

空中発射型超音波式潮位計の開発

永井紀彦*・菅原一晃**・清水康男***
高山俊裕****・小園みちる****

1. はじめに

近年、天文潮位変動の把握に加えて、長期的平均水面上昇のモニタリングや津波・高潮観測などに、潮位観測の目的は拡張しつつある。こうした多様な観測目的に対応して、最も一般的な検潮井戸を設けるフロート式観測に加えて、直接海面の上下変動を計測する空中発射型超音波式波高計を岸壁等の前面に設置する観測事例が増加している。空中発射超音波で水面を測定する方法は、検潮井戸を設ける観測に比べて、設置工事費用が安価であり、かつ、導水管による物理的フィルターの影響を受けないため、周期の比較的短い波浪や津波の監視にも活用できる長所を有している。しかし、超音波の空中伝搬速度は温度や水滴の空中含有量に依存するため、空中発射超音波による観測は、長期間の安定性が要求される平均水面の季節変動や経年変動の検出には、活用することが困難であると考えられてきた。ここに、多段反射板からの反射信号を用いた温度・距離補正による水面測定の精度の検討成果（永井ら, 2000；永井ら, 2001）と、長期安定性の検討成果をとりまとめ、新たに開発を行った空中発射型超音波式潮位計に関して報告する。

2. 空中発射型超音波式潮位計

図-1 に空中発射型超音波式潮位計の基本概念を、表-1 に、空中発射型超音波式潮位計の基本仕様を示すが、空中発射型超音波式潮位計の特徴は、以下の通りである。

2.1 多段反射板による温度補正

アメリカ合州国の NOAA（海洋気象庁）では、潮位観測のための管内の長周期水面変動計測のために一枚の反射板を設けてキャリブレーションを行う手法を開発している（Lennon ら, 1992）。しかし、反射板はなるべく水面近傍に設置することが望ましい反面、波浪や潮汐に

よって水没した反射板からの反射信号は検出できない。このため、反射板を複数設置し、最も水面に近い反射板からの反射信号をもとに距離のキャリブレーションを行うこととした。

2.2 信号レベルの多重化による最適反射信号の採択

受信信号が飽和しない範囲で最大の受信信号感度選択を行うマルチレベル法を開発した。図-2 に反射信号の受信感度の選択の概念を示す（永井ら, 2000）。ここでは、受信感度を 4 段階とし、受信信号が設定された上限値を超える（飽和する）ことを避けた範囲で、最大の感度選

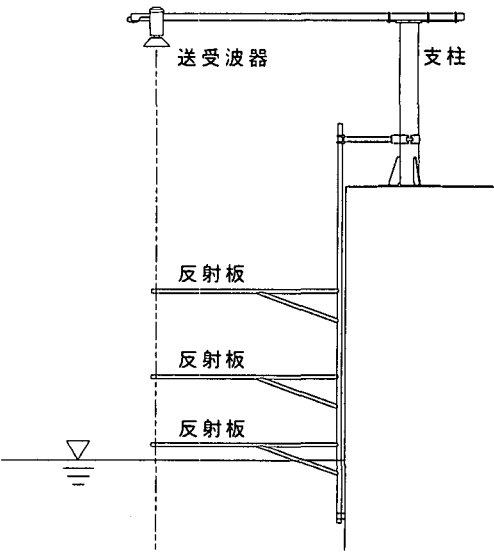


図-1 空中発射型超音波式潮位計

表-1 空中発射型超音波式潮位計

送受信器 検出方法	多段反射板・ゼロアップタイム検出法 マルチレベル法による補正
測定範囲	1~11 m
分解能	1.78 mm/digit
出力	RS-232C, 時刻・潮位
寸法	外径 258 mm, 高さ 540 mm
重量	約 10 kgf (98 N)
反射板形状	直径 48.6 mm 鋼管

* 正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部
海象情報研究室長
** 正会員 (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部
主任研究官
*** 協和商工 常務取締役技術部長
**** 協和商工 技術部

