

超音波式波高計測定回路の改良と効果

高橋 智晴*・佐々木 弘**・岩田 邦彦***・斎藤 清****

1. ま え が き

超音波式波高計水中発射型（通称 USW）は、技術的・経済的に比較的簡便かつ適確に表面波形を測定し得ることを特徴とする標準的な現地観測用波高計として、水深 50 m に及ぶ沿岸海域において多用されている。

USW の測定原理は、一對の送受波器を海中に固定設置し、鉛直上方に向けて発射した超音波パルスが海面で反射して戻るまでの伝播時間を短時間間隔で連続的に測定し、海面水位の時間変化に対応した出力電圧に変換して当該測定点における進行波形記録を得るものである。したがって、送受波器と水面の間に超音波の伝播媒体として介在する水がほぼ一般的な通常の水質であれば測定は正常におこなわれるが、超音波の伝播経路上に音響インピーダンスの異なる物質が存在したり境界層が形成されている場合には、異状な超音波の反射、散乱あるいは音圧の減衰、吸収などの現象を生じ、受波信号には異常な雑音信号の発生、 S/N 比の低下、信号レベルの低下となって現われる。これらの現象があるレベル以上に達すると通常のアナログ記録装置（ペン書き記録器など）によって正常な波形記録を取得することは困難となる。これらのことは音響測深機等が一般に放電破壊式の記録方式を用いていることや、その記録画面などから容易に推察されるであろう。

USW の実用化に際しては、長時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、測定値は水面にフォローした一線上の連続信号のみを抽出して出力・記録する必要がある、当初上記の障害原因として遊泳魚類やそれに類する漂流物を予想し、その防除対策として AFNG 回路を設けて処置することによりペン書き記録を可能とした。しかしながら普及台数の増加と共に多様な環境条件下での使用を経験するに依り、測定記録にしばしば異常波形が現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、測定点付近の航行船舶

のスクリュ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測定信号に欠測や異常反射信号の混入を生じ不良データが発生することで、このような事例は超音波応用機器の特性上不可避のものであり、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、受波信号抜けや水中に巻き込まれた気泡によ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、標準的波高計として汎用的機能を確認するためにはその改良が不可欠とされるにいたった。これらの問題点に対する改善策として、第 23 回海岸工学講演会において筆者らは、砕波時における USW 測定信号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知方式を立下り検出方式に改めるのことの必要有意性ならびにこの新検知方式を実現するために必要な補償回路として、APC（自動出力調整）および ATL（トリガーレベル自動調整）機能を付加した新しい回路構成を提案した。

今回の報告においては上記提案回路による実用化実験機（改良機）を、波浪条件が極めて厳しいと目される酒田港において在来機と併置し、定常観測状態における現地実用化検証を継続実施（昭和 52 年 9 月より）して得られた特徴的なデータ例について紹介する。

2. 改良型回路の概要

波が砕けて海中に気泡を巻込むような条件下での波高計の受波信号は、海面エコー S と気泡その他による雑音反射信号 N で形成される。従来の波高計回路では、この S/N の比が 1 以上であって、かつ S の値が機器回路の動作に必要なトリガーレベルよりも高く、 N の値がトリガーレベルより低いことが正しい測定動作を確保する基本条件となっていた。しかしながら荒天時には、このような条件を常に満足する信号を得ることは難しく、そのため測定記録に異常波形を生じていた。

改良型波高計は、受波信号の S/N 比が 1 以下となる場合でも海面波形の測定を可能にしようとするもので、その基本的な考え方は次の通りである。

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部海象観測研究室長

** 運輸省港湾技術研究所研究員

*** 正会員 運輸省第一港湾建設局酒田港工事事務所（前）所長

**** 運輸省第一港湾建設局建設専門官

受波信号に含まれる気泡等による雑音反射信号 N は測定原理上時間的に常に海面エコー S より前にあり、後側には原則的には生じないはずであるが、実際には海中に存在する気泡等による境界層と海面との間の多重反射、伝播経路上での多重反射等による伝播時間の遅れ、サブロープの影響などによる雑音信号が残る。ただし、海面エコーとの相対的レベルは一般的に低く、また海面からのパルスエコーの立下りは、立上りより幾分裾に広がっているが上部は急峻な形をしている。したがって、海面エコーを回路が飽和しない範囲で充分増幅し、トリガーレベルを測定パルスごとの入力信号の最大値を分圧した値で設定することができれば、気泡等による雑音反射信号の影響を受けることなく、立下り検知方式により在来の検知方式の波高計とほぼ同様の測定精度により海面波形を得ることができる。

