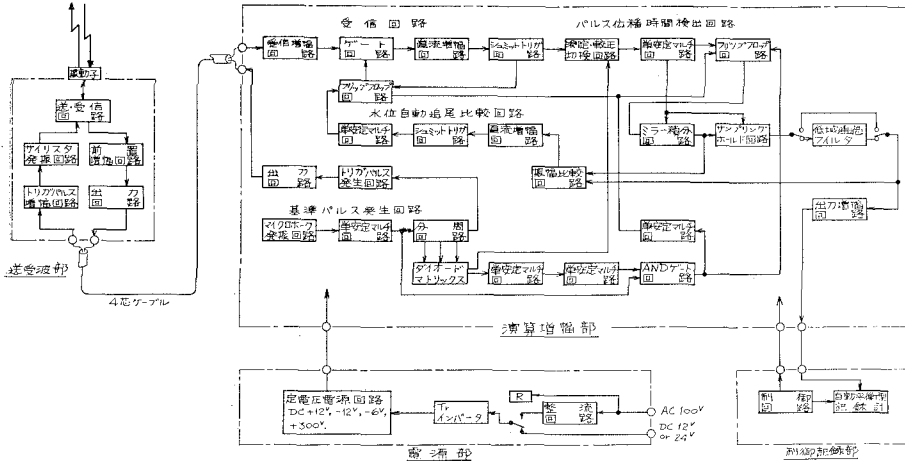


図-2 U.S.W.-III 型ブロック ダイアグラム



他の一つは、水位自動追尾比較方式によるゲート回路で、くり返し発射・受信されるパルスの伝播時間すなわち測定出力電圧を、前のパルスによるホールド電圧と逐時比較してその電位差を求め、この電位差があらかじめ設定された基準電位差内にある場合の電圧信号のみを有効な測定電圧として出力

電源装置、自動平衡型記録計、デジタル記録装置用出力回路等によって構成されている。

本機の基本的動作は制御部からの指令によって規制され、測定回路の精密動作は演算増幅器内で発生する超音波発射制御用の電気信号によって行なわれる。この信号はケーブルを通じて海中測定点に設置された送受波部に送られて発振ゲート回路を一定時間間隔で動作させ、振動子より海面に向けて超音波パルスを発射する。超音波パルスは海面における大気との境界層で反射し、その一部は海底へ向かってもしり振動子をたたいて受波信号となる。受波されたパルス信号は伝送用受信信号に変換され、ケーブルを通して演算増幅部に送られる。演算増幅部では超音波発射信号を発信してから受波信号が到達するまでの時間を電氣的に計測し、その測定時間に比例した直流電圧を作り出して出力とする。この出力電圧はつぎの受信信号を受けて新たな出力電圧が作られるまで保持される。このような出力電圧を約 1/10 秒間隔で継続的に発生してアナログ記録機に導けば、連続的と見做しうる送受器上方の水位変化すなわち進行波形が描かれる。また必要に応じ、アナログ記録計入力と並列的な出力電圧または記録計サーボモータと同軸に接続されたポテンショメータから抵抗変化として、外装デジタル記録計等への出力を取り出すことができる。

以上の基本的回路のほか波高計としての機能上の必要回路として、不正受信信号を除去し適切なアナログ出力を得るため 2 種類のノイズ ゲート回路を具備している。

その一つは、ある限定された水深域内（振動子面と最低水位面の間）からの反射波を除去して不正受波信号による誤動作を防ぎ、同時に出力電圧を精度よく最大限に利用するためのもので、この回路は超音波パルスの伝播時間に応じた直流電圧を発生する際に立上りの時点を上記の限定された水深域内の超音波伝播時間に相当する一定時間間隔だけ遅延させるゲート回路である。

力回路に送り出す方式である。この比較回路における基準電位差は、被測定波形の波高、波長、波速と超音波パルスの発信くり返し周波数、パルス幅の関係によって設定される。この基準電位差は、現象的にはパルスのくり返し発射時間間隔内における最大水位偏差に相当するもので、理論的に決定することは困難であり、現在は経験的に 70~100 cm 程度に設定して一応良好な結果が得られている。