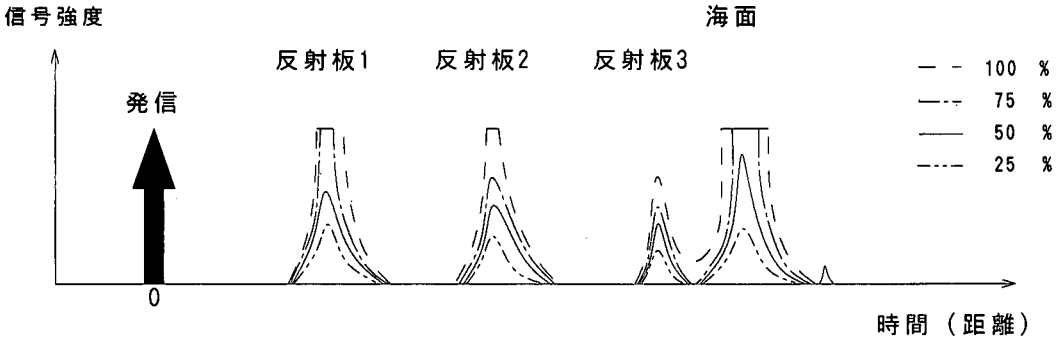


図-2 反射信号の受信感度の選択

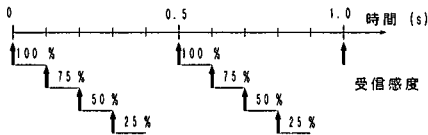


図-3 超音波信号の発信・受信タイムスケジュール

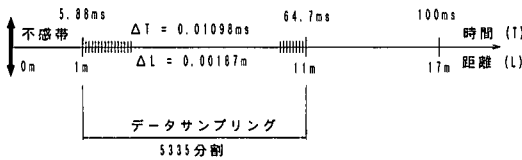


図-4 超音波信号のサンプリングタイムスケジュール

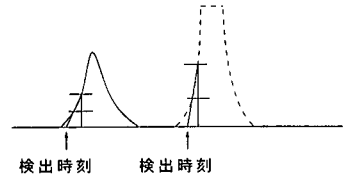


図-5 ゼロアップタイム検出法による反射信号の検出

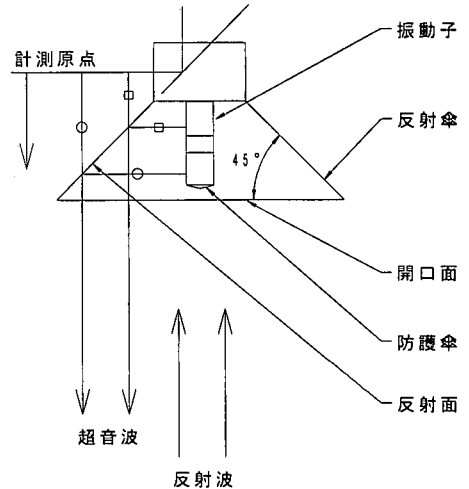


図-6 反射傘による送受波器計測原点の統一

択を行った。

図-3に、超音波信号の発信・受信タイムスケジュールを示す。波浪観測で一般的に採用されている0.5s間隔のデータサンプリングを想定し基本設計を行った。0.5sを0.1s毎に5分割し、送信を0.1s間隔で行い、受信感度を順に変えて4回の観測を繰り返し、残りの0.1sでは、データ処理を行うこととした。

図-4は、0.1sの各観測における超音波反射信号のサンプリングタイムスケジュールを示したものである。サンプリング間隔として設定された0.01098msは、既存のUT-100型空中発射型超音波式波高計で採用されている値であり、A/D変換装置とCPUの速度により定まる最短サンプリング間隔である。超音波信号の空中音速を340m/sとして(実吉ら, 1971)送受波器と反射面との距離に換算した場合、このサンプリング間隔は1.87mmに相当する。

2.3 ゼロアップタイム検出法による受信信号検出

従来の手法(高橋ら, 1982)では、反射超音波信号のピーク値の50%に達した時刻をもって、反射信号の検出時刻としていたが、この検出時刻は最短経路に対応するものではなく測定誤差を生んでいた。このため、図-5に示す、出力信号の大きさが最大値の50%となる時刻と

25%となる時刻を結んだ直線がゼロ線と交わる時刻を最短パルスの検出時刻とするゼロアップタイム検出法を、開発した。

2.4 反射傘を用いた計測原点の設定

空中発射型超音波式潮位計の送受波器となるUT-100型超音波式波高計では、振動子の大きさがあるにもかかわらず、計測原点を同一高さに集中させるために、図-6に示すように、反射傘を用いた計測原点の設定が行われている。