この場合、測定精度の確保と測定可能な海面エコー S のレベル範囲を広くとるため、微小な S は充分増幅し、かつ大きな S に対しては回路が飽和しないことが必要となる。改良型では、受信した信号の大きさによって自動的に発射パルスのパワーを調整する APC 回路および測定繰り返しごとの入力反射信号の最大値を基準としたトリガーレベルを自動調節する ATL 回路により補償している。

3. 在来機と改良機の比較観測

在来機と改良機の比較実験のための観測は、運輸省第一港湾建設局酒田港工事事務所波浪観測施設を使用し、水深 -20 m 地点の現用 200 kHz の送受波器に 600 kHz の送受波器を併置して図-1 に示す要領でおこなった。送受波器の設置高さは海底より 1.4 m である。

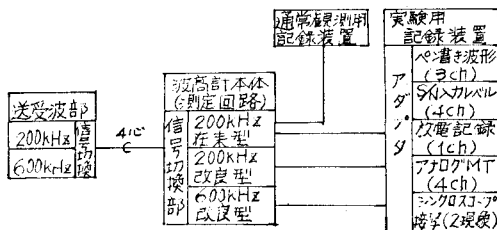


図-1 実験装置の構成

測定点の海中に設置した2周波の送受波器と陸上観測所に設置した200 kHz 在来型波高計、200 kHz 改良型波高計、600 kHz 改良型波高計の三種類の本体（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部の信号切替回路で各々の信号系を分離し、更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。測定の繰り返しは各回路方式について毎秒3回とした。改良型は ATL、APC の機能を有する 200 kHz、600

kHz の二種類で、200 kHz 送受波器部は現用在来型と共用している。改良型回路の ATL レベルは測定ゲート (AFNG) 内信号ピーク値の -12 dB (1/4)、APC 時定数は 11 秒とした。

測定は通常2時間毎、20分間の自動観測によりおこない、波浪の状況に応じて随時受信信号の性状および回路の応動等を観察、測定した。

4. 改良型と在来型による測定記録の比較例

52年9月から53年3月までに取得した改良型と在来型波高計の同時観測記録から抽出した代表的な異常波形記録発生時の比較例を以下に示す。

(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信号となって現れ、そのレベルがトリガーレベルを超えて AFNG 範囲 (実験では在来型は1回前の測定水面下約2m、改良型では約±2m) 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-2 はこのような場合の記録例で、在来型に見られる異常波形は改良型には全く現れず、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改良型は100%の補償効果を示している。

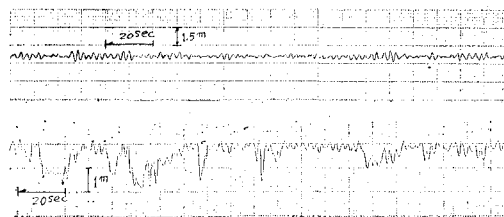
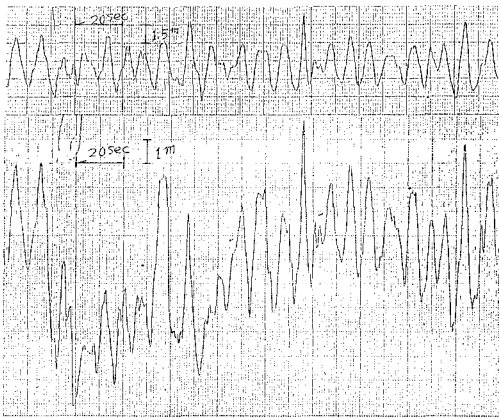


図-2 船舶ウェーキ型（上：改良型、下：在来型）

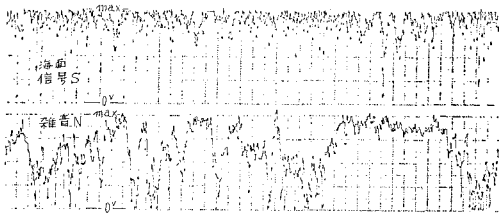
(2) 気泡追従型異常波形

図-3 (a) に示す在来型の異常波形は、波によって海中に巻込まれた気泡群が形成する境界層からの雑音反射信号によ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いる。

図-3 (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、在来型では異常波形となっているが、改良型では正常とみられる波形が描かれている。図-3 (b) は上記記録取得時の測定ゲート (AFNG) 内の受波信号 S と測定ゲート前面までの受波信号 N の繰り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、 $S/N < 1$ でも改良型では正常な海面波形を取得しており、改良回路方式はこの場合有効に機能



(a) 気泡追従型 (上: 改良型, 下: 在来型)