図-3 において

a は測定範囲（最大潮位偏差 + 最高波高 + 余裕高）、
b は前者のゲート回路による限定水域内の入力信号除去範囲、
c は後者のゲート回路による測定範囲でこの間からの反射信号のみが有効な測定値として検出される。

b) USW-V 型

本機を使用して無線テレメーターにより観測を行なう場合には 2 つの方式がある。その一つは前述の USW-III 型を海上局に設置し、外部出力信号端子を無線送信装置に接続する方法で、伝送方式としては技術的に簡便確実であり、海上局には通常のアナログ記録計が備えられ無線装置の故障時にも観測が可能な利点はあるが、消費電力、装置の形状が比較的大となる。

他の方法は、海上局が繫留ブイ等のようなきわめて小型化されたものに利用することを目的として開発したものである。この USW-V 型のもつ基本的な回路は III 型とほとんど同様であるが、図-4 のブロックダイアグラムに示すごとく構成が異なり、演算増幅部と送受波部の間に超音波発射周期信号のやりとりがないことが特徴である。観測はテレメータ装置海上局内の音叉時計に

図-3 測定範囲図

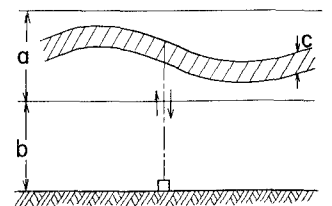
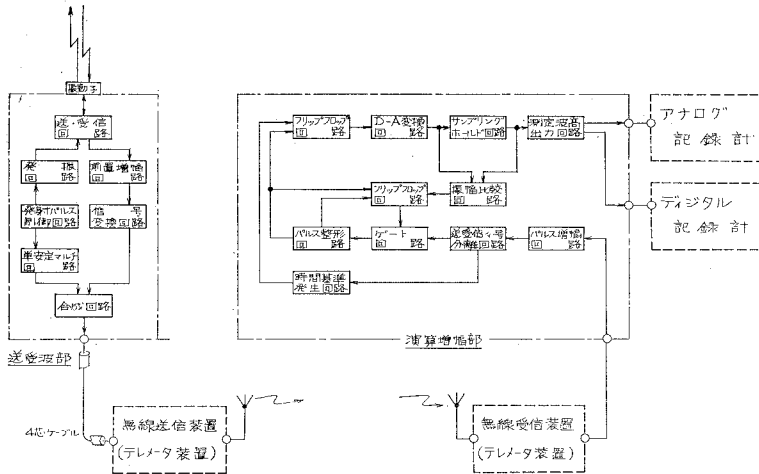


図-4 U.S.W.-V 型ブロック ダイアグラム



よって設定された定時に行なわれ、海上局内超音波パルス発生回路で規制される超音波パルスの発射信号およびすべての受波信号は短形パルスとして瞬時的に合成回路に入り、発・受信信号は異なる振幅をもって無線送信装置に送られる。陸上局で受信された信号はもとの短形パルスに変換されて演算増幅部に入り、超音波発生信号と受波信号に分離され、超音波発生信号をトリガーとして前述のⅢ型の場合と同様の測定回路および雑音除去回路を経て出力信号電圧を発生し、記録装置に導かれる。陸上記録装置は海上局の発信に応じて駆動する。

(3) 特性および性能

a) 標準仕様 (USW-Ⅲ 型)

測定方式：超音波パルス水中伝播時間測定方式

測定レンジ：波高 10 m^{p-p}, 5 m^{p-p}

(標準音速 1500 m/sec)