写真-1 送受波器

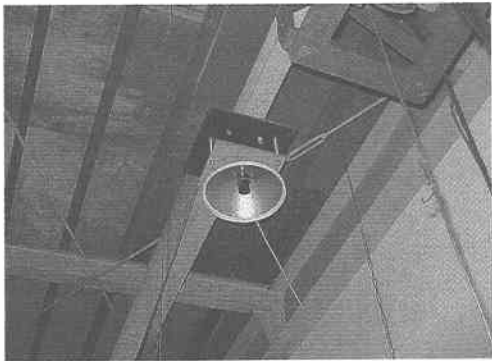


写真-2 室内実験における送受波器の設置状況

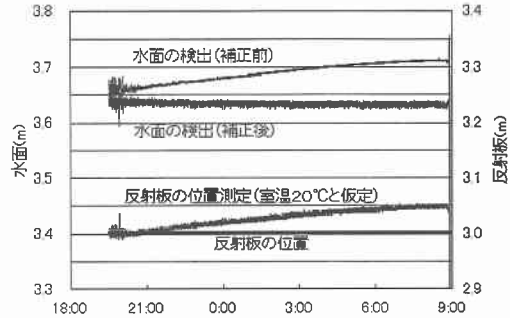


図-7 井戸を用いた室内実験

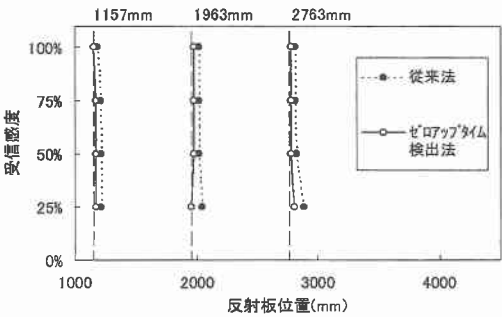


図-8 ゼロアップタイム検出法と従来法との距離検出の比較

表-2 ゼロアップタイム検出法と従来法との距離検出の比較

受信感度	反射板 1 1157 mm				反射板 2 1963 mm				反射板 3 2763 mm			
	従来法	差	ゼロアップタイム検出法	差	従来法	差	ゼロアップタイム検出法	差	従来法	差	ゼロアップタイム検出法	差
25%	1261.6	104.8	1173.6	16.6	2122.2	159.2	1989.1	26.1	2956.7	193.7	2838.3	75.3
50%	1248.7	91.7	1171.7	14.7	2075.9	112.9	1978.8	15.8	2900.6	137.6	2776.5	13.5
75%	1233.4	76.4	1165.8	8.8	2051.7	88.7	1971.7	8.7	2849.5	86.5	2770.0	7.0
100%	1193.4	36.4	1151.8	-5.2	2049.5	86.5	1972.2	9.2	2849.0	86.0	2768.4	5.4

3. 室内実験

室内実験は、工場内で、写真-1 および写真-2 に示すように実施した。図-7 は、反射板による補正の検討を行った一例である。実験を開始した時刻の室温は 20℃であり、実験終了時には 11.8℃であったので、実験時間中に超音波速度が、343.6 m/s から 338.6 m/s に変化したことになる(実吉ら, 1971)。反射板により補正を行った水面位置はほぼ一定となっており、補正の有効性が示された。

4. 実証実験

4.1 実験条件

実証実験は、横須賀市の久里浜湾に面した岸壁に送受波器と多段反射板を設置し、実施した。実証実験では、3 段の反射板を設置した。計測原点から各反射板上面までの鉛直距離は、測量の結果、それぞれ、1157 mm, 1963 mm, および 2763 mm であった。

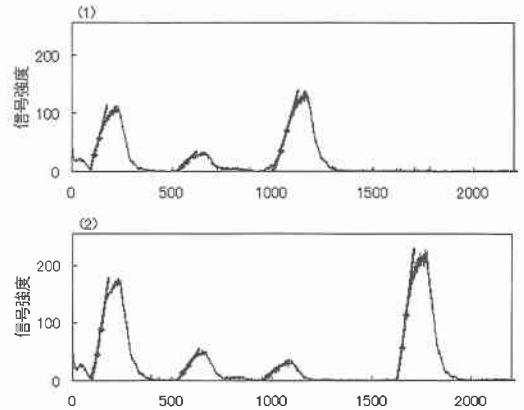
4.2 ゼロアップタイム検出法の検証

図-8 は、各反射板に関して、測量した値と、空中発射型超音波式潮位計によって得られたデータを距離に補正した値を示したものである。また、表-2 には、図-8 に示す計測結果を数値で記載している。

