

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

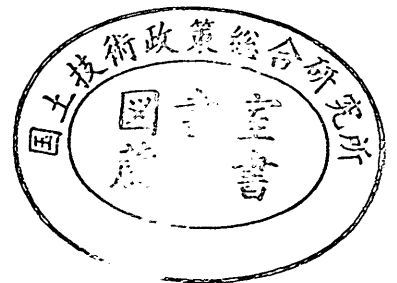
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 21

NO. 1

MAR. 1982

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第21巻 第1号 (Vol. 21, No. 1), 1982年3月 (Mar. 1982)

目 次 (CONTENTS)

1. 超音波式波高計の改良とその効果について……………高橋智晴・佐々木 弘………… 3
(Improvement of the Ultrasonic-Wave Wavemeter for the Coastal Wave Observation
and its Effect ……………Tomoharu TAKAHASHI and Hiroshi SASAKI)
2. 下層2層流についての実験的研究
……………加藤 始・中野 晋・池田高則………… 31
(Experimental Study of Lower Two-Layer Stratified Flow
……………Hajime KATO, Susumu NAKANO and Takanori IKEDA)
3. 非線形一次元圧密沈下の解析法とその適用……………小林正樹………… 57
(Numerical Analysis of One-Dimensional Consolidation Problems
……………Masaki KOBAYASHI)
4. 係船岸におけるたわみ性控え工の設計に関する研究 (第2報)
——実験的考察——……………松並仁茂・吉田行秀………… 81
(Studies on the Design Method of Flexible Anchorage of the Quaywall (2nd Report)
—Experimental Studies— ………Hitoshige MATSUNAMI and Yoshihide YOSHIDA)

1. 超音波式波高計の改良とその効果について

高橋 智晴*・佐々木 弘**

要 旨

1969年に筆者等が開発した超音波式波高計水中発射型は、表面波形を測定する標準的な波高計として沿岸波浪の定常観測に多用されている。全国各地での使用の増加にともない、この波高計の測定記録の中に異常な波形が出現するという測定上の障害が発生し、その改善が必要となった。本報告では、異常波形の発生機構・要因を実測により把握し、その障害対策として測定性能を改良・向上した新しい測定回路方式を考案した。また、在来方式との比較観測により改良効果を測定して有効であることを確認した。

異常波形発生の主原因は、碎波などにより海中に混入された大量の気泡群および海底から舞上った大量の浮遊土砂による音波の著しい減衰と異常な反射であることが判明した。なお、これによる海面反射 S のレベルの最大値と最小値の比は約 80 dB, S と気泡などからの雑音反射 N の比は 1 以下 ($S/N < 1$) であった。

改良方式は、このような条件下での測定を可能とするものであって、海面反射パルスの検知方法を従前一般に行われているパルスの前面エッジ立上り検出に変えて、雑音反射の影響を受けることが少ないパルスの後面エッジ立下りを検知する方法にしたものである。また、この方法を実現する手段として、受波信号のレベルに応じて音波の発振出力を自動調節する APC 回路と海面反射パルスを検知するためのトリガレベルを自動設定する ATL 回路を考案した。

改良された波高計による測定障害の改善度は、在来方式波高計との比較観測の結果から、すべての障害を含めた総合的な改善度は 90%、障害の形式・程度によってはそれ以上と求められた。

* 水工部 海岸観測研究室長

** 水工部 主任研究官 (海岸測定技術担当)

1. Improvement of the Ultrasonic-Wave Wavemeter for the Coastal Wave Observation and its Effect

Tomoharu TAKAHASHI*

Hiroshi SASAKI**

Synopsis

The ultrasonic-wave wavemeter, the so-called inverted echo-sounder, which the authors developed in 1969, has been used as a standard wavemeter for the coastal wave observation in Japan. However, there sometimes appeared abnormal records in measured wave profiles. Upon investigation of the causes of the abnormal records which has been carried out at Sakata Port and Hajikizaki, it was found that they had been caused by air bubbles in a swarm due to wave breaking and floating matters (for example littoral drift etc.). Because of them, the surface echo was much attenuated and reflected abnormally. The fluctuating width of the surface echo S was about 80 dB and the ratio of the surface echo S to the noise echo N (S/N) was less than the unity.

In order to remove the noise, we have proposed a new method, in which the surface echo S is detected by the backward edge, instead of the forward edge, of the signal pulse. So we have newly developed two circuits named APC and ATL to realize the method. The former automatically modulates the oscillated sonic power and the latter automatically sets the trigger level, corresponding to the input signal.

The results of the application of the circuits to the field observations indicate that the above-mentioned defects in the traditional ultrasonic-wave wavemeter can be avoided to the extent of not less than 90%.

* Chief of the Coastal Observation Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

目 次

要 旨	3
1. ま え が き	7
2. 異常記録およびその発生原因の解明	8
2.1 異常波記録のパターンとその原因	8
2.2 異常波形の発生条件	11
3. 改善方策の検討	14
3.1 発振出力調節方式	14
3.2 パルス後面エッジ立下り検出方式	14
3.3 使用周波数の検討	16
4. 改良型波高計の回路とその性能	18
4.1 APC 回路	18
4.2 ATL 回路	19
4.3 測定機能	21
5. 在来型と改良型の比較観測とその結果	23
5.1 現地実験機器の構成	23
5.2 異常波形の比較例	23
5.3 測定回路の改良効果	26
6. あとがき	28
参考文献	28

1. ま え が き

1964年度から1969年度にかけて筆者等が開発した超音波式波高計水中発射型¹⁾(以下、略称に従ってUSWという)は、超音波の水中伝播特性を応用して海面波を測定するもので、技術的・経済的に比較的簡便かつ的確に表面波形を測定し得る特長を有するところから、標準的な現地観測用波高計として水深-50m以浅の沿岸海域において多用されている。しかしながら、普及台数の増加と使用条件の多様化にともない、その長所に対する評価とともに汎用的な実用計器としては、砕波現象発生時など特に多量の気泡が水中に混在するような測定環境下での性能上の弱点が指摘され、測定性能の改良・向上が要望されるに至った。

USWの測定原理は、一対の超音波送受波器を海中に固定設置し、鉛直上方に向けて周波数200kHzの超音波パルスを毎秒数回発射し、このパルスが海面で反射して戻るまでの時間を短時間間隔で繰返し測定し、海面水位の時間変化に対応したアナログ電圧に変換して当該測定点における進行波形を得るものである。したがって、計測回路上での海面反射信号(海面エコー)のレベルが回路の動作に必要な検知レベル以上であって、かつ、現用の回路方式では海面エコー以外の雑音反射信号のレベルが検知レベル以下であることが条件となり、この条件が満たされない場合には測定は正常に行われなことになる。

USWにおける送受波器と海面間の超音波の伝播を考えた場合、音波は伝播・反射の過程で、拡散・吸収による減衰をはじめ様々な形の損失を生じ減衰する。ここで送受波器と海面の間に伝播路として介在する海水がほぼ一般的な通常の水質であれば、通常の減衰はあっても測定は正常に行われるようになっていく。しかし、伝播経路上に海水と音響的に不連続な物質が存在したり、海水自身の不均一(温度・塩分・密度などについて)による境界層が形成されている場合には、それらの境界において音波は伝播を妨げられ、また音波のエネルギーの一部は反射、散乱あるいは吸収されるといった現象を生じ、受波信号には異常な雑音反射の発生、海面エコーレベルの低下、SN比(海面反射信号の振幅 S と雑音反射の振幅 N の比)の低下となって現われる。このような現象があるレベル以上に達すると、通常のアナログ記録計(ペン書き記録計など)によって正常な波形を得ることは困難

となる。これらのことは、音響測深機等が雑音反射があっても目的とする海底が判読できる記録画面を得るため、一般に放電破壊式の記録方式を用いていることや、その記録画面にさまざまな雑音反射や残響がみられることなどから容易に推察されるであろう。

一方、USWの実用化に際しては、長期間にわたる定常観測を目的とした汎用的な波高計という観点から、測定値は海面にフォローした一線の連続信号として出力・記録することを狙った。当初、上述の障害原因として遊泳漁類やそれに類する漂流物を予想したので、その防除対策として、測定波面の変化に自動追尾して動作することにより波面付近の極く狭い範囲からの反射信号のみを通過させる信号ゲート回路(AFNG回路)を考案し、これを通して信号処理することによりペン書き記録を可能とした。しかしながら、多様な環境条件下での使用を経験するにしがたい、測定記録にしばしば異常波形が現われることが指摘され、筆者らはその原因の探求と対策についての研究を進めてきた。

まず最初に問題となったのは、測定点付近を航行する船舶のスクルー等によるキャビテーション現象や、河口付近などにおける水質の激しい乱れによって受波信号に欠測や異常反射が混入することによる不良データの発生であった。このような事例は超音波応用機器の特性上不可避なものであり、測定点選定上の制約となるのはやむを得ないとしてきた。次いで、砕波現象が発生するような海面状態の場合には、音波の減衰による受波信号抜けや水中に巻き込まれた気泡により形成される境界層への追従、およびこれらの混合型に対応すると考えられる異常波形記録の発生が確認され、標準波高計として汎用機能を確保するためにはその改良が不可欠とされるに至った。これらの問題点に対する解決策として筆者らは、砕波時におけるUSW測定障害の改善を目的とした新しい測定方式として、従前一般に使用されてきた測定パルスの立上り検出方式をパルスの後面、立下り検出方式に改めることの必要・有効性を確認し、この新検出方式を実現するために必要な補償回路として、APC(自動出力調節)およびATL(トリガレベル自動設定機能)を付加した新しい回路構成を考案した^{2),3)}。

本報告では、上記障害原因の究明と機器性能の改善についての研究過程において、現地で得られた現象とUSWの在来測定機能の関係、およびその改善策を試作回路による試用実験結果により明らかにした。一方、水

槽実験において得られた気泡が介在する場での超音波伝播特性について、周波数と反射レベルの変動および SN 比に対する考察を行った。さらに、ここで得られた成果を取り入れた改良方式の実機により在来型との比較観測により効果を測定した。

2. 異常記録およびその発生原因の解明

2.1 異常波形記録のパターンとその原因

現地波浪観測において、風浪が激しくなり砕波現象が生ずるようになると、USW の記録波形中に見えて海面波形とは異質な USW 特有の波形が出現することがある。ここでは、このような記録を異常波形記録と呼ぶことにする。砕波現象発生時の異常波形記録には幾つかのパターンが見られるけれども、大別すると 図-1~図-3 に示す三種類の代表的な事例に区分することができる。ここでは便宜上、図-1 のような波形記録を信号抜け型、

図-2 を気泡追従型、図-3 を混合型の異常波形記録と呼ぶことにする。

こうした異常波形記録の発生要因は、波によって海中に巻き込まれた気泡群および海底から巻き上げられた土砂等の浮遊粒子による音波の吸収・反射・散乱と考えられる。超音波の伝播特性からみて主たる要因は気泡によるものと推定されるけれども、浮遊粒子による影響もそれが多量に存在する条件下では、気泡群による影響と相まって、無視し得ないものであると考えられる。海水中に気泡が存在すると、それが微量であっても音波の伝播に甚だしい影響を生ずることは、音響学の分野ではよく知られている事実である⁴⁾。これは気体（気泡）の体積弾性率が海水のそれに比べて 4 桁も小さいため、音圧によって気泡が激しく収縮・膨張するからであって、そのため音波は散乱されエネルギーの一部は熱として吸収される。したがって、音波は気泡群を含む海中を進行する