設置許容水深：7~30 cm

測定時間制御：自動(毎偶数時刻 10 または 20 分間)および手動

指示・記録方式：メータ指示(中央=0)・自動平衡型記録計(有効記録幅 150 mm, 長さ 120 m)・外部出力端子(10 mV または 1 kΩ)付

振動子：チタン酸バリウム, 100 φ, 半減半角 3°

超音波周波数：200 kHz

消費電力：A.C. 100 V×230 mA, D.C. 24 V×550 mA

寸法・重量：送受波部 140 φ×220 (高), 下部取付フランジ 210 φ, 8 kg

演算増幅部 150×440×300, 10 kg

伝送用ケーブル：4 芯(各芯シールド)延長 3000 m 以上可能

備考：USW-V 型送受波部消費電力 D.C. 12 V, 1 W

b) 基本的な性能

本機の基本的な測定精度は、超音波の水中伝播速度および発射する超音波の指向角によって決定される。現地観測における実効精度を水路実験の結果から評価即応することは技術的にほとんど不可能であり、現地比較実験によって検証することも幅広い諸条件に対応して行なうことはきわめて困難である。一応の目安として模式的に以下のように検討することができる。

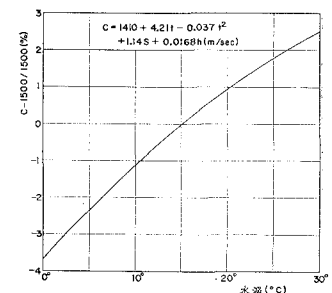
- ① 伝播速度による誤差：海水中の超音波伝播速度に関する前述の式
- (2) において伝播速度に顕著な影響

を与える要素は水温であり、塩分濃度の変化および浅海域における水深変化の影響はほとんど無視しうる。

図-5 は式 (2)

における水深の影響を、標準音速 1500 m/sec に対する相対誤差として示したもので、常温帯では水温 1°C の変化に対し 0.2% 程度の誤差が生ずる。現地観

図-5 水中音速伝播速度の誤差

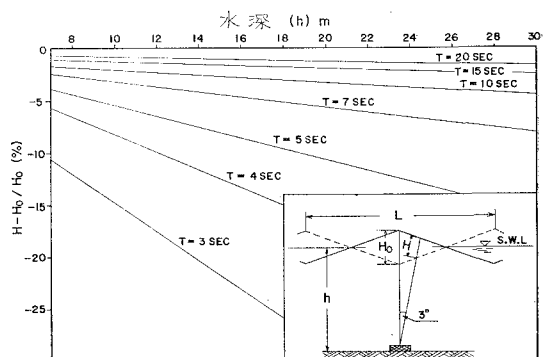


測において常に水温補正を行なうことは困難であり、10°C 程度の水温変化は無視するものとすればその中央値に標準音速を設置したとして、±1% 程度の誤差が介入することとなる。

② 指向角による誤差：発射する超音波の指向角が、波高測定値に与える誤差は水深、波長、波高によって決定され、測定波形のひずみ度は海面勾配と水温によって決定される。

三角波を仮定して、本機の標準仕様指向角半減半角 3°

図-6 指向角(3°)による誤差



の場合における波高測定値の最大相対誤差は式(3)および図-6のごとく表わされる。

$$\frac{H-H_0}{H_0} = \frac{\cos 3^\circ - \frac{h}{L} \sin 3^\circ}{\cos^2 3^\circ - \left(\frac{2H_0}{L} \sin 3^\circ\right)^2} - 1$$

$$\approx 0.0014 - 0.2099 \frac{h}{L} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 H_0 : 波高真値、 H : 測定波高、 h : 平均水面より振動子設置点までの水深、 L : 波長

式(3)の近似値および図-6は $H_0/L < 0.14$ の範囲で H_0 を無視して適応され、 $H_0/L > 0.14$ の場合には徐々に H_0 の影響が現われる。

図-6から、振動子の設置水深10mの場合の最大誤差は、周期10秒の波に対し2.1%、周期3秒の波では14.8%と求められるが、機器装置の超音波受信特性および波の谷の部分における反射特性を考慮し、水槽実験および現地観測値を参照すると、実効上の最大誤差は上記誤差の約1/2程度と考えるのが適当である。

