

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF LAND, INFRASTRUCTURE AND TRANSPORT, JAPAN

No. 998 June. 2001

超音波空中発射式潮位計の開発

永	井	紀	彦
菅	原	一	晃
清	水	康	男
高	山	俊	裕
小	園	み	ち
			る

国土交通省港湾技術研究所

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 超音波空中発射式潮位計の概要	4
2.1 超音波空中発射式潮位計の構成と仕様	4
2.2 超音波信号の送受信とマルチレベル法	5
2.3 ゼロアップタイム検出法による反射信号検出時刻の高精度化	5
2.4 超音波信号の送受信と反射信号サンプリングのタイムスケジュール	6
2.5 多段反射板によるキャリブレーション法	6
2.6 反射傘を用いた計測原点の設定	7
3. 室内基礎実験とその結果	7
3.1 超音波の指向性に関する検討	7
3.2 温度変化に伴う反射板による補正に関する検討	8
3.3 井戸を用いたフロート型検潮器との比較測定	8
4. 実証実験とその結果	9
4.1 実証実験の概要	9
4.2 ゼロアップタイム検出法と多段法の検証	10
4.3 実証実験における水面観測データ	11
4.4 反射信号の検出結果	12
4.5 多段反射板による補正結果	12
5. おわりに	13
参考文献	14

Development of the On-Air Acoustic Tide Gauge

Toshihiko NAGAI *

Kazuteru SUGAHARA **

Yasuo SHIMIZU ***

Toshihiro TAKAYAMA ***

Michiru KOZONO ***

Synopsis

In recent years on-air acoustic wave and tsunami gauges are getting popular for the coastal disaster prevention purposes in Japanese ports and harbors. It is because that they are cheaper than the traditional tide gauges installed in the tidal wells. Nevertheless, on-air acoustic type measurement has not been supposed to be applicable to the long-term tide observation, for that calibration method was not established with sufficient precision against the space and time temperature change.

This note introduces a newly developed on-air acoustic tide gauge that is able to obtain long-term sea level fluctuation with sufficient reliability. Following devices are the points of the invention, and field and indoor experiments showed proper result.

- (1) Calibration by the multi reflection boards to revise a measurement error by the change of the temperature and the atmospheric pressure
- (2) Application of the newly developed zero-up-time detection method to specify the signal reception time which corresponds to the shortest course
- (3) Adoption of the best reflection signal by the multiplicity of the supersonic signal level

Key Words: On-air acoustic tide gauge, Temperature calibration, Multi reflection boards,
Zero-up-time Detection

* Chief of Marine Observation Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

*** Kyowa-Shoko Co.

3-1-1 Nagase, Yokosuka, Japan, 239-0826

Phone: +81-468-44-5048 Fax: +81-468-42-5246 E-Mail: nagai@cc.phri.go.jp

超音波空中発射式潮位計の開発

永井 紀彦 *
菅原 一晃 **
清水 康男 ***
高山 俊裕 ***
小園 みちる***

要 旨

近年、空中発射型超音波式波高計を岸壁等の前面に設置することによって、津波や長周期波の観測が行われる事例が増加している。空中発射超音波で水面を測定する機器は、従来の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、かつ波浪や津波の監視にも活用できるという、長所を有しているためである。しかし、超音波が空中を伝搬する際、その速度は周辺の温度や気圧に依存するため、空中発射超音波による観測の長期安定性は十分であるとはいえず、平均水面の季節変動や経年変動の検出に活用することは困難であると考えられてきた。

本資料は、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の精度と長期安定性の向上を実現させた空中発射式潮位計の開発について報告するものである。室内実験および実証実験を行い、超音波空中発射式潮位計の適用性に関する検討を行った。

ここで開発した超音波空中発射式潮位計は、以下の特徴を備えている。

(1) 多段反射板によるキャリブレーション（多段補正法）

温度・気圧による超音波の進行速度の変化による測定誤差を合理的に補正するために、なるべく水面に近い反射板を選択できる多段の反射板を用いることとした。

(2) ゼロアップタイム検出法による最短経路に対応する信号受信時刻を特定する手法

ノイズの混入によって立ち上がり時刻は波形を見るだけでは明らかにならない中、反射信号パルスの立ち上がり始める時刻を検出することができる。新たに開発したゼロアップタイム検出法を用いることとした。