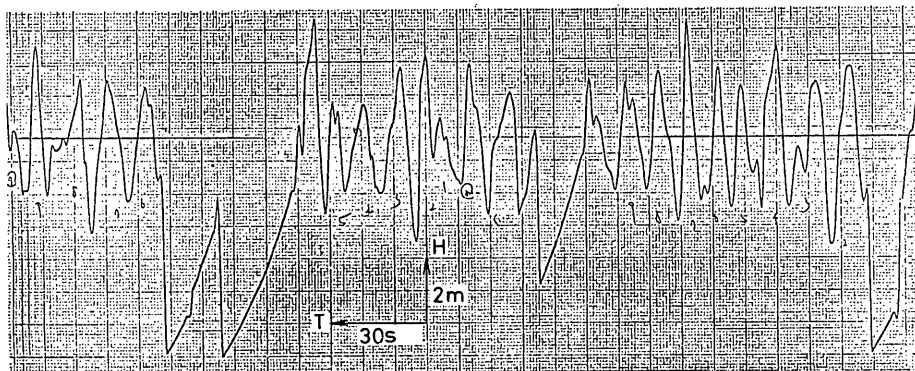


図-1 信号抜け型異常波形記録

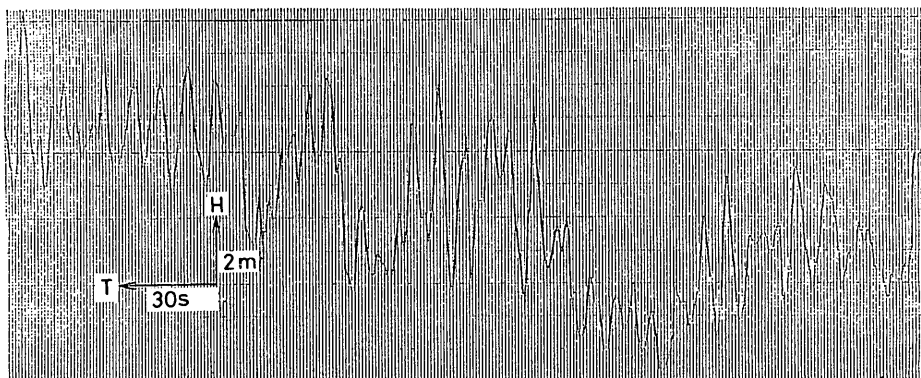


図-2 気泡追従型異常波形記録

超音波式波高計の改良とその効果について

につれて減衰が増加する。また、気泡を含まない部分と含む部分とは固有音響インピーダンスが異なるため、その境界で音波は反射する。

砕波を生じるような異常気象時の海中の状況がどのよ

うなものであるか具体的には解らないけれども、観察される海面の状況や水路実験での様子からみて、海中におびただしい量の気泡が巻き込まれることは十分に推察できる。図-4～図-6は、本研究の過程において行った現

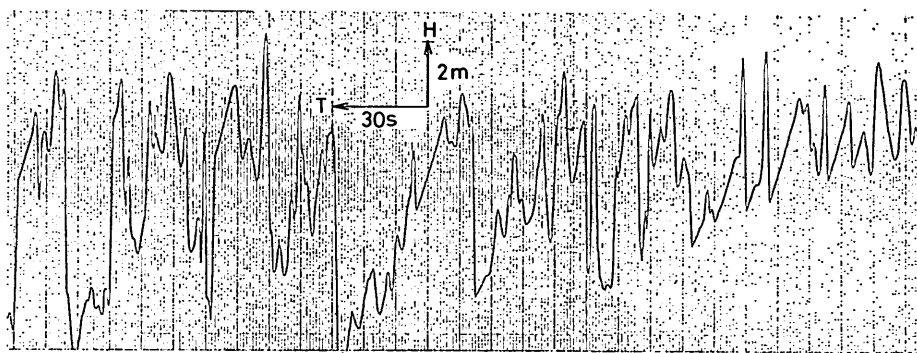


図-3 混合型異常波形記録

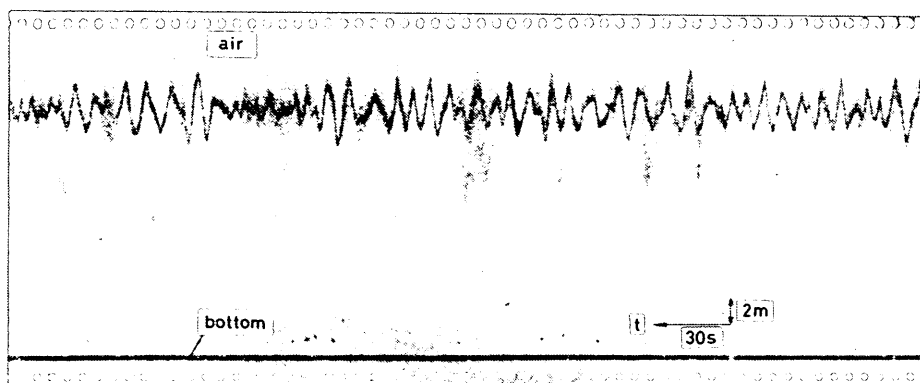


図-4 USWで測定された海面エコー，雑音反射および残響 (1) [(200 kHz)]

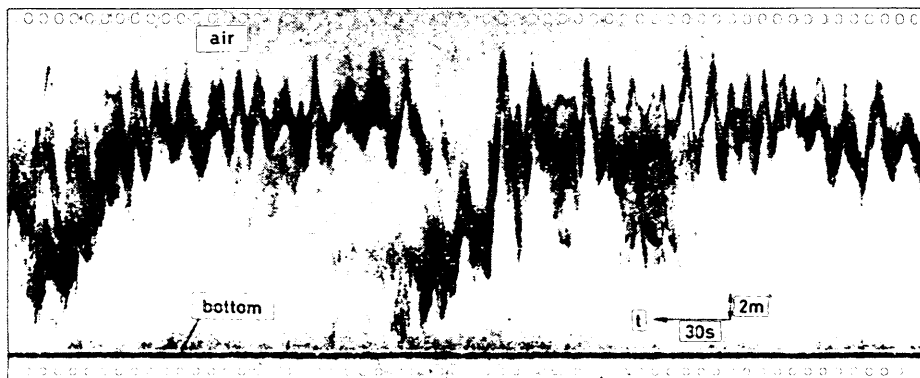


図-5 USWで測定された海面エコー，雑音反射および残響 (2) (200 kHz)

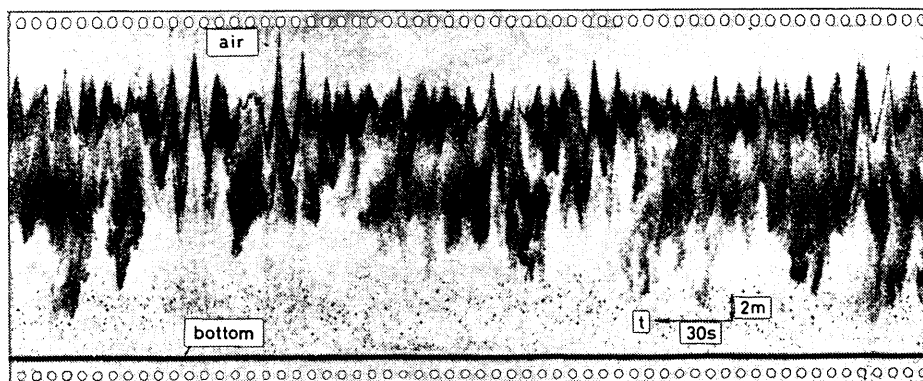


図-6 USW で測定された海面エコー，雑音反射および残響 (3) (200 kHz)

地観測実験で，海中状況を知るために取得した記録の一部である。観測は第一港湾建設局酒田港工事事務所の波浪観測装置に実験用装置を付加し，酒田沖水深 -20 m 設置された USW 送受波器で得られた受波信号を，音響測深機の放電破壊式記録器によって記録する方法によって行った。記録紙上には超音波パルスの発射から海面エコーの受波に至るまでのすべてのエコーと，その後続く残響の一部が音圧レベルで記録されている。

図-4 は海面付近にわずかに混入した気泡からの反射と思われる雑音エコーが見られる場合，図-5 と 図-6 は，砕波により巻き込まれた大量の気泡からの反射と推定される雑音エコーが見られる場合の記録であり，図-5 および 図-6 の海底付近に見られる雑音エコーが海底から巻き上げられた浮遊粒子によるものと思われる。これらの記録からも明らかなように，砕波時には正規の信号である海面エコーのほかに気泡の混入等による高レベルの雑音反射が相当深部まで発生しており，これが障害となって異常波形を生じる原因となっている。なお，これらの記録画面の発色の濃淡は，受波信号の音圧レベルの高低を表わしているけれども，音波の減衰には比例していない。しかし，このような雑音反射を生ずる要因が音波の著しい減衰を引き起していることは確かであり，図-5，図-6 に見られるように雑音反射がある場合には，海面エコーが淡くなったり消えていることで推察できる。そして，このような音波の著しい減衰が異常波形を生ずるもう一つの原因となっている。

図-5，図-6 にも見られるように，波頭が碎ける時点で発生した気泡は波動と共に海中に突入し，さらに深部に潜入する。巻き込まれた気泡群のうち径の大きい気泡は，その浮力が海水の粘性に打勝って短時間で浮上し消

滅すと思われる。これに対して径の小さい気泡は浮力が小さいので海中に割合長く滞留し，その一部は合体して浮上し，また一部は海水中に溶解して消滅する。水中における微小気泡の寿命については理論的あるいは実測により確かめられており，不飽和の水中で実測によれば，気泡の共振周波数が現在 USW で使用している 200 kHz より上であるような微小気泡の寿命は 40 秒以下であると求められている⁹⁾。なお，200 kHz の超音波に共振する気泡の半径は約 0.016 mm である。

海水中に存在する気泡は種々の大きさを持ち，また気泡層の厚さ，気泡の混入密度なども条件によって異なり様々である。こうしたことから，気泡層が海中を伝播する音波に及ぼす影響を普遍的に求めることは困難である。しかし，気泡と海水の体積比が 10^{-4} 程度であっても，平均の体積弾性率が $1/2$ 程度に低下するため，気泡を含まない海水との境界で反射を生ずる。また，気泡の径が同じであるとすれば，気泡を含む水中での減衰も境界平面の反射率も共振周波数の場合が最大で，周波数が共振よりある程度以上高くなると急に低下する。また気泡の混入密度が増せば減衰，反射率とも増大する⁹⁾。このようなことから，USW による測定では微小気泡による影響は無視し得ないものである。

これまで述べてきたように，波が碎けて海中に気泡を巻き込むような条件下での USW の受波信号は，海面エコー S と気泡そのほかによる雑音反射 N で形成される。従来の波高計回路ではこの S と N の比が 1 以上であって，かつ，パルス検知回路での S の値が検知レベルとして設定したトリガレベルより高く， N の値がトリガレベルより低いことが正しい測定動作を得る基本条件となっていた。しかしながら，荒天時にはこうした条件

超音波式波高計の改良とその効果について

を常に満足する受波信号を得ることが難しく、そのため測定記録に異常波形を生じていた。

現地で観測された USW の受波信号の例を写真-1 に示す。発射された超音波パルスが伝播、反射の過程で拡散・吸収・散乱などにより減衰し、受信回路に入力された海面エコーが写真-1 (f) のように小さく、それを増幅したレベルがトリガレベルに達しないと、海面エコーは検知されず受波信号は欠測となる。この状態がある時間継続した場合は、図-1 のような鋸歯状の信号抜け型異常波形記録が出現する。なおここで波形が鋸歯状になるのは、受波信号が欠測となる直前に出力回路に保持されていた電圧が回路のキャパシタンスを通して放電されることによるものである。

上記の原因は、海面エコーの受信レベル変動とトリガレベルの相対値によるものであるけれども、単純にトリガレベルを下げて検知感度を上げたり、また超音波パルスの発振パワーや受信回路の増幅度を大きくして海面エコーレベルの最低値を補償しようとする、気泡の混入等により比較的明瞭な境界層や反射強度の強い条件が発生した場合には、受波信号は写真-1 (c), (d) のような波形となるため、回路は雑音反射を検知して図-2 に示す気泡追従型の異常波形記録となって現われる。ここで (d) は $S/N < 1$ の場合であって、従来の波高計ではパワ

ーや増幅度を上げて補償できない。

図-3 に示す混合型は、前記 2 種類の異常波形が同時に発生した場合のものである。また写真-1 (a) は雑音反射を含まない良好な海面エコー、(b) は気泡反射を含んでいるがトリガレベル以下であって影響のない場合、(e) は気泡反射に比べて海面エコーが著しく小さい場合の受波信号の例である。

2.2 異常波形の発生条件

異常波形の発生原因は、上述のように波によって海中に巻き込まれた気泡、そのほか海中に混在する異媒質およびその間の超音波伝播特性によるものであるけれども、荒天時における伝播媒質の性状とそれにもとづく超音波の吸収・散乱・反射などの特性を定量的に把握することは極めて困難であり、現実には不可能である。したがって、異常波形の発生条件を従来の現論的、実験室的研究成果と対応させて普遍的に求めることは困難である。そこで、ここでは異常波形の発生条件を、現地波浪の定常観測データをもとにして、気象・海象条件との関係から求めてみた。

表-1 は、酒田港沖水深 -20 m に設置されている USW

表-1 異常波形の発生率 ($H_{1/3}$, \bar{V})

(a) 観測全数に対する割合

条 件	出現回数	異常波形発生回数	異常波形発生率
観 測 全 体	354 回	28 回	8%
$H_{1/3} > 3.5 \text{ m}$	72	23	32
$\bar{V} > 8.0 \text{ m/s}$	69	22	32
$H_{1/3} > 3.5 \text{ m}$ $\bar{V} > 8.0 \text{ m/s}$	54	20	37
$H_{1/3} > 4.0 \text{ m}$ $\bar{V} > 10.0 \text{ m/s}$	17	10	59