正弦波形を仮定すると、通常の観測条件下における最大誤差は、三角波形の場合の1/2~1/5程度となる。

波形の最大ひずみ度は、三角波形の場合には波高値に対する上述の最大誤差とほぼ一致する。正弦波の場合にはその平均水面付近において三角波の場合の1.4倍程度となるが、山および谷の部分では1/2~1/4程度となる。

③ 屈折による誤差: 超音波の伝播中には経路の水質条件によって屈折現象も現われる。この現象が顕著になると反射波の受信は不能となり欠測状態となるが、通常の海域条件では欠測状態が発生する可能性はないと考えてよい。

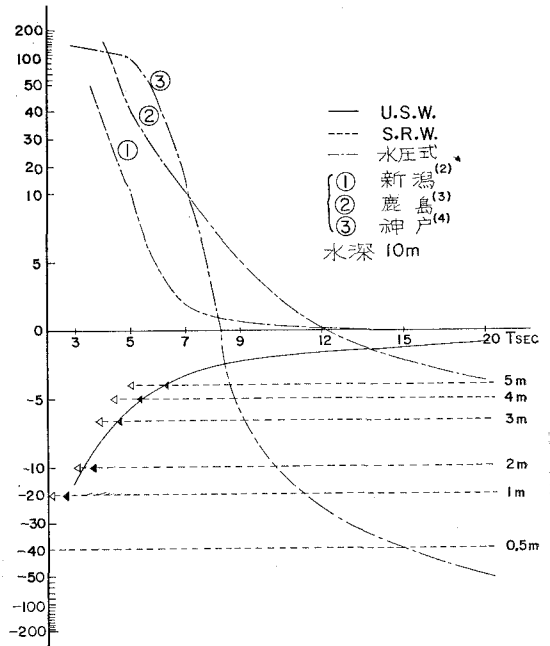
したがって測定可能な範囲で考えうる屈折現象による最大誤差は0.5%程度となる。

④ 他機種波高計との必然誤差の比較: 従来の現地波浪観測に最も多用されてきた水圧式波高計(抵抗ひずみ線型: S.G.W., 摺動抵抗型: P.W.)および階段抵抗式波高計(S.R.W.)と本機(U.S.W.)の、測定原理に起因する必然的な誤差を波高測定値について比較すると、図-7のごとく表わすことができる。

各形式の波高計のもつ必然的な誤差の原因はそれぞれ異なっており、U.S.W.の場合は前述の超音波伝播速度および指向角に起因する模式的最大累加誤差、S.R.W.の場合には海水との短絡接点間隔10cmを基準として最大測定誤差20cmを仮定して、 $(H-H_0)/H_0$ で示している。

水圧式波高計の測定値については、圧力波形から表面波形への換算補正係数 n について現在最も標準的な一定値として使用されている $n_0=1.35$ と実測値あるいは実験式から求められた周波数関数としての n 値の相対誤差 $(n_0-n)/n$ によって示している。図中の①は新潟西海

図-7 波高測定値の必然誤差



岸(水深12m)における n 値を、水理実験結果から現地条件に換算したものである。②は鹿島港水深12mに設置されたU.S.W.とS.G.W.の相関⁹⁾、③は神戸港水深16m地点のP.W.(設置水深10m)およびS.G.W.(設置水深6m)の平均値とS.R.W.の相関⁹⁾を示している。

以上の相対誤差は測定原理に基づく可能最大値を示しているが、U.S.W.およびS.R.W.の場合に含まれるこの種の誤差は実際には2/3~1/3程度と考えるべきであろう。