(b) 海面反射信号と雑音反射信号のレベル

図-3

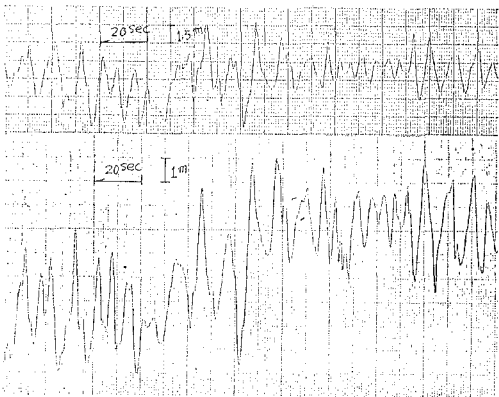


図-4 気泡追従型 (上: 改良型, 下: 在来型)

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-4 に示すごとく、気泡の後面検知、あるいは気泡層と海面の間の多重反射の影響が顕著となり、波の山側が尖鋭化された波形を生じることなど、改良型回路でも測定障害を完全に補償することが困難な場合も見受けられた。

(3) 信号抜け異常波形

気泡層等の影響により音波が著しく減衰を受け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、在来型記録では図-5, 6 に示すような信号抜け型異常波形記

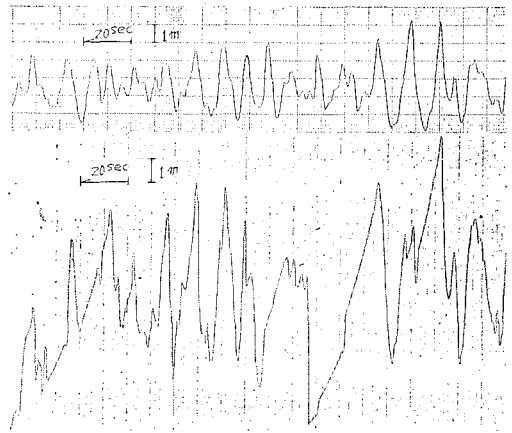


図-5 信号抜け型 (上: 改良型, 下: 在来型)

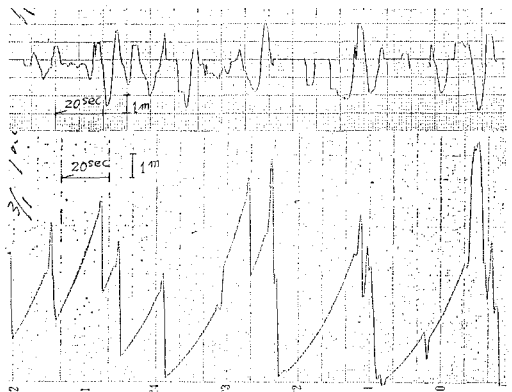


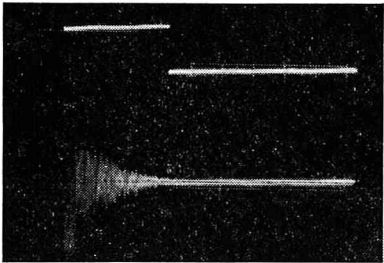
図-6 信号抜け型 (上: 改良型, 下: 在来型)

録が出現する。

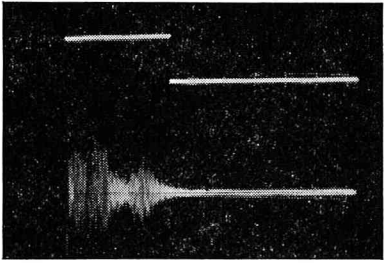
図-5 はこのような場合の改良型と在来型の同時記録例で、改良回路が有効に機能しているものと判断される。

しかし改良型の回路でも音波が伝播経路上で極端な減衰を受け、海面エコーのレベルがトリガーレベルより小さくなるような場合（在来型では一定トリガーレベル 2 V 以下、改良型 ATL 回路では最低 50 mV）には改良型でも完全に補償することは不可能となる。図-6 はこのような場合の記録例を示す。

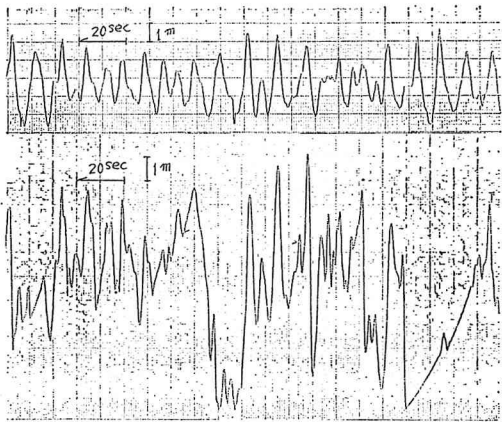
このように極端な音波の減衰現象は、海中に異常に混在する気泡等による音波の散乱、吸収がその主要因であると考えていたが、今回一連の観測実験の結果から気泡以外に波によって海底から巻きあげられた浮遊土砂によるものと思われる音波の反射現象を観測し、それが極端な音波の減衰の主要因の 1 つとして無視し難いものであることを確認した。写真-1 および 2 はこのような場合の受信信号の状況をシンクロスコープで観察したもので、音波の発信直後すなわち送受波器の直上にいずれも極めて大きな反射レベルが見られ、写真-1 ではそれ以後の信号レベルはほとんど一様に 0 に近く、写真-2 で



写真一 反射信号 (200 kHz)
V=5 V/div., H=5 ms/div.