注) 測得率 98.3%

(b) 異常波形全数に対する割合

条 件	出現回数	出現率	備 考
$H_{1/3} > 3.5 \text{ m}$	23 回	82%	異常波形の 全数 28 回
$\bar{V} > 8.0 \text{ m/s}$	22	79	
$H_{1/3} > 3.5 \text{ m}$ $\bar{V} > 8.0 \text{ m/s}$	20	71	
$H_{1/3} > 4.0 \text{ m}$ $\bar{V} > 10.0 \text{ m/s}$	10	36	

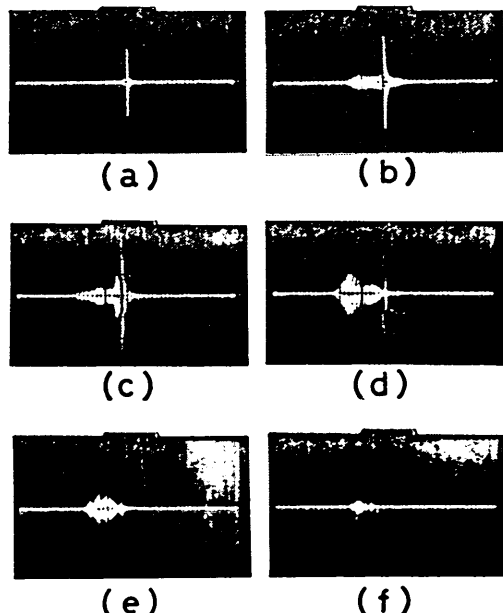


写真-1 受波信号の種々の形状

により取得された 1973.11 の観測記録について、異常波形の発生率を求めたものである。なお、波の観測は 2 時間毎に行われており、1 回の観測記録長は 20 分間である。表-1 (a) に示すように観測期間中の異常波形発生率は 7.9% である。しかし、これを観測時の 10 分間平均風速 \bar{V} および有義波高 $H_{1/3}$ の条件についてみると、 $\bar{V} > 8 \text{ m/s}$ 、 $H_{1/3} > 3.5 \text{ m}$ のいずれの場合も 32%、両条件を一諸に与えた場合は 37% となり、かなり高い発生率を示す。さらに、条件を $\bar{V} > 10 \text{ m/s}$ 、 $H_{1/3} > 4 \text{ m}$ とすると発生率は 59% と増大する。

また、これらの関係を異常波形が発生した場合の観測記録についてみると、表-1 (b) に示すように異常波形の約 70~80% は $\bar{V} > 8 \text{ m/s}$ 、 $H_{1/3} > 3.5 \text{ m}$ で出現している。なお、表-1 では異常波形として回路雑音、漁類またはこれに類する漂流物、小規模な残響等が原因とみられる単発的なスパイク状の波形も異常波形として含めてある。しかし、このような現象は原因的にみて 図-1~3 の異常波形と異質なものであるため、これを除外してみると、異常波形の 95% 以上は $\bar{V} > 10 \text{ m/s}$ 、 $H_{1/3} > 3.5 \text{ m}$ で発生している。図-7 は、検討に使用した観測記録を波形状で区分し、横軸に $H_{1/3}$ 、縦軸に \bar{V} をとって発生分布を示したものである。

これらに示されるように、異常波形の発生には風速と波高が大きく影響しており、発生率は風速と波高の増大

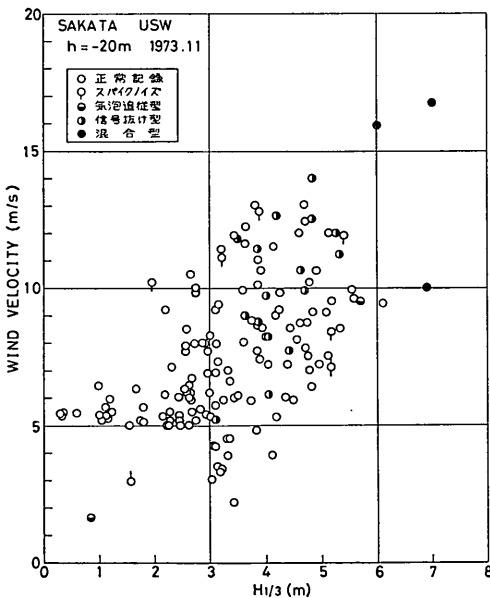


図-7 異常波形を含む波の分布 (波形状態別)

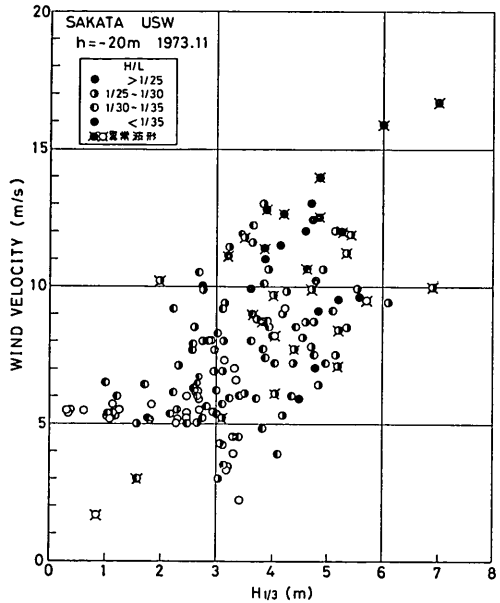


図-8 異常波形を含む波の分布 (H/L 別)

表-2 異常波形の発生率 (H/L)

条 件	出現回数	異常波形発生回数	異常波形発生率
観 測 全 体	354 回	28 回	8%
$H/L > 1/30$	52	11	21
$H/L > 1/25$	25	12	48

につれて増加する傾向がある。しかも、異常波形のほとんどは \bar{V} と $H_{1/3}$ がある閾値を超えた範囲で発生している。このことは、波高と風速が大きくなると波頭が砕けて海中に大量の気泡が巻き込まれ、音波の減衰と異常反射が生じる。ということで容易に説明できる。

次に、上述の条件に波形勾配 H/L を加えて検討したのが 図-8 と 表-2 であり、風向の条件を加えたのが 図-9 である。図-8 にみられるように異常波形のほとんどは $H/L > 1/30$ で発生しており、異常波形全体の 82% を占めている。また、その発生率は表-2 のように $H/L > 1/25$ の波では 48%、 $1/25 > H/L > 1/30$ の範囲の波では 21% となっており、波頭の崩れやすさからみて当然といえる結果を示している。

一方、風向については 図-9 のように示されるが、これは波向との関係で検討されるべきであろう。酒田港で

超音波式波高計の改良とその効果について

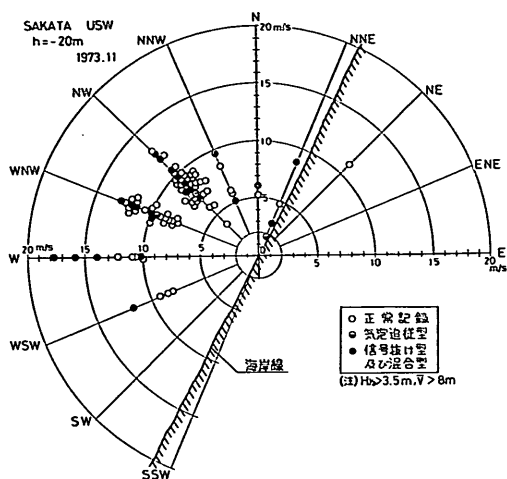


図-9 異常波形を含む波の分布 (風向・風速別)

異常波形が記録されるような冬期風浪の多くは、低気圧が日本海を北東進または北海道付近を東進するときが発生する。この場合、強風の方向は略 W~NNW であり図-9 もこれを示している。ここで測定点付近の波向は浅海域での屈折もあって風向とは必ずしも一致しないけれども、波の発達過程では波の進行に対してほとんど順方向の追風とみなすことができる。したがって、波頭が砕けやすい条件、すなわち異常波形が発生しやすい条件といえる。

図-9 は、このような特有の条件下での結果であるの

で、これだけで異常波形の発生と風向の関係を結論することはできないけれども、各地で行われている定常観測における異常波形の発生状況を調べてみると、一般的にみて次のようにいえる。

- ① 低気圧の通過に伴って発生するような擾乱下では、波の発達段階で多くみられ、測定点付近の風速がピークを過ぎて数時間経過し、低気圧の移動に伴って風向が変化してくると波高と風速が大きくても激減する傾向がある。一例として 1974 年 1 月に酒田港で観測された風と波の時間変化図を 図-10 に示す。
- ② 図-1~3 に示したような異常波形は、波向に対して順方向の風が吹いている場合に多い。
- ③ 波向に対して逆方向の風の場合は、小規模な気泡追従型、信号抜け型あるいは単発的なスパイク状の波形がみられる。

また、海面の状態からみて波面の傾斜が急な波峯の立上り部分で、海面エコーレベルの低下による信号抜け現象がみられる。この現象は波形勾配が大きい風波の場合に多く、海面に小さな凹凸をもったうねり性の波では少ない。これは海面の傾斜、海面のあかさ、あるいは表面のかく乱によって混入した気泡などにより、反射損失、散乱損失が増大するためであろう。

以上のように異常波形の発生条件は、風と波の条件からある程度求めることができる。しかし、実際の観測ではこのほかに海中に設置された送受信面への藻・海草・

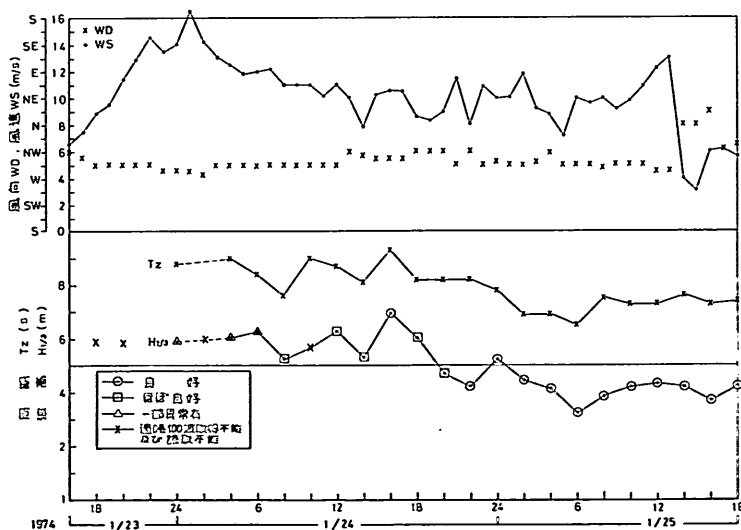


図-10 風と波の時間変化図 (酒田港, 1974 年 1 月)

貝類の付着による音波の減衰、海底から舞上った浮遊粒子による散乱・吸収、信号伝送ケーブルの特性とその経年的劣化による伝送信号の減衰、送受信回路の設定利得とその経年的変化による測定性能のパラッキ・変動などを加味して考える必要がある。したがって、上述の結果を数値的にそのまま各地の観測に当てはめることはできないけれども、傾向としてあるいは概数としてみることはできる。

3. 改善方策の検討

異常波形の発生原因とそれに対する波高計回路の機能を検討した結果、従来の波高計回路のままでは、異常波形が発生するような条件下での媒質の性状とその間における超音波の伝播特性による影響を除去することはできないと判断された。そこで、現地での受波信号の観察・測定結果をもとにして改善策を検討し、波高計回路に以下の改良を施すことにより改善を図った。

3.1 発振出力調節方式

現地波高計による当初の実測では、気泡が混在する場での海面エコーと気泡からの反射波の音圧レベル差（相対レベル）は、通常 25 dB~12 dB* 程度と求められていた。したがって、レベル差がこの程度あれば信号伝送ケーブルの長さ、送受波器設置水深などを含めた機器および観測場所の条件に応じて送受信総合利得を適宜調整し、トリガレベルに対して受波信号のレベルが適当になるようにすれば、気泡の影響を除去して異常波形記録の発生を防ぐことが可能であると考えられた。そこで、これを実現するための手段として、超音波送波用振動子のインパルス励振電圧をステップ状に変化する方法により超音波出力を調節するパワーコントローラ（PC）と、受信回路の増幅度を調節する組合せ方式により所要の送受信利得を設定する方法を採用し、一応の成果をおさめた。

使用した PC は、送波出力を 3 dB ステップで 12 段可変するもので、その特性を図-11 に示す。また受信回路の増幅度は連続的に可変される。

PC 方式の効果は、海面エコー S と気泡等の雑音反射 N の比が 1 以上 ($S/N > 1$) であることを前提としたものであり、このような条件下では相当の効果が認められ