図は本機の測定精度が、広範囲な海象条件に対して総合的に良好であり、とくに波形勾配0.1以下の比較的波高の小さい波の場合には他機種にくらべきわめて良好な精度が得られることを示しているが、U.S.W.の絶対誤差は振動子の設置水深に比例して指向角誤差が増大する。また現地観測による容量型波高計との相関関係⁹⁾もきわめて良好な結果が得られている。

c) 実用効果と問題点の改良

本機の開発、実用化期間を含む現地観測の実績から、つぎのことがらを指摘することができる。

1) 実用上の利点

- ① 通常の進行波の場合は、表面波形を直読できると見なしうる。
- ② 他の機種では不可能であり、その誤測を発見し得なかった碎波現象の発生を記録上で確認しうる。
- ③ 受感部を海中に固定設置することができる。
- ④ 在来の機種にくらべ、とくに比較的小さい波に対する測定精度が良好である。

2) 使用上の制約

一般につきのような条件の地点に送受波部を設置して測定をすることはできない。

① 水質条件が複雑な場所や急変する場所（砕波帯内、河口付近、近接構造物等によって海水が著しく攪拌される所）で、超音波の直進性が乱されあるいは海面付近浮遊物により反射特性が不安定となるような場所。

② 構築物等に近接し、超音波サイドローブの反射が影響する所（振動子鉛直上方 30° 程度の範囲）。

③ 船舶の航行が激しい地点。

3) 開発途上指摘された問題点とその改良

① 超音波伝播経路上の浮遊物、魚類の遊泳等による不正反射波を受信し、アナログ記録計によって観測を行なう場合にはこれが致命的障害となって誤測を生ずる。

この問題点を改善するため、前述の水位自動追尾逐次比較ゲート回路による雑音信号除去方式を開発した。

② 信号伝送ケーブルが長くなるにしたがい、高周波成分の減衰、雑音の混入、誘導障害等が介入して感度の低下、誤測等の原因となる。

この問題点を解決するため、問題となる回路部分を振動子と一体的に送受波部として組み込み、全回路をソリッドステート化して耐久性、安定性を向上し、伝送経路上の減衰、誘導障害等の介入を排除した。

③ 上記 ② の改良とともに、送受波器の兼用、送受波部の小型軽量化、消費電力の軽減を計り、十分な電源確保が困難な海上観測塔やロボット・ブイ等での簡易無線テレメータによる観測への導入を容易にした。

④ 表面波形が忠実に測定されるため、有義波法によるデータの整理結果が水圧式波高計を中心とした従前の整理結果と相当異なる場合を生じた。

このような結果は本質的には機器の性能として改良を計るべき問題点ではないが、状況によっては出力回路に適当な時定数をもつローパスフィルタを入れ短周期波成分を除去することとした。このフィルタは同時にごく短発的な雑音信号を除去する効果をもっている。

4. 現地波浪観測の記録例

港湾技術研究所アシカ島観測所における昭和44年2月の定常観測資料により、超音波式波高計（水中発射型）と水圧式波高計（抵抗ひずみ線型）の同時観測記録とそのデータ解析例を示す。アシカ島観測所は東京湾口久里浜沖約2.5kmにあり、各波高計の受感部はアシカ島の南々東約400m、水深21mの海底より高さ8mのやぐらの上に設置され、測定信号は無線テレメータにより港研構内に伝送される。記録はデジタルおよびモニター用のアナログ記録計によって得られ、取得データは電子計算機により処理、解析を行なっている⁶⁾。

(1) 観測記録例

図-8 (a)

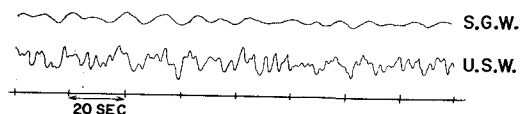
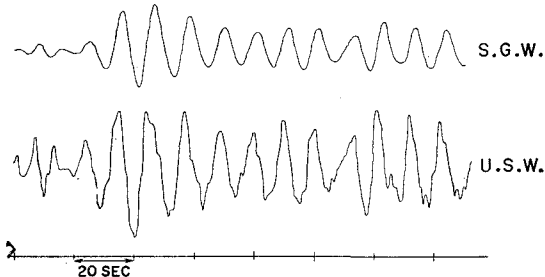