表一3 一段応射板による補正と二段反射板による補正の比較

年月日 時刻		2000.11.30 16:13	2000.11.30 16:23	2000.11.30 16:27
真値	L1	1157 mm		
	L2	1963 mm		
	L3	2763 mm		
計測値	L1	1166 mm	1172 mm	1160 mm
	L2	1972 mm	1982 mm	1961 mm
	L3	2770 mm	2783 mm	2750 mm
	T1	6.78 ms	6.82 ms	6.75 ms
	T2	11.47 ms	11.53 ms	11.41 ms
	T3	16.12 ms	16.19 ms	16.00 ms
一段法	(L1) : L3	2749 mm	2748 mm	2742 mm
	(誤差)	14 mm	15 mm	21 mm
	(L2) : L3	2758 mm	2756 mm	2768 mm
	(誤差)	5 mm	7 mm	10 mm
多段法	(L1, L2) : L3	2765 mm	2768 mm	2768 mm
	(誤差)	2 mm	5 mm	5 mm

図中のいずれのプロットを見ても、従来法は、実際の反射板までの距離よりも長い値を示しているのに対して、ゼロアップタイム検出法は実際の距離にきわめて近い測定結果を得ていることがわかる。これは、従来法は、最短経路に対する測定結果となっていないためである。このため、従来法に比べて、ゼロアップタイム検出法は、より妥当な観測値を得ることが示されている。



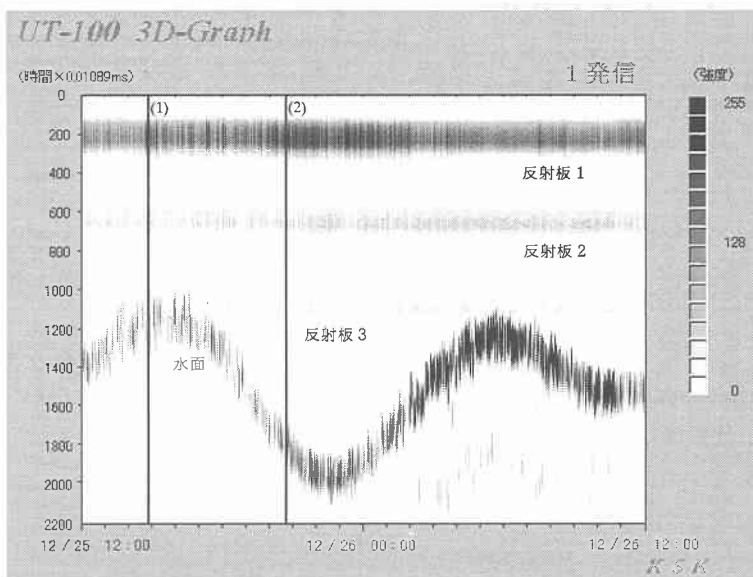
図一10 実証実験における水面位置の検出例

4.3 多段法の検証

多段法の検証にあたっては、反射板3を仮想水面として、反射板1および2による観測結果から推定される反射板3の位置と、実際の反射板3の距離との比較を行って検討した。比較結果を表一3に示すが、多段法によって測定精度が向上していることがわかる。

4.4 実証実験における水面観測データ

図一9は、実証実験における水面観測記録の一例である。横軸には時間経過を、縦軸には反射信号のサンプリング時間を示している。縦軸のゼロは計測原点である。図では超音波の反射信号の強さを表示している。このデータをもとに、ゼロアップクロス検出法と多段補正法を用いて、潮位変動測定結果を求め、その値を既設のフロート型検潮器による測定結果と比較した。