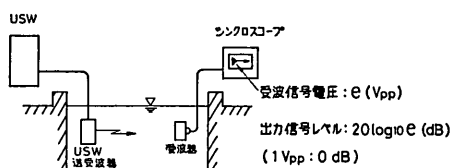
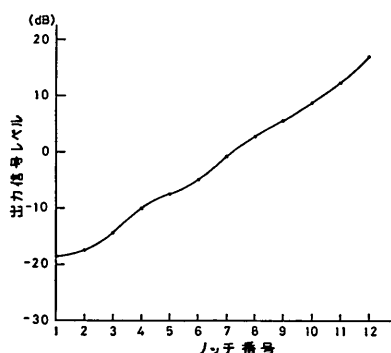


図-11 パワーコントローラ（PC）の特性

た。しかし、その後の現地観測実験の過程において、荒天時には S よりも高いレベルをもった N が同時に出現 ($S/N < 1$) することが確認され、これによって PC 方式だけでは異常波形記録の発生を防止することが不可能であることが判明した。そこで、さらに検討を加えて次に述べる回路方式を考案し、改良を進めた。

3.2 パルス後面エッジ立下り検出方式

この改良方式は、従来の波高計が具備している有用な機能（AFNG 回路⁷⁾）を損うことなく活用し、かつ、受波信号の S/N が 1 以下であっても海面波形の測定を可能としようとする波高計を提供しようとするもので、この報告でいう改良新型波高計はこの回路方式のものである。

図-12 は、受波信号とトリガレベルの関係を在来方式と改良方式について模式的に示したもので、 $S/N > 1$ の場合には同図 (4) のようになり、 $S/N > 1$ 、 $N > TL$ である (3) の場合と共に在来方式では S と N を弁別することはできず、回路は N でトリガされ異常波形記録となる。また、音波の減衰によって受波信号のレベルが低下して (5) のように $S < TL$ となると S は検出されず受波信号は欠測となる。これを予測して受信回路の利得を単純に高くして受波信号レベルを補償しようとする、PC 方式を含めた在来の固定利得、固定トリガレベル方式では、雑音反射 N を含む場合の S 、 N 、 TL の関係は (3) の状態に近づくことになり、検出可能な信号の

* 二つの強度の比、またはある基準に対する強度の比を表わす単位をデシベル（記号：dB）という。音の強さ I_1 と I_2 の比は $10 \log_{10} (I_1/I_2)$ で、音圧 p_1 と p_2 の場合は $20 \log_{10} (p_1/p_2)$ の数値で表わされる。

超音波式波高計の改良とその効果について

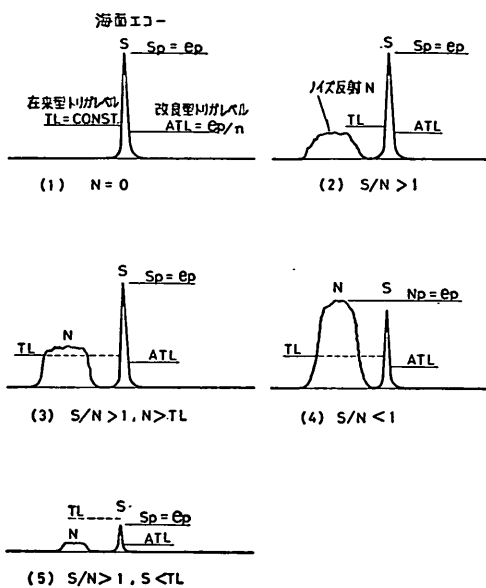


図-12 受波信号とトリガレベル

レベル範囲は広くならない。

改良型波高計は、パルス信号の検出方法として従前より一般に使用されてきたパルスの前面エッジの立上り検出方式を、パルスの後面エッジの立下りを検出する方式に改めることにより、雑音反射を含む場での測定機能と可測信号レベル範囲の拡大・向上を図ったものである。改良新型波高計は図-13のブロック・ダイアグラムに示す回路で構成されており、この方式を実現するために必要な新しい回路として次章に述べる APC 回路、ATL 回

路が付加されている。

次に改良新型波高計の基本的な考の方を述べる。

USW の受波信号は、海面エコー S と気泡等による雑音反射 N で形成されている。この N は測定原理上、時間的にみて常に海面エコー S の前にあり、後側には原則的には生じないはずであるけれども、実際には海中に存在する気泡等による境界層と海面あるいは伝播経路上での多重反射、海面付近に存在する微小物体による音波の散乱、サブロープの影響などによる残響の形で出現する。ただし海面エコーとの相対レベルは一般に低い。一方、海面エコーパルスの形状は、送信パルスに応じた共振波形を呈しており、その立下りは立上りよりも幾分裾に広がっているけれども、上部は割合に急峻な形をしている。したがって、受波信号を海面エコーパルスが飽和しない範囲で十分に増幅し、トリガレベルを水位測定

のサンプリングごとに図-12に示すように入力信号の最大値を分圧した値で設定し、海面エコーパルスの立下り部分でトリガすることができれば、気泡等による雑音反射の影響を受けることなく、在来の立上り検出方式の波高計とほぼ同様の精度により海面波形を得ることができる。実際の測定では、海面エコーパルスの形状は常に相似でなく反射、散乱によって崩れるけれども、200 kHz の超音波を使用した現用の波高計では有効パルス幅は約 $20 \mu s$ 程度とみることができるから⁸⁾、それが倍に変化したとしても波高にして約 3 cm 程度の誤差である。なお、USW から発射される音波パルスは、振動子にインパルス電圧を加えて発振した減衰振動波であり、振動は 100

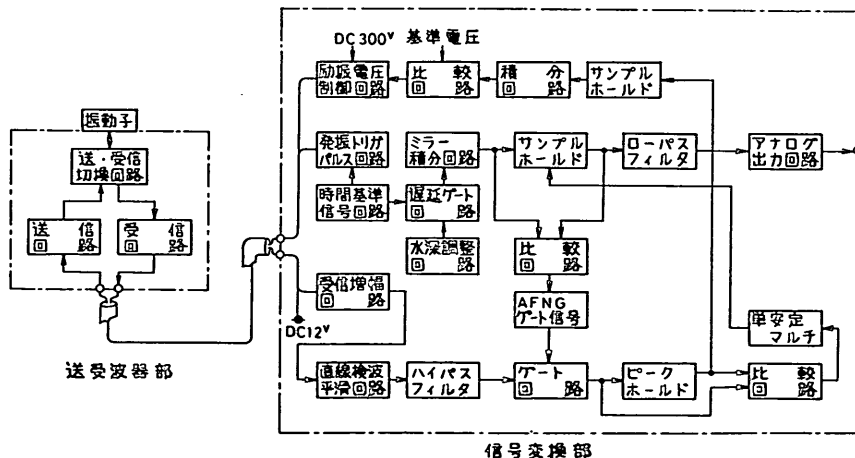


図-13 改良型波高計ブロックダイアグラム

～200 μs 継続するが指数的に減衰する。また、改良型波高計では受波された交流パルスは、信号を処理する上で雑音の影響を軽減するため直線検波・平滑回路で半波のエンベロープ波形に変換している（後出、図-20 参照）。

上述したように、改良方式は雑音反射の影響を受けにくいという特長がある。しかし、この特長を生じて測定可能な海面エコーのレベルを広くとるためには、回路雑の影響を受けないように微小な S は充分増幅する必要がある。反面、増幅度をあまり大きくすると大きな S が入力された場合、S は飽和して信号の検知はパルスの裾の方で行われることになり、測定精度が低下する。したがって回路が飽和しないことが必要となる。改良型では、受波信号のレベルに応じて超音波発射パルスの出力を自動的に調節する APC (Automatic Power Control) 回路、測定のサンプリングごとの受波信号のピーク値を基準としてトリガレベルを自動調節して設定する ATL (Automatic Trigger Level Control) 回路によりこれを補償している。

3.3 使用周波数の検討

海水中には、波による水と空気の混合のほかプランクトン、浮遊土砂粒、魚類、船舶の走行あるいはスクレーによる水と空気の混合などを発生源とする種々の大きさの気泡が含まれ、海中を伝播する超音波に様々な影響を与える。とくに水中に継続的に存在する気泡は、50～100 kHz ぐらいの共振周波数をもつのでこの程度の周波数の超音波に強く影響するとされている。そして一般に超音波周波数が高いほど水中に混存する気泡の影響を受けにくいとされている。一方、USW の開発に際して行った当初の実験結果では、高い周波数の音波は海面エ

ーレベルの変動が大であった。そこで従来の波高計には海面エコーレベルが比較的安定していた 200 kHz の周波数を採用してきた。しかし、改良型の回路方式による場合にはレベル変動が補償されることになるので、高周波音波の使用効果に着目して実験的検討を行った。

実験は 200, 400 および 600 kHz の 3 周波について、図-14 に示す配置により水平方向に超音波を放射し、

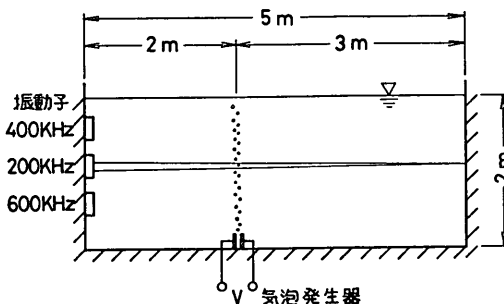


図-14 実験装置の配置

播路の中間に電気分解により発生した極く細い気泡の層を介在させ、水槽壁面（コンクリート）と気泡層境界面からの反射音圧レベルをオシロスコープで測定し、同時に壁面反射のピーク値を記録した。なお、各振動子の指向性は現用 USW にあわせて半減指向角 3°（半角）とし、気泡がないときの壁面反射レベルが同一になるように受信回路の利得を調整し、その後、気泡発生器の電極電圧を段階的にあげて気泡量を増加させる方法をとった。また、振動子の駆動には 1 ms のトーン・バースト波を用いた。

図-15 は、200 kHz と 600 kHz の壁面反射のピーク

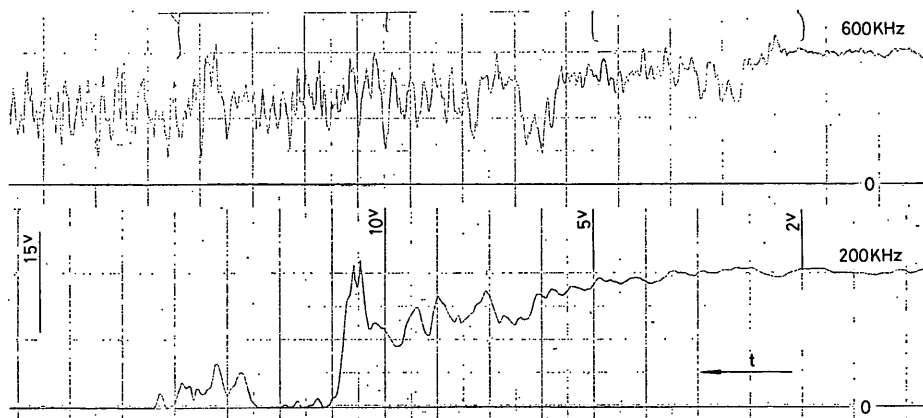


図-15 200 kHz と 600 kHz の超音波に対する気泡の影響

超音波式波高計の改良とその効果について

レベルの変動を記録したもので、横軸には時間の経過とともに気泡発生器の電極印加電圧の増加を示している。図にもみられるように 200 kHz の反射レベルは安定しているけれども、気泡が多くなってくるとその影響を受けて反射のレベルは極端に低下し、記録上では消滅してしまう。これに対し 600 kHz は、反射レベルの安定度は 200 kHz より低いけれども、気泡の影響による反射の消滅はほとんど認められない結果が得られた。

一方、図-16~18 は上記 3 周波について、壁面と気泡層からの反射レベルをオシロスコープで測定した結果を、気泡がない場合の壁面反射を 0 dB として相対レベルで示している。横軸には気泡発生器の電極印加電圧をとって気泡量を表わしている。図中の実線は観察された反射レベルの平均的な値を、点線はその変動幅を示している。これより、電気分解で発生した微小気泡では、気泡による減衰、反射とも周波数が高いほど小さくその影

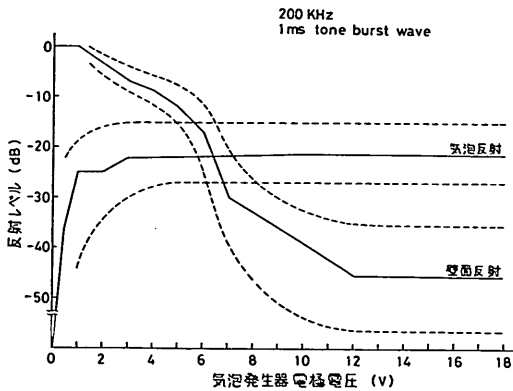


図-16 気泡による音波の減衰と反射 (200 kHz)