(3) 超音波信号レベルの多重化による最適反射信号の採択システム（マルチレベル法）の採用

安定性の高いほどよいレベルの反射信号を選択的に採択するシステムを開発した。すなわち、各観測毎に4回程度、受信信号レベルを変えた繰り返し測定を行うこととし、観測のタイムスケジュールを検討した。

キーワード：超音波空中発射式潮位計，多段反射板，ゼロアップタイム検出法，マルチレベル法，潮位，長周期波

* 水工部海象調査研究室長

** 水工部主任研究官

*** 協和商工株式会社

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 国土交通省港湾空港技術研究所

電話：0468-44-5048 FAX：0468-42-5246 E-Mail：nagai@cc.phri.go.jp

1. はじめに

潮位観測には、フース型検潮器、水圧式検潮器などの機器が多く用いられてきたが、近年、空中発射超音波式波高計を岸壁等の前面に設置し、津波や副振動などの長周期波の観測が行われることが多くみられる。

空中発射超音波式波高計で水面を測定する方法は、変化の早い水面変動を捕らえることができるため、港内波浪観測や津波監視にも活用出来るという長所を有する。しかし、超音波が空中を伝搬する際の速度は、周辺の温度に依存するため、空中発射式超音波による観測の長期安定性は十分であるとはいえず、平均水面の季節変動や経年変化の検出に活用することは困難であると考えられてきた。また、強風下では空気中を伝搬する超音波の伝播経路変化が起こる事もその理由の一つに挙げられる。

本資料は、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、超音波空中発射式潮位計の開発について報告するものである。室内試験および実証実験を行い、超音波空中発射式潮位計の適用性に関する検討を行った¹⁾。

2. 超音波空中発射式潮位計の概要

2.1 超音波空中発射式潮位計の構成と仕様

従来の空中発射超音波式波高計には、センサーの近傍に温度計を設置する方式が用いられていた。この方式は、超音波の信号経路中の温度が一定であることを仮定したものである。また、風の影響も考慮されていない。しかし、空中の超音波の伝播速度は、温度に大きく依存するため、わずかな温度差が水面までの距離検出結果に大きな影響を与える。海水面近傍は、空気と水との境界であるため、一般に温度勾配が大きいと考えられている。このため、1点における温度測定による方法に変わる、より直接的なキャリブレーション手法の開発が望まれていた。

図-1は超音波空中発射式潮位計の基本概念を示したものである。超音波空中発射式潮位計は、送受波器・これを支えるアーム・全体を支える支柱・複数の反射板から構成される。本システムの特徴は、多段の反射板を設置していることである。距離が既知の各反射板と送受波器との距離をもとにキャリブレーションを行う。すなわち、超音波の信号経路中の温度変化や風の影響までも含めた適切なキャリブレーションによって、より正確に水面位

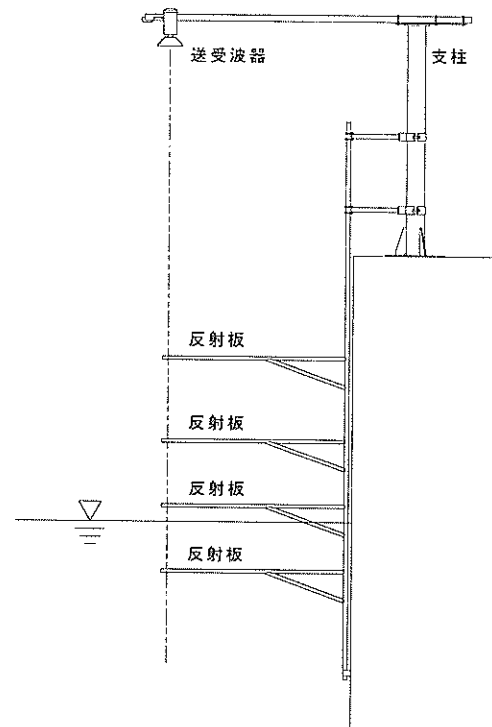


図-1 超音波空中発射式潮位計

置の位置検出を行う。超音波信号の送受信によって求められた時間差から算定される時々刻々の水面位置観測情報は、内蔵されている回路で処理され、時刻・潮位の情報としてシリアル出力される。

表-1は、空中発射式潮位計の基本仕様を示したものである。以下に、表中の特記事項について述べる。

表-1 超音波空中発射式潮位計

送受波器	
型式	UT-100型
検出方式	多段反射板による補正法 ゼロアップタイム検出法 マルチパルス法
測定範囲	1～11m
分解能	1.78mm/digit
出力	RS-232C, 時刻・潮位
寸法	外径 258mm 高さ 540mm
重量	約10kg
反射板	
形状	直径 48.6mm 鋼管