図一9 実証実験における検討対象記録

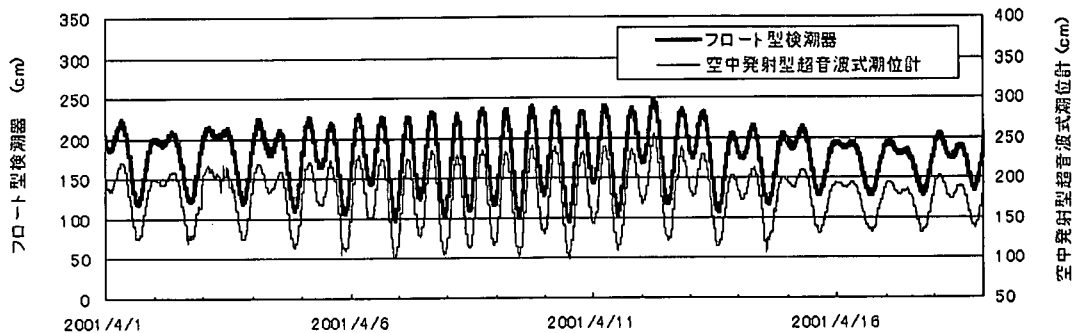


図-11 補正後平滑化処理された観測結果とフロート型検潮記録との比較 (1)

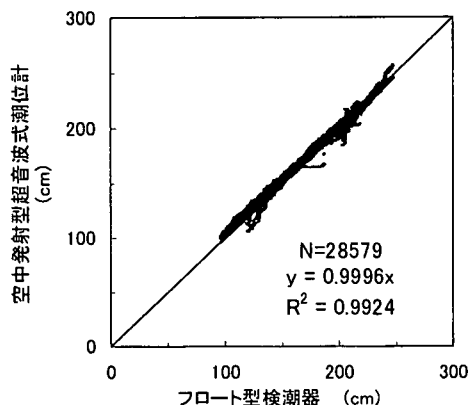


図-12 補正後平滑化処理された観測結果とフロート型検潮記録との比較 (2)

図-10は、実証実験における水面位置の検出例であり、上段と下段は、それぞれ、図-9に示す(1)と(2)の時刻に対応するものである。最下段の反射板からの出力信号の極大値は、いずれも水面からの反射信号の極大値の1/4よりも低くなっている。このため、水面と最下段の反射板が近接しても、ゼロアップタイム検出法による水面位置の検出結果には、最下段の反射板からの反射信号の影響は現れていない。

図-11は、20日間の観測結果に数値フィルター(岩崎, 1995)をかけ、周期60秒以上の長周期変動成分だけを抽出したものである。あわせて、並行観測が行われているフロート型検潮器の記録(永井ら, 1996)との比較を示している。空中発射型超音波式潮位計による観測結果は、従来のフロート型検潮器による観測結果とよく一致している。図-12は、両者の観測結果を縦軸と横軸に示し比較したものである。比較観測されたプロットは、両者の値が等しくなる斜め直線とほぼ一致しており、空中発射

型超音波式潮位計による観測結果の妥当性を検証している。

5. まとめ

本稿では、距離が既知の多段反射板からの反射信号により温度・距離補正を行う新たな方式を用いて水面測定精度と長期安定性の向上を実現させた空中発射型超音波式潮位計の開発について報告した。ここで開発した空中発射型超音波式潮位計が広く活用されることを、願ってやまない。

本資料のとりまとめにあたっては、気象庁海洋気象課技術専門官の野崎太様から、潮位観測機器の開発動向について貴重なご助言をいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 岩崎峯夫 (1995): デジタルフィルターを用いた津波計, カイジョー技報, (獨)カイジョー, Vol. 2, No. 4, pp. 51-58.
- 実吉純一・菊池喜充・能本乙彦監修 (1971): 超音波技術便覧改訂新版, 日刊工業新聞社, 1166 p.
- 高橋智晴・佐々木弘 (1982): 超音波式波高計の改良とその効果について, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第1号, pp. 3-29.
- 永井紀彦・菅原一晃・渡辺弘・川口浩二 (1996): 久里浜湾における長期検潮記録解析, 港湾技術研究所報告, 第35巻, 第4号, pp. 3-35.
- 永井紀彦・菅原一晃・浪間雅晶・小園みちる (2000): 多段反射板を用いた空中発射超音波による水面測定の精度向上, 平成12年度海洋調査技術学会講演要旨集, pp. 16-17.
- 永井紀彦・菅原一晃・清水康男・高山俊裕・小園みちる (2001): 超音波空中発射式潮位計の開発, 港湾技術資料, No. 998, 14 p.
- Lennon, G. W., M. J. Woodland and A. A. Suskin (1992): Acoustic Sea Level Measurements in Australia, Workshop Report No. 81, Joint IAPSO-IOC. Workshop on Sea Level Measurements and Quality Control, UNESCO, pp. 26-39.