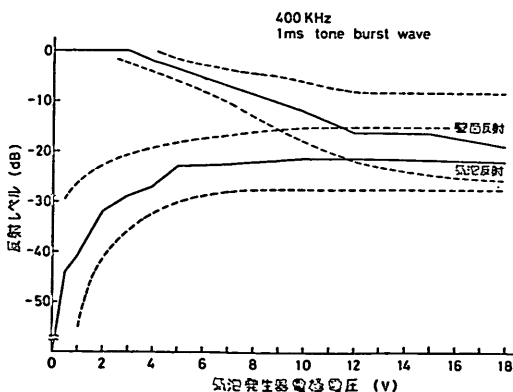


図-17 気泡による音波の減衰と反射 (400 kHz)

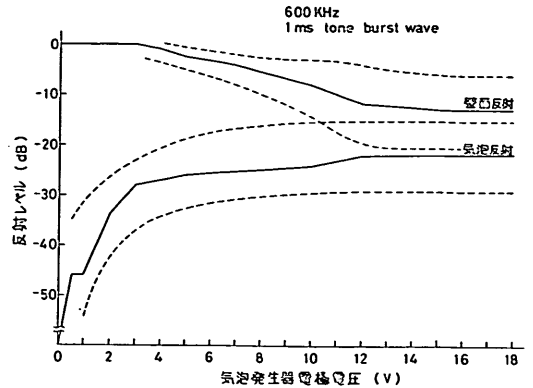


図-18 気泡による音波の減衰と反射 (600 kHz)

響を受けにくいことがわかる。なお、図-15 と比べて壁面反射レベルの変動の様子が多少異なっているが、これは気泡の発生状態が気泡発生器の電極印加電圧に対して常に一定ではなく、実験の都度変動しているためと推察される。また、電極電圧が 10 V 以上で反射レベルの平均値がほぼ一定になっているのは、気泡層での水に対する空気の含有体積が極端に増加したことにより、境界層での振幅反射率が一定となったものと思われる。

実験はこのほかに、気泡として微細な孔を多数あけたパイプに圧縮空気を送って発生させた気泡を用いた実験、実際の海で船外機付ボートを走航させた時に発生する気泡等について行った。減衰・反射のレベルおよび変動はそれぞれ異なった値を示すが、全般的な傾向は電気分解気泡の場合と同様な結果が得られた。

このようなことから高周波音波の採用を考慮し、600 kHz と 200 kHz を用いた改良型波高計による比較実験を現地観測により実施した。その結果、600 kHz の方が効果が認められたけれども、実験室での結果から予想したほどの差は認められなかった。これは実験室と現地での気泡条件の違いもあるが、異なった見方をすればそれだけ改良回路の効果があるともいえる。

一方、実際の現地波高計に 600 kHz を採用する場合には、次のような問題があり、そのための別な対応策が必要となる。

- ① 海水による吸収減衰が 200 kHz より大きい。例えば水深 -50 m の往復伝播では、鉛直方向の吸収減衰の実験式⁹⁾を用いて計算すると 600 kHz は 200 kHz より約 8 dB 程度吸収減衰が大きい。
- ② 測定性能の面から送波の指向性を同じにすると、振動子の径は周波数に逆比例し、600 kHz では 200

kHz の 1/3 となる。したがって、USW のように送受兼用振動子の場合には受音面積の減小に比例して受波感度が低下する。

- ③ 送受波器で得られた受波信号を伝送するケーブルによる信号減衰量は、現用ケーブルの場合 200 kHz より 6~8 dB/km 程度大きい。

これらの損失を補償するための手段として、送波出力を増大する方法は現用 USW ではほぼ限界であって増大は期待できない。また、受信利得を増大する方法も回路の安定度からみて現用増幅度以上は余り期待できない。このように、600 kHz は 200 kHz に比べて損失が大きく、その補償も現用回路の最大値以上は期待できない。特に ① と ③ の損失は今後増加するであろう大水深、長距離伝送への適用を制限する。したがって、600 kHz の採用に当っては新しい対応策が必要となる。損失が小さい場合には特に制約はないが、機器の汎用性を考えて当面は 200 kHz によるものとした。

4. 改良型波高計の回路とその性能

4.1 APC 回路

波高計により測定された海面エコー S のレベルは、海面反射条件および伝播媒質の性状が変化することにより測定の繰返し（海面のサンプリング）ごとに変動する、現地波高計での実測によれば S の最大値 S_{max} と最小値 S_{min} のレベル差は、最大で約 80 dB であった。したがって、入力信号をひずみなく有効に活用するためには、受信回路は最低 80 dB のダイナミックレンジを必要とする。これに対して現用回路の実効的なダイナミックレンジは約 50 dB であり、所要の値に対して約 30 dB 不足である。このため回路各部の増幅度の設定によっては、受波信号のレベルが大きい場合に信号は回路の飽和レベルを超え、出力信号は図-19 に示すように頭の部分がクリップされた形となり、 S/N の低下を生じる。またこれを避けようとして回路の増幅度を下げると、受波信号が小さい場合に信号は検知されないことになる。

この回路は、3.1 で述べた PC 方式における振動子励振電圧の調節を、受信した反射信号の大きさに応じて自動制御し、送信パルスのパワーを約 30 dB の範囲で調節するものである。これにより不足する 30 dB のダイナミックレンジを実効的に補うもので、その効果は図-19 に示すように海面反射強度が大きい場合、海面エコーパルスが受信回路で飽和して S/N が低下することのないように働くものである。

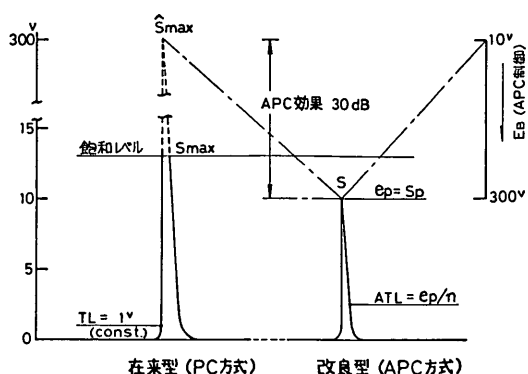


図-19 APC の基本的機能説明図

回路は図-20 に示すブロックで構成されており、その動作は同図の ①~⑦ に示す波形変換を経て行われる。この回路は音波の送・受波系を含めてフィードバック回路を構成しており、そのダイナミックな特性は過大な海面エコーによる信号の飽和を防止するとともに、音波の伝播・反射特性による受波レベルの変動を補償して、略一定レベルの受波信号が得られるものであることが要求される。APC 回路では、繰返し測定ごとの受波信号のピーク値を検出して積分回路により逐次その時間平均を求め、この値と飽和レベルより下にとった基準電圧を比較し、その差分に応じて振動子励振電圧を制御することにより略一定の受波信号を得ている。

受波信号の時間平均を求めるための積分回路の時定数は、基本的には海面状態とそれによる音波の海面反射レベルの変動特性にもとづいて決められるものであるけれども、実験では種々の海面条件について時定数を変えて測定した結果、約 10 秒程度で良い動作が得られている。

このほかに、回路の動作特性として重要なのは、振動子励振電圧 E_B が比較回路の出力に比例して 30 dB 変化すること、および E_B の変化に比例した送波出力が得られることである。改良型波高計を用いた実験によれば、その特性は図-21 および図-22 のように求められた。図-21 は積分回路の出力と比較回路の出力電圧およびそれにより制御された E_B の関係を示している。APC により制御された E_B は約 7 V~300 V まで直線的に変化しており、設計値を満足する結果が得られた。実際の観測での E_B の変化状態を写真-2 に示す。また、 E_B と音波出力（ここでは受波電圧で測定している）の関係は図-22 に示すように少し曲っているが、実用上は直線とみて差支えないであろう。なお、図-22 は水槽実験より

超音波式波高計の改良とその効果について

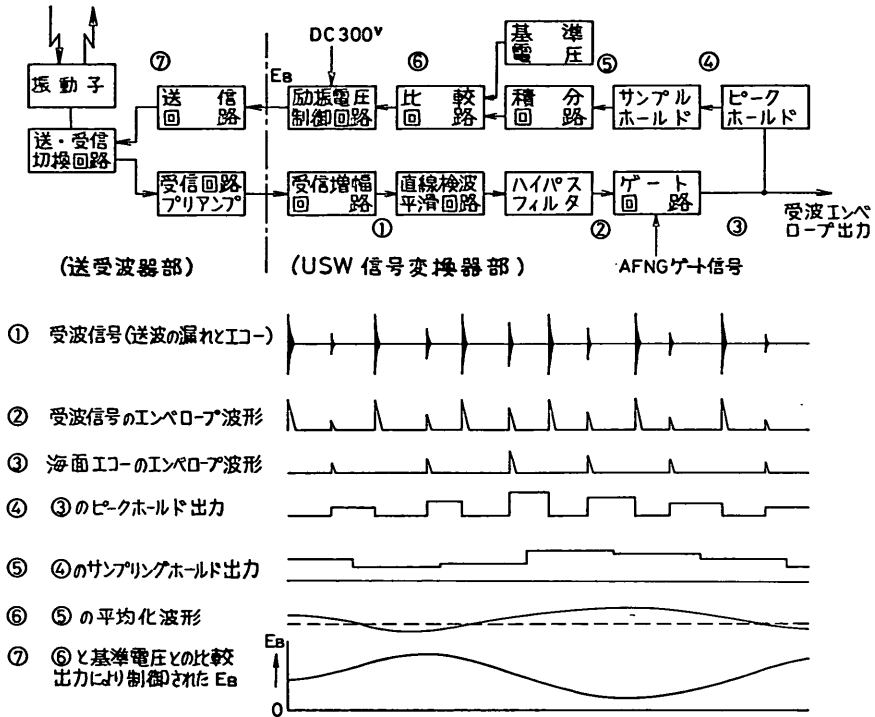


図-20 APC 回路と動作波形

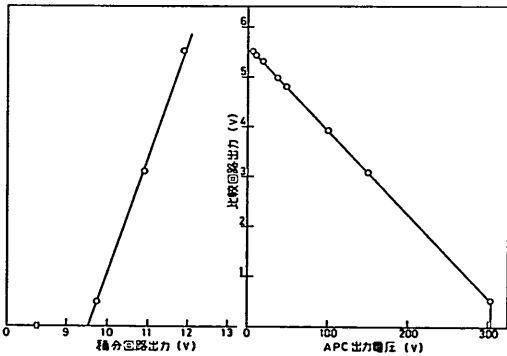


図-21 APC 回路の特性



写真-2 APC で制御された E_B

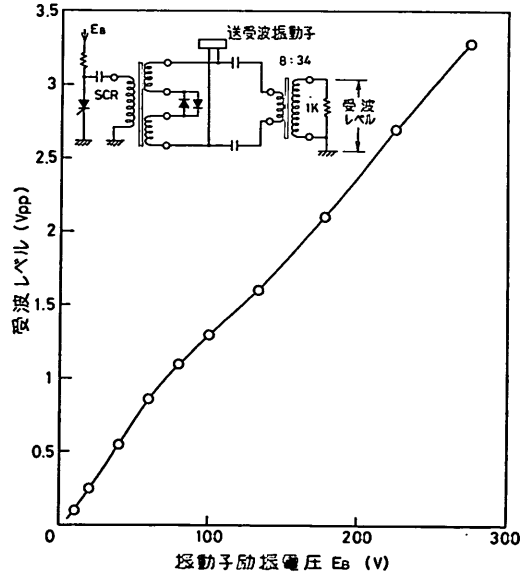


図-22 励振電圧と受波レベルの関係

求めたもので実験要領は 図-14 と同じである。

4.2 ATL 回路

この回路は、改良方式における海面エコーパルスの後

面エッジの立下り検出を具体化したもので、APC を通して入力された受波信号を、ゲート回路を通すことによりゲートが機能する範囲の信号をとり出し、そこに含まれる信号のピーク値 e_p をホールドし、トリガレベル ATL を

$$ATL = \frac{e_p}{n} \quad (n: \text{分圧比})$$

として自動的に逐次設定し、この ATL とゲート通過信号を比較して一番最後に ATL レベルと一致した信号パルスの後面エッジの立下り点を求め、この点をサンプリングすることにより海面波形（水位）を測定するものである。図-23 に各種の受波信号について、 ATL の効果を在来の固定トリガ方式 TL との比較で模式的に示す。