写真二 反射信号 (200 kHz)
V=5 V/div., H=5 ms/div.



図一 混合型 (上: 改良型, 下: 在来型)

は送受波器直上の大きな反射信号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信号も見られるが、いずれの場合も海面エコーは見当らないことを示している。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的経過からみて、送受波器直上の異常反射信号は海底から舞上っ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信号の減衰を来たことが改良機においても信号抜け異常波形を引き起す原因となったものと推察される。

(4) 混合型異常波形

この型の異常波形は、(2) の気泡追従型と (3) の信

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。

図一 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 (2) と (3) を併せたものとなるが、改良型ではこの現象による異常波形が完全に補償できない場合には、信号抜け型の異常波形に移行する傾向が強い。ただし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値で直線を描き、更にエコーが連続して数回以上検知されない場合には記録は自動的に零位 (中心線) に戻り、次にエコーが検知されるまで直線を描くようになっており、在来型のような鋸歯状波とはならない。

5. 改良の効果

改良効果をどのような判定基準で評価するべきかは論議の分れるところであるが、取得データ利用者の実用的立場で改良効果を検討するため、52 年 9 月～53 年 3 月までに得られた 2 時間毎 20 分間の同時観測記録から異

表一 異常波形記録の発生度数

要 因		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
$H_{1/3}$ (m)	H/L ($\times 10^{-1}$)	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																	
	0.31~0.40												1					1
	0.41~0.50	(1)	2	1		(1)		1	3	(1)	1 (2)	2	3	1				14 (5)
	0.51~0.60																	
6.0 以上	<0.30																	
	0.31~0.40												1					1
	0.41~0.50	(1)								(1)	(2)	1 (1)	5 (1)					6 (6)
	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: () 内は改良型の場合を示す。

常波形が出現したものを抽出し、これを測定障害要因ごとに区分し、更に測定障害発生の延長の程度に応じ、A (1回の観測記録中に含まれる異常波形 10% 以下)、B (10~30%)、C (30~60%)、D (60% 以上) の4階級に分け、波高およびその時々風の風速 (U) または H/L と対応する発生度数を求め、表-1 に示す。

表は総体的改良効果が約 90%、また波高 ($H_{1/3}$) 5 m 以下の場合にはその時観測された $H/L < 0.06$ 、風速 < 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の記録に改善されていることを示している。特にデータ整理が不能ないしは問題となる測定障害の程度 C、D の場合には在来型における 26 例が 2 例にとどまり、一応著しい改良効果を示しているが C、D 項に該当する測定障害がなお各 1 例発生し、その時の波浪および風の条件が最大級であったことは更に改善の必要があらうことを示唆しているものと思われる。

C、D の障害を発生した時の波浪はいずれも $H/L = 0.041 \sim 0.050$ 、在来型では $H_{1/3} > 5$ m、風速の大部分は 15 m/s 以上、改良型では $H_{1/3} > 6$ m、風速 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 と比較的小さく、本来あるべき H_{max} が測定障害により消去されているか、不規則波としての碎波限界に達しているための影響と思われる。

6. あとがき

この報告は、昭和 52 年 9 月より 53 年 3 月までの酒田港における冬季波浪を主対象として、在来機と改良機の機能を定常観測状態において比較した結果を紹介したものである。この観測期間の後半においては数回にわたり

顕著な激浪の襲来を受けており、この種の比較実験条件としては極めて厳しく適切な場を得たものといえるであろう。

この種の改良効果を一般定量的に表わすことは困難であるが、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碎波に伴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数回の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が従来障害発生原因と考えてきた大規模な気泡の混入のほか、多量・高密度な土砂の舞い上りであろうと推定される海底付近の異状な現象の発生が無視し難い一因をなしていることが新たに発見された。この事実は碎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超音波式波高計 (水中発射型) 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。

この研究のために必要な現地観測の実施、データの解析、実験装置の試作にあたっては、運輸省第一港湾建設局、港湾技術研究所の他、(財)日本気象協会並びに海上電機(株)、関係各位に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。

参 考 文 献

- 1) 高橋・佐々木、他：超音波式波高計について、港湾技術研究所報告、12 巻、1 号、1973.3.
- 2) 高橋・佐々木・金子：超音波式波高計 (水中発射型) の特性改良、第 23 回海岸工学講演会論文集、pp. 345~350、1970.