図-8 (b)



超音波式波高計 (U.S.W.) と水圧式波高計 (S.G.W.) の同時観測記録例を図-8 (a), (b) に示す。(a) は風浪が卓越し、(b) はうねりが卓越している場合で、U.S.W. の記録には周期3秒程度の波まで明瞭に捕えられている。

(2) データ解析例

① 図-9、図-10 は、2月中の U.S.W. の記録から20分間のデータ44ケースを抽出し、平均波法によって求めた平均波高 (H_{mean})、有義波高 ($H_{1/3}$)、1/10最大波高 ($H_{1/10}$) を比較したものである。図中の実線は波高の分布をレーリー分布と仮定した理論値で、表面波高の実測値がこれときわめてよく関係づけられていることは興味深い。

図-9 平均波高と有義波高の比較

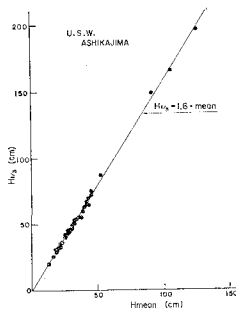
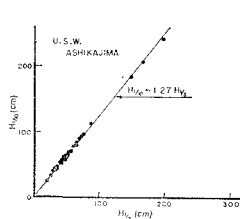


図-10 有義波高と1/10最大波高の比較



② 図-11 (a), (b) は、14日14時の U.S.W. と S.G.W. の記録を0.5秒間隔で2000個サンプリングし、瞬時水位および水圧変動の頻度を比較したもので、1級間隔は記録波形に含まれる最高波の2倍を19等分した値をとっている。図中の実線はそれぞれの記録波形の分散から得られる理論分布である。図例の χ^2 検定結果によればいずれも5%の危険率で正規分布ではないが、U.S.W. の記録の方が正規分布に近く、他の多数の解析例においては正規分布をしている場合がかなり多い。

図-11 (a)

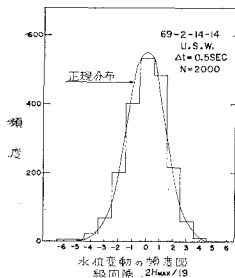


図-11 (b)

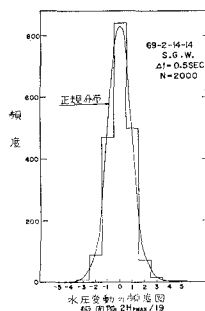
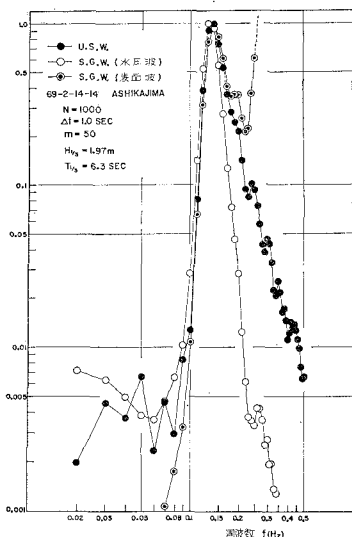


図-12 スペクトルの比較



③ 図-12

は、②の記録についてパワー Spektral を求め、ピーク周波数に対応するエネルギー密度を1としてプロットしたものである。パワー Spektral の算出は Tukey の方法にしたがい Hamming の

スペクトル ウィンドウを用いた (データ総数 1000, $\Delta t = 1.0$ sec, 最大ラグ数 50, 自由度約 40)。S.G.W. の表面波のスペクトル ($P_s(f)$) は水圧波のスペクトル ($P_p(f)$) から次式により換算している。