図-23 に示す (1)~(8) の各信号について、改良型と

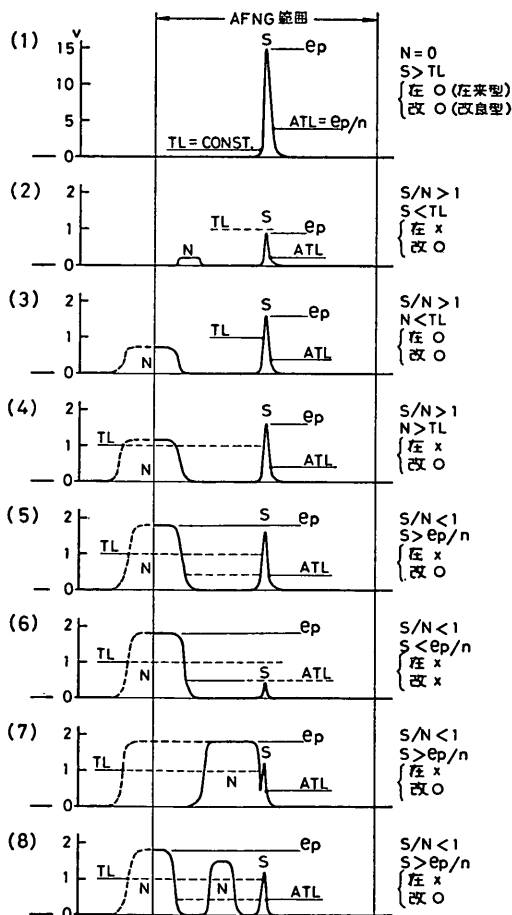


図-23 受波信号と ATL の効果

在来型の測定の可、不可は各波形の右側に \circ , \times で示した。なお、(5)~(8) では e_p として雑音 N のピークが設定され、 $S < e_p/n$ である (6) の場合は S は検知されず、 N の後面エッジが検出されることになり正しい海面測定が行われない。(5) および (8) の場合も N の後面エッジが検出されるが、この場合は一番最後に e_p/n と一致した S の後面エッジが測定し検出点とされる。

このように、 ATL 方式は受波信号自身のレベルに応じて自動的にトリガレベルを可変設定するもので、大入力から小入力まで波形上のほぼ相似の位置でトリガされる。したがって、雑音反射の影響を受けることが少ないと同時に、測定範囲の拡大と一様な測定精度が確保されることになる。

回路は図-24 に示すブロックで構成されており、その動作は同図 ①~⑥ までの波形図によって説明される。ここで分圧比 n は、反射信号がどのような形態をもつかによって異なるが、実験では 4 程度で良い結果を得ている。 n をあまり大きくすると顕著な残響があった場合には、これを検知して誤動作することがある。写真-3 に受波信号とそのエンベロープ、写真-4 に受波信号とそのピークホールトなどの様子を示す。いずれも現地で観測されたものである。

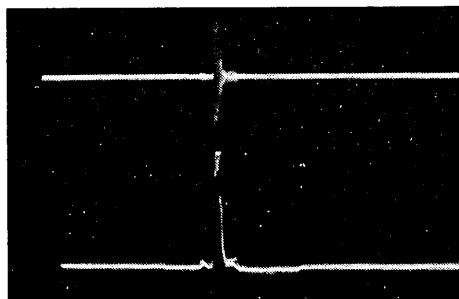


写真-3 受波信号とそのエンベロープ

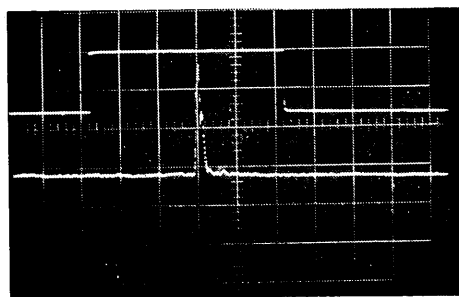


写真-4 受波のエンベロープと AFNG の範囲

超音波式波高計の改良とその効果について

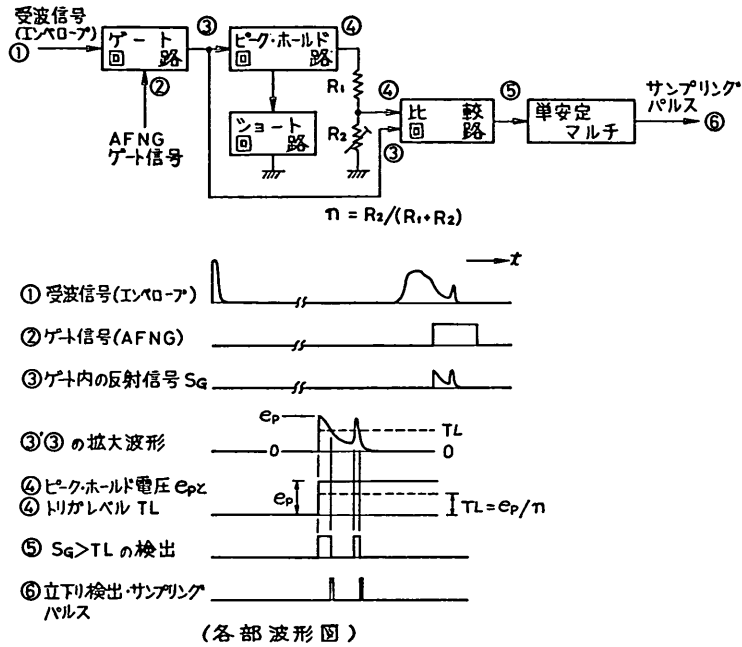


図-24 ATL 回路と動作波形

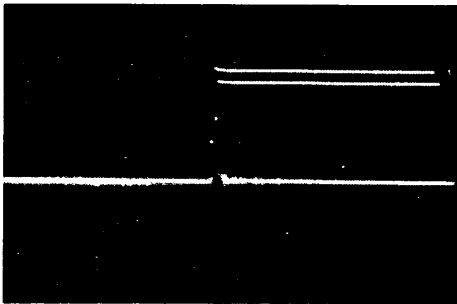


写真-5 受波信号とそのピークホールド

4.3 測定機能

改良回路の機能を確認するため、改良型と在来型の波高計を同時に動作させて波形を記録して比較した。

図-25 は、ATL の機能を確認するため、酒田港 -20 m 水深に設置された在来型波高計の送受波器で得られた混合型異常波形が発生したときの受波信号を、交流パルスの形のままデータレコーダに記録し、これを再生して在来機並びに ATL に機能をもった改良型実験機の波高計回路に同時に入力し、波形記録を再現したものである。記録にみられるように、在来型では欠測している波

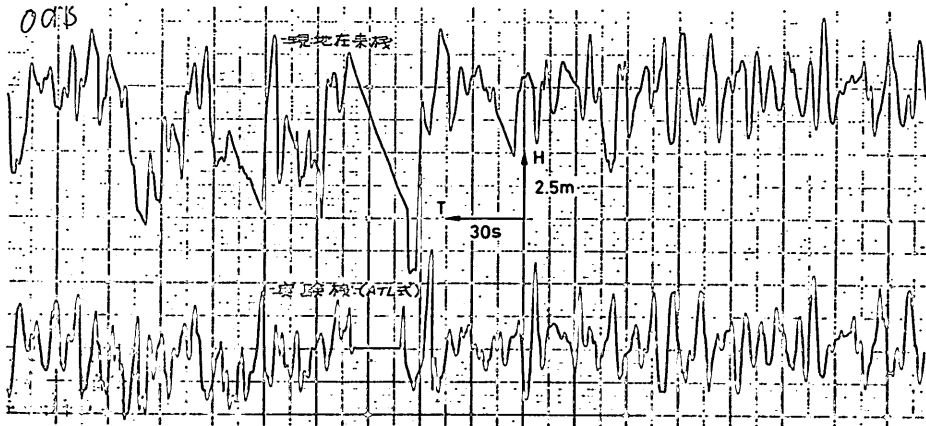


図-25 改良方式 (ATL) と在来型の同時記録

形記録が改良型実験機ではほぼ正常に記録されており、ATL回路が効果的に働いていることが示されている。

次に、図-26 は APC と ATL の両回路を備えた改良型実験機と現地在来機による同地点での同時記録である。ここでは、機能を確認するための方法として入力受波信号をアッテネータで段階的に減衰させ、その時々波形を記録した。この例では、在来機は -30 dB の減衰で異常波形記録となっているけれども、改良型実験機では -60 dB 以上の減衰でも正常な波形記録が得られて

おり、兩回路の機能が効果的に動作していることが確認された。

また図-27 は、別な場所で上記の方法と同じように入力信号をアッテネータにより 3 dB ステップで減衰させて記録したもので、波形は上段より対数増幅器を通して記録した測定線返しごとの受波信号（フルスケール 15 V ）、APC で制御された E_B 、改良型実験機による測定海面波形、在来機による測定海面波形となっている。ただし、減衰度 $0\sim-18\text{ dB}$ までの測定海面波形は省略し

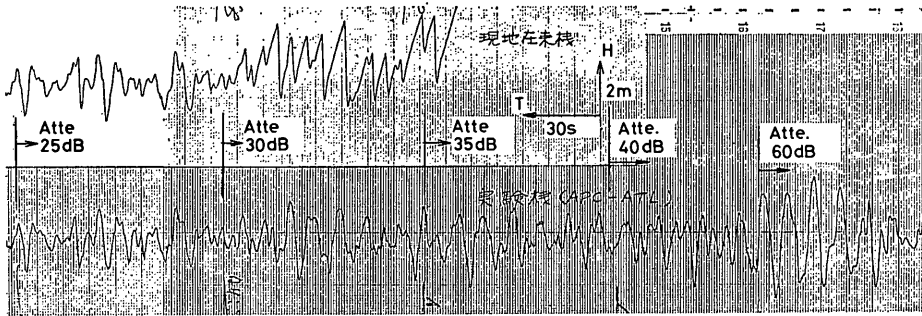


図-26 改良方式 (APC+ATL) と在来型の同時記録

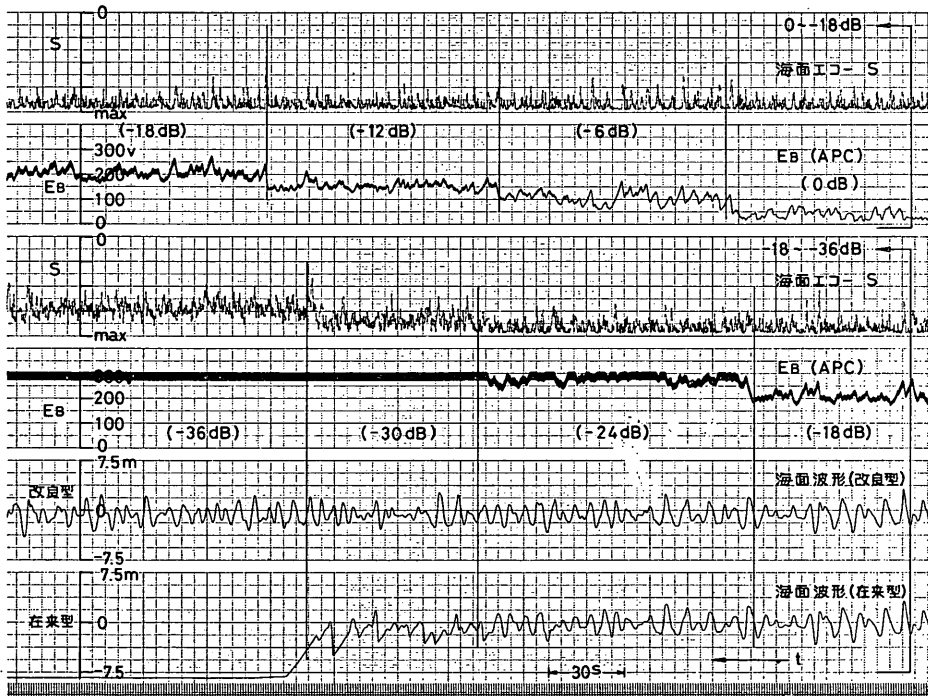


図-27 改良方式 (APC+ATL) と在来型の同時記録

超音波式波高計の改良とその効果について

である。図にみられるように E_B は 30 dB の範囲で動作しており、その間の受波信号はほぼ安定しているところからみて、APC は効果的に動作していることが確認できる。また、測定された波形については、図-26 とほぼ同様の結果が得られている。

5. 在来型と改良型の比較観測とその結果

5.1 現地実験の機器構成

改良効果を検証するため、在来型と改良型の波高計を併置して比較観測実験を行った。実験は、運輸省第一港湾建設局酒田港工事事務所波浪観測施設および同局新潟調査設計事務所所管の佐渡弾崎沖波浪観測施設を使用して行った。前者は水深 -20 m の観測であり、後者は水深 -50 m の観測である。

(1) 酒田港沖水深 -20 m における実験

酒田港における実験は、昭和 52 年度より 55 年度にわたって各年度とも冬期風浪の期間に実施した。実験は酒田港北海浜沖水深 -20 m 地点に設置された現用 200 kHz の送受波器に 600 kHz の送受波器を併置し、図-28 に示す機器構成で行った。なお、送受波器設置高さは海底より 1.4 m である。

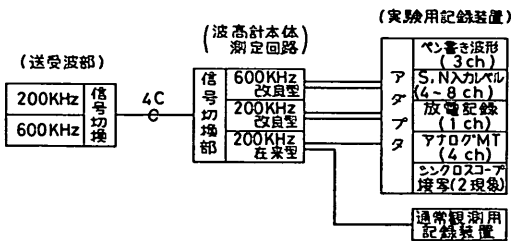


図-28 実験装置の構成 (酒田港沖観測)

測定点の海中に設置した2周波の送受波器と陸上に設置した200 kHz 在来型波高計、200 kHz 改良型波高計、600 kHz 改良型波高計の3種類の本体(信号変換電気回路部)を1条の4芯ケーブルで接続し、送受波器部および陸上の信号切替回路でそれぞれの信号系を分離し、さらに、各周波数および回路方式間の干渉をさけるために海面水位の測定を時分割で順次くり返す方法を採用した。測定のくり返しは各回路方式について毎秒3回とした。改良型はAPCとATLの機能を有する200 kHz、600 kHzの2種類で、200 kHzの送受波器は現用在来型と共用になっている。なお、54年度は200 kHzのみとした。

改良型回路のATLレベルは、測定ゲート(AFNG)内信号のピーク値の-12 dB (1/4)、APCの時定数は11秒、AFNGゲート時間は±3 ms、(往復伝播であるから水位にして±2.25 m)とした。また、改良型実験機のアンプゲインは200 kHzは99 dB、600 kHzは121 dBとした。なお、測定は通常2時間ごと20分間の自動観測により行い、波浪の状況に応じて随時、受波信号の性状および回路の応動等を観察・測定した。

各年度ごとの実験のうち、52年度はほぼ順調にデータが取得できたけれども、53年度は船舶によるケーブル切断事故により目的としたデータが得られず、また54年度は、顕著な波浪がみられなかったため改良効果を検討するに足るデータが得られなかった。55年度は、回路各部の定数変更による機能の確認などを主体とした補足観測を実施した。

(2) 佐渡弾崎沖 -50 m 水深における実験

佐渡弾崎における実験は、昭和53年度~55年度にわたって各年度とも冬期風浪の期間実施した。実験は佐渡弾崎沖水深 -50 m に設置された現用200 kHzの送受波器を利用し、図-29 に示す機器構成で行った。送受波器の設置高さは海底より1.2 mである。

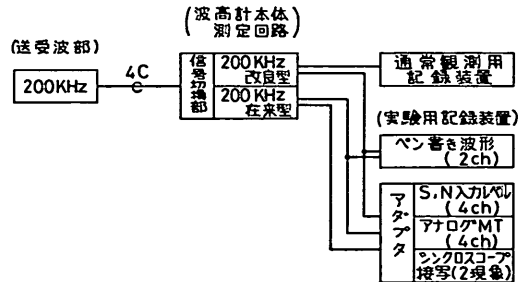


図-29 実験装置の構成 (佐渡弾崎沖観測)

実験は酒田港の場合とほぼ同様の要領で行った。ただし、波高計は200 kHz だけである。実験回路の接続は、陸上観測所に設置した現用波高計(改良型)本体と送受波器の間に信号切替器を挿入し、これを介して実験用波高計(在来型)本体を接続した。そのほかの実験条件、測定方法等は酒田港の場合と同じである。

5.2 異常波形の比較例

(1) 航行船舶の発生するウェーキによる異常波形

船舶が発生したウェーキが波高計送受波器の直上を漂流すると、その境界層において音波の一部が反射し、測定信号系上、海面エコーの前に雑音反射となって現われ、

そのレベルがトリガレベルを超えて AFNG 範囲（実験では在来型は 1 回前の測定水面下 2.25 m, 改良型では ± 2.25 m）に入力された場合には、海面エコーと誤認して異常波形が記録される。

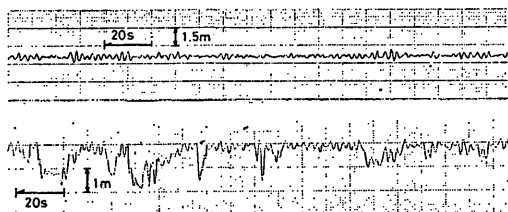


図-30 船舶ウェーキ型 (上: 改良型, 下: 在来型)

図-30 はこのような場合の記録例である。一見してわかるように、在来型に見られる異常波形は改良型には全く現われておらず、確認した 30 の比較例の範囲ではこの種の原因による測定障害に対しては、改良型は 100% の補償効果を示している。

(2) 気泡追従型異常波形

図-31 (a) に示す在来型の記録に認められる異常波形は、波によって海中に巻き込まれた気泡群が形成する境

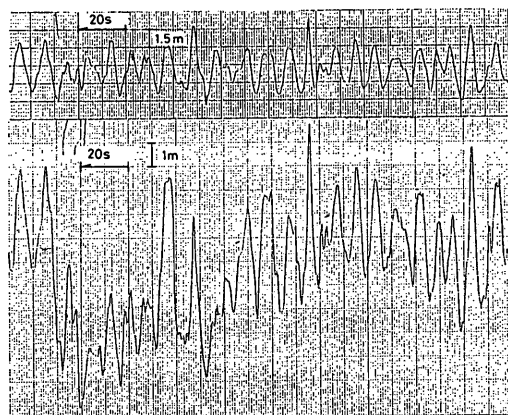


図-31 (a) 気泡追従型波形記録 (上: 改良型, 下: 在来型)

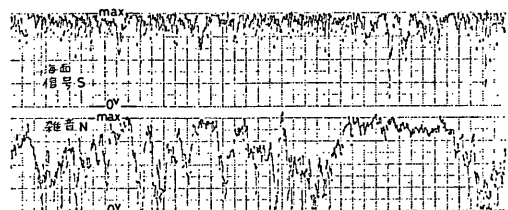


図-31 (b) 海面反射と雑音反射のレベル (200 kHz)

界層からの雑音反射に原因するものと考えられる。この場合の記録は、気泡群が波によって動揺するため海面波形に似た変動を示し、一見、海面が下がったような形で記録される。これを気泡追従型異常波形と呼んである。

図-31 (a) の記録波形はこのような場合の改良型と在来型の同時記録例である。図に見られるように在来型では異常波形となっているけれども、改良型では正常と認められる波形が描かれている。図-31 (b) は、上記記録取得時の測定ゲート (AFNG) 内の受信信号 S と測定ゲート前面までの受信信号 (雑音反射) N の繰返しごとの受信レベルのピーク値を、対数増幅器を通して記録したものであり、図-31 (a) と対比して見ると解るように $S/N < 1$ であっても改良型は正常な波形を記録しており、改良回路方式はこのような場合に有効に機能しているといえる。

しかしながら、気泡層での音波の減衰がさらに大きくなると、測定回路の利得との関係から改良型でも忠実な海面検知ができなくなり、図-32 に示すように改良型回

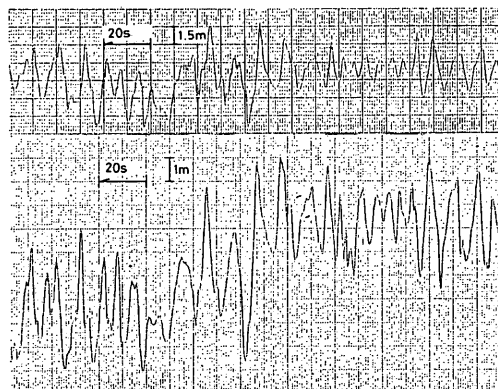


図-32 気泡追従型波形記録 (上: 改良型, 下: 在来型)

路でも測定障害を完全に補償することが困難な例も見受けられた。この例のような場合、改良型は気泡層からの反射の後面検知、あるいはまた、海面付近での残響の影響を受け、記録に見られるように波の山側が尖鋭化された波形を生じる。

(3) 信号抜け型異常波形

音波が気泡層等の影響を受けて吸収、散乱などにより著しく減衰すると、有効なレベルを有する海面エコーが得られなくなり、信号抜け型の異常波形記録が出現する。なお、この有効なレベルは、在来型では飽和レベルが約 14 V の回路において一定トリガレベル 1 V また

超音波式波高計の改良とその効果について

は 2 V 以下、改良型 ATL 回路では APC 制御比較回路の基準電圧約 10 V に対して 50 mV 以下となっている。

図-33 はこのような場合の改良型と在来型の同時記録例である。この例では改良回路が有効に機能しているものと判断される。しかし、改良型の回路でも音波が伝播経路下で極端な減衰を受け、海面エコーのレベルが上述のトリガレベルよりも小さくなるような場合には、改良型でも完全に補償することは不可能となる。図-34 はこのような場合の記録例である。

このような極端な音波の減衰現象は、海中に多量に混在する気泡等による音波の吸収、散乱が主要因であるけれども、気泡以外に波によって海底から巻きあげられた浮遊土砂も主要因の一つとして無視できない。事実、今

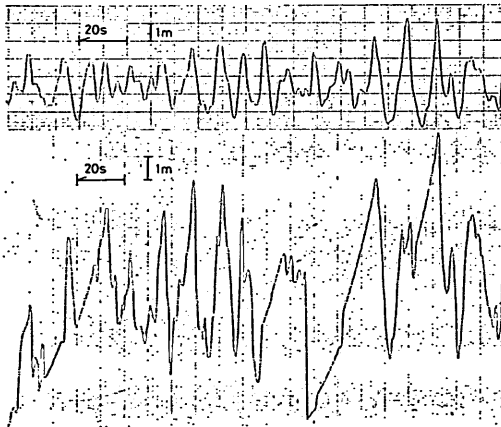


図-33 信号抜け型波形記録（上：改良型，下：在来型）

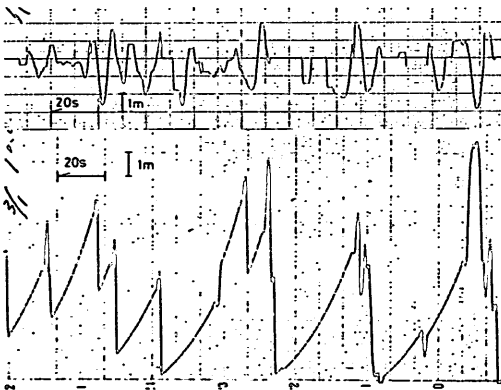


図-34 信号抜け型波形記録（上：改良型，下：在来型）

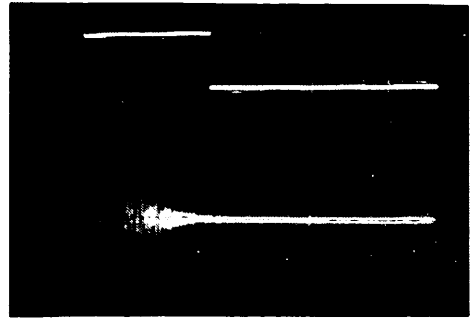


写真-6 受信信号 (200 kHz)
V=5 V/div., H=5 ms/div.

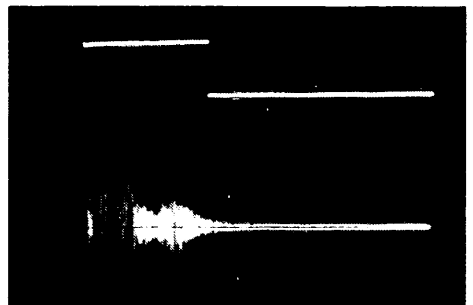


写真-7 受信信号 (200 kHz)
V=5 V/div., H=5 ms/div.