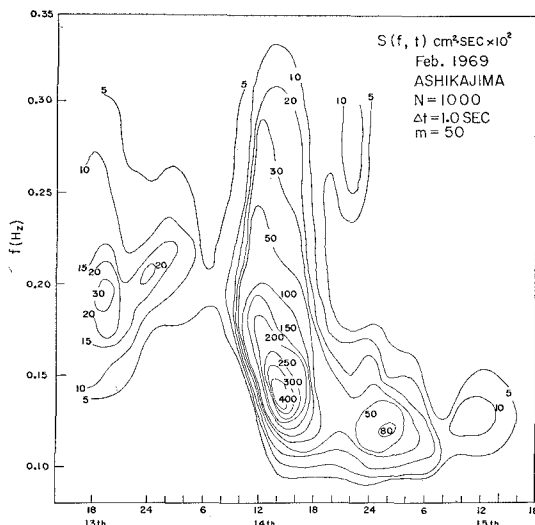
$$P_s(f) = P_p(f) \times \left(\frac{\cosh \frac{2\pi h}{L}}{\cosh \frac{2\pi R}{L}} \right)^2$$

ただし、 $h=22.08$ m (波高計設置点の水深)、 $R=8.00$ m (海底から波高計設置位置までの高さ)、 L : 各周波数に対応する波長

図において、高周波側で S.G.W. による表面波のスペクトル密度は、周波数が 0.22 Hz (周期約 4.5 秒) より大きくなると急激に増大している。これは水圧波を表面波に換算する場合に、微小振幅波理論が高周波領域では適用しづらいことを示している。

④ 図-13 は、13 日～15 日の U.S.W. による観測記録から 2 時間ごとに波のパワー スペクトル密度を求め、その時間変化を示したものである。このような解析を水圧式波高計による測定記録から行なう場合には、一般に周波数 0.2 Hz 程度以上のスペクトル密度変化の様子を知することは非常に困難であるが、この図からは 13 日の夕刻頃ピーク周波数 0.2 Hz (周期 5 秒) をもつ風

図-13 スペクトル密度の時間変化



浪が発生し、夜半には一時減衰したが、14 日 9 時頃から吹き始めた風により波が急激に発達した経過を詳細に知ることができる。

以上の例示からも明かなように、表面波形を直接観測する超音波式波高計と水圧式波高計で得られる測定記録を用いた解析結果では、同じ波を測定しながらかなり異なる場合も多い。これらの関係および取扱いについては今後の研究にまっところ大である。

5. あとがき

超音波式波高計水中発射型の性能は本文中に述べたごとく絶対的な波形の測定を可能とするものではなく、その場の水質条件、超音波特性等によって實際上補正したい必然誤差を含むものである。しかしながら通常の波浪観測においてこの誤差は実用的にほとんど無視しうる程度であり、設置条件とあわせて在来の機種とくらべ一段と精度の向上を計り得たもので、本機の開発が、今後ますます成果の活用範囲が拡大するであろう沿岸波浪の観測に貢献しうることとなれば幸いである。

本機の開発にあたって、困難な現地観測実験に際しご援助を戴いた鹿島港ならびに防災科学技術センター平塚支所の関係各位、機器の試作・改良に真摯なご協力を戴き特に回路のソリッドステート化を促進された海上電機株式会社関係各位に深甚の謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 高橋智晴他: 超音波波高計 (水中型) について, 防災科学技術総合研究速報, 昭和 41 年 3 月
- 2) 本間 仁・堀川清司他: 佐渡島の波に対するしゃへい作用, 第 13 回海岸工学講演会講演集, 41 年 12 月
- 3) 第 3 港湾建設局神戸港工事事務所: 神戸港波浪観測データ一定常整理および解析報告書, 42 年 3 月
- 4) 高橋智晴・鈴木椿実・佐々木弘: 鹿島港における波浪観測, 第 13 回海岸工学講演会講演集, 41 年 12 月
- 5) 稲田 亘・渡辺 勲: 容量型波高計について, 国立防災科学技術センター研究報告第 2 号, 44 年 3 月
- 6) 高橋智晴・鈴木椿実・中井徹也: 波高計による観測データの処理方法, 港湾技術研資料 No. 39, 42 年 12 月