回の実験では浮遊土砂によると思われる高レベルの音波の反射を観測している。写真-6 および 7 は、このような場合の受信信号の状況をオシロスコープで観察したもので、音波の発信直後すなわち送受波器直上にいずれも極めて大きな反射レベルが見られる。写真-6 ではそれ以後の信号レベルはほとんど一様に冪に近く、写真-7 では送受波器直上の大きな反射のほか海面に近いところに気泡によるものと思われる反射も見られるけれども、いずれの場合も海面エコーは見当らない。映像に現われた反射信号の位置関係と反射レベルの異常な大きさおよび現象の時間経過からみて、送受波器直上の反射信号は海底から巻きあげられた浮遊土砂によるものであり、それによって海面エコーの取得を不能とするまでに音波の減衰を来たことが改良機においても異常波形を引き起している原因の一つであると推察される。

(4) 混合型異常波形

この型の異常波形は、気泡追従型と信号抜け型が出現する要因が同時に存在する場合に見られるものである。図-35 はこのような状態が出現した場合の改良型と在来型の同時記録例である。この場合の改良効果は、気泡追従型と信号抜け型を合せたものとなるけれども、この現

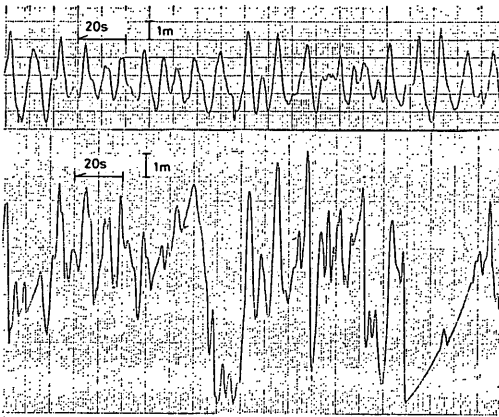


図-35 混合型波形記録 (上: 改良型, 下: 在来型)

象による異常波形が完全に補償できない場合には、改良型では信号抜け型異常波形に移行する傾向が強い。このことは、改良方式における ATL の機能と受波信号の関係からみて当然のことではあるけれども、別な見方をすれば立下り検出方式と ATL の機能が効果的に働いているといえる。

前節の場合を含めて、改良型では海面エコーが検知されないときには、波形記録はその直前の測定値で直線を描き、さらにエコーが連続して数回以上検知されなかった場合には、記録は自動的に電気的零位（通常は記録紙上の中心位置）に復帰し、次にエコーが検知されるまで直線を描く。したがって、在来型のような鋸歯状波とはならない。このことは、改良型波高計の記録を整理する際、波形の良否を判断する上で注意すべきことである。と同時に、改良型を使用する場合、測定点の平均水深が記録紙上の中心付近になるようにセットすることが大切である。これは、ゲート回路 (AFNG) の範囲が波形出力を略中心として設定されるので、偏った位置設定をすると信号の欠測が継続してあった場合、次に海面エコーがあってもそれが AFNG の範囲内にくる機会が少なくなってしまうからである。

5.3 測定回路の改良効果

改良効果をどのような判定基準で評価すべきかは論議の分れるところではあるけれども、取得データ利用者の実用的立場で改良効果を検討することとして、酒田港における 52 年 9 月から 53 年 3 月までに得られた 2 時間ごと 20 分間の同時観測記録から異常波形記録が出現したものを抽出し、これを測定障害原因ごとに区分し、さらに測定障害発生時の延長の程度に応じて

- A: 1 回の観測記録中に含まれる異常波形 10% 以下
- B: 同じく 10~30%
- C: 同じく 30~60%
- D: 同じく 60% 以上

の 4 段階に区分し、波高およびその時々波形勾配 H/L または 10 分間平均風速 \bar{V} と対応する発生度数を求めたものを表-3 (a), (b) に示す。

表にみられるように、総体的改良効果は約 90%、また波高 $H_{1/3}=5$ m 以下の場合には、そのとき観測された $H/L < 0.06$, $\bar{V} < 20$ m/s の範囲で在来型における 82 例の測定障害のすべてが正常な記録に改善されている。特に、データ整理が不能ないしは問題となる測定障害 C, D の場合には、在来型における 26 例が 2 例にとどまり、著しい効果を示している。しかし、C, D 項に該当する測定障害がなお各 1 例発生しており、その時の波浪および風の条件が最大級であったとはいえ、さらに改善の必要があることを示唆しているものと思われる。

また表-3 のいくつかの欄で、在来型に発生度数がなく、括弧で示した改良型にあるのは、改良効果によって重度の障害または別な要因から移行してきたものである。また、 $H_{1/3}=6$ m 以上、要因Ⅲの場合、障害発生度数だけでみると改良効果がそれほどみられない結果となるけれども、データ活用上の実用性からみて A, B の場合には、処理上の精度にやや問題があるにしても異常波形の部分を除外して有義波処理が可能な程度であるので、これを改良とみれば相当の効果とみることができるであろう。

C, D の障害を発生したときの波浪はいずれも $H/L = 0.041 \sim 0.050$ 、在来型では $H_{1/3} > 5$ m, \bar{V} の大部分が 15 m/s 以上で発生しており、改良型では $H_{1/3} > 6$ m, \bar{V} 20 m/s 以上で発生している。また、これらの時の測定値には H_{\max} 9.31 m, 9.11 m 以下 8 m 以上のものが多数含まれているが、 $H_{\max}/H_{1/3}$ は 1.3~1.5 と比較的小さい。これは本来あるべき H_{\max} が測定障害により消去されたことによるものであって、実際にはもっと大きい波が存在していたのではないかと推察される。

一方、佐渡弾崎沖 -50 m 水深での 54 年 12 月~55 年 3 月までの 1,300 例の比較観測記録によれば、在来型では上記 C, D に該当する測定障害が 10 回発生しているのに対し、改良型では A, B に該当するものが 3 例と改善されている。また、異常波形の型式でみると、在来型にみられる信号抜け型と混合型に含まれる信号抜け現象が改良型では相当改善されている。このことは、5.2 (4) で

超音波式波高計の改良とその効果について

表-3 (a) 異常波形記録の発生度数 (H/L)

要因 H/L 程度 $(\times 10^{-1})$		I (信号抜け)				II (気泡追従)				III (I, II混合)				IV (航行船舶その他)				小計
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	
5.0 以下	<0.30					2								6		1		9
	0.31~0.40	1				11	10	2	1	1	1			16	4			47
	0.41~0.50	1				6	8			2	1	3		2				23
	0.51~0.60						2	1										3
5.1~6.0	<0.30																	1
	0.31~0.40												1					14 (5)
	0.41~0.50	(1)	2	1		(1)		1	3	(1)	1(2)	2	3	1				
	0.51~0.60																	
6.1 以上	<0.30																	1
	0.31~0.40	(1)											1					6 (6)
	0.41~0.50									(1)	(2)	1(1)	5(1)					
	0.51~0.60																	
計		2(2)	2	1		19(1)	20	4	4	3(2)	3(4)	6(1)	10(1)	25	4	1		104 (11)

(注) 1) 括弧内は改良型の場合を示す。

2) A~D の記号は異常波形の割合がそれぞれ 10% 以下, 10~30%, 30~60% および 60% 以上を示す。

表-3 (b) 異常波形記録の発生度数 (\bar{V})

要回 \bar{V} 程度 (m/s)		I (信号抜け)				II (気泡追従)				III (I, II混合)				IV (航行船舶その他)				小計
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	
5.0 以下	<5.0					1								1				2
	5.1~10.0					2	2				1			15	2			22
	10.1~15.0	2				16	12	1	1	1	1	1		8	2	1		46
	15.1~20.0						6	2		2		2						12
5.1~6.0	<5.0																	
	5.0~10.0																	8 (1)
	10.1~15.0		2	1				1	2		(1)		1	1				6 (3)
	15.1~20.0	(1)				(1)			1	(1)	1	2	2					1 (1)
6.1 以上	<5.0																	
	5.1~10.0																	
	10.1~15.0																	
	15.1~20.0	(1)								(1)	(2)	1	2					3 (2)
20.1<											(1)	4(1)					4 (4)	
計		2(2)	2	1		19(1)	20	4	4	3(2)	3(4)	6(1)	10(1)	25	4	1		104 (11)

(注) 1) 括弧内は改良型の場合を示す。

2) A~D の記号は異常波形の割合がそれぞれ 10% 以下, 10~30%, 30~60% および 60% 以上を示す。

説明したように改良方式の効果を示しているが、異常波形の発生要因の面からみれば、大水深 ($h=50$ m) 域では浅海域での砕波による大量気泡の混入あるいは海底土砂の舞上りといった現象がないので、音波は著しい減衰を受けることがなく、在来型では異常波形を生じることがあっても、改良型には十分なレベルをもった海面エコーが得られているものといえる。

6. あとがき

この報告は、水中発射型の超音波式波高計に見られる異常波形の発生原因を、超音波パルスの海面反射信号と水中に混在する気泡等の影響による雑音反射の介入および減衰効果を中心に、現地実測により総括的に実態を把握し、その成果をもとにして開発した新しい信号処理方法による改良回路と在来の測定回路について比較検討し、改良効果の有効性を検証したものである。

なお、この報告で取り上げた異常波形記録は、比較的浅い海域 (水深 $h < 20$ m) において強風により波高が急速に発達するような場合に多くみられ、一般に大水深 ($h=50$ m) 海域に設置された波高計では少ないようである。また、異常波形の発生原因は、音波の異常な減衰と反射であるが、それを引き起す主要因は、波によって海中に巻き込まれた気泡と、海底から舞上った浮遊土砂である。

超音波の伝播過程における媒質の性状を、異常波形が発生するような荒天時において定量的に把握することは現実に不可可能である。したがって、試行錯誤によって得られたこの研究結果を、従来の理論的、実験室的研究成果と対応させて普遍的に説明することは困難である。しかし、今回の実験によって得られた結果は、超音波式波高計の開発改良に役立ったばかりでなく、水中超音波を取扱う分野における興味あるデータを提供するのではないかと思われる。

さらに今回の改良回路の実用化は、波高計の汎用的な性能向上に寄与するほか、従来、受信レベルの変動が大きく現地用の測定には不向とされていた高周波超音波の使用と信号伝送方式の改良により、さらに測定性能の向上をはかり得る可能性を示唆している。

改良回路方式による波高計の改良効果については、効果判定方法の是非は別として、以下のように考察される。

一般にこの種の改良効果を定量的に表わすことは難しいが、総体的には在来機における測定障害発生頻度の約 90% は改善されており、特に航行船舶のウェーキや風

による波頭の崩れにともなう海面付近の気泡の混入に対しては、ほぼ 100% の補償効果が得られていると思われる。しかしながら、最悪な環境条件と思われる観測時には、時としてなお決定的ともいえる測定障害の発生がみられ、このような事態の発生要因が従来より考えられてきた大規模な気泡の混入のほか、海底から舞上った多量の土砂によるものであろうと推定される現象が無視し難い一因をなしていることが発見された。この事実は、砕波の影響が海底付近まで顕著に及ぶような浅海域において USW を使用する場合、改めて留意・改善すべき問題点を提起しているものと思われる。

この研究において得られた研究成果の多くは、多年にわたる現地観測実験により実証されたものであり、現地観測の実施にあたっては運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所、同酒田港工事事務所の関係各位に長年にわたって多大の御協力をいただいた。記して深く感謝申し上げます。また、現地観測および取得記録の解析作業にあたっては海象観測研究室菅原一晃技官、立花裕二技官の協力を得た。

なお、この研究は、当所と (財) 日本気象協会ならびに海上電機 (株) の三者による共同研究“波浪観測およびデータ処理解析手法に関する研究”の一環として、海上電機 (株) の協力を得て実施したものである。研究の分担は、測定障害の発生機構・要因の実測および改良特の把握は共同で実施した。また、基本的改善手法の検討および実用性能の評価は主として当所が担当し、波高計回路の実務的設計・製作は共同研究の相手方である海上電機 (株) が実施した。

この研究の実施に当り、共同研究に参画された関係者各位の御尽力に感謝する次第です。

(1981 年 11 月 30 日受付)

参 考 文 献

- 1) 高橋智晴, 佐々木弘, 菅原一晃, 鈴木禧実: 超音波式波高計について, 港湾技術研究所報告, Vol. 12, No. 1, 1973.3, pp. 59~82
- 2) 高橋智晴, 佐々木弘, 金子大二郎: 超音波式波高計 (水中発射型) の特性改良——砕波発生時における測定信号の入力方式について——, 第 23 回海岸工学講演会論文集, 1976.11, pp. 345~350
- 3) 高橋智晴, 佐々木弘, 岩田邦彦, 齊藤 清: 超音波式波高計測定回路の改良と効果, 第 25 回海岸工学講演会論文集, 1978.11, pp. 55~59
- 4) たとえば, 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦: 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, 1960
- 5) 前出文献 4), p. 160

超音波式波高計の改良とその効果について

- 9) 前出文献 4), p. 156
7) 前出文献 1)
8) 高橋智晴, 佐々木弘, 副島 毅, 金子大二郎: 沿岸
大水深海域 (-50 m) における波浪観測の一例につ
いて, 第 21 回海岸工学講演会論文集, 1974.11, pp.
267~270
9) 西村 実: 海洋科学基礎講座, 海洋物理 I, 第 3 章,
東海大学出版会, 1970, p. 52