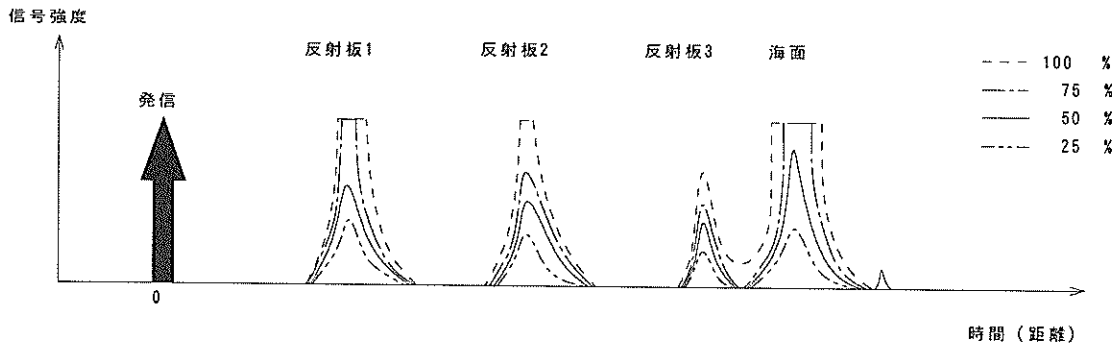


図-2 反射信号の受信感度の選択

2.2 超音波信号の送受信とマルチレベル法

図-2に反射信号の受信感度の選択の概念を示す²⁾。縦軸は信号強度、横軸は時間（距離）を示し、超音波発信の位置を計測原点として太い矢印で示している。

受信感度を4段階（100、75、50、25 %）すると、各反射板および水面からの反射エコーの大きさは、反射板1、2、3の順に小さくなる。これは反射板の大きさを同一としているため、距離が遠くなるにつれて減衰量が大きくなるからである。他方、水面の超音波受信面積は、反射板の受信面積より大きいため、水面からの反射エコーは、近傍の反射板からのエコーよりは大きい。図では、反射板4も小さく描かれているが、水面下の反射板からのエコーはきわめて小さく、実際は検知不能である。

適切な感度の選択に当たっては、受信エコーの大きさが設定された上限値よりも大きくなってしま（飽和した）ことを避けた範囲で、最大の感度選択を行うこととした。すなわち、図中の100 %受信レベルを見ると、反射板1および2と水面からの反射エコーが飽和している。また、75 %受信レベルを見ると、反射板1と水面からの反射エコーが飽和している。これに対して、50 %受信レベルと25 %受信レベルでは飽和は見られない。このため、この場合は、50 %受信レベルが選択されることになる。

2.3 ゼロアップタイム検出法による反射信号検出時刻の高精度化

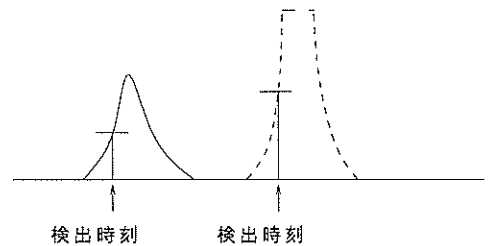
図-3は、ここで新たに開発したゼロアップタイム検出法による反射信号の検出法を、従来法と比較して表示したものである。

従来法³⁾は、一般に超音波エコーによる位置検出に汎用的に採用されている手法であり、エコーの立ち上がり部分の50 %における時刻をもって検出時刻としている。これは、ノイズの存在のため、パルスの立ち上がり時刻を特定することが困難であるためであった。

反射パルスに幅が生ずる最大の原因は、水面や反射板からの反射エコーには、多様な経路（パス）が存在するためである。しかし、本装置に関して、情報として得たいのは、最短パルスの検出時刻である。このため、最短パルスの検出時刻に対応するパルスの立ち上がり時刻をより適切に推定するため、従来法を改良したゼロアップタイム検出法をここで提案した。

ゼロアップタイム検出法では、図に示すように、出力信号エコーの大きさが、最大値の1/2となる時刻と1/4となる時刻を結んだ直線がゼロ線と交わる時刻をして、パルスの立ち上がり時刻（すなわち最短パスに対応する検出値）とするものである。ゼロアップタイム検出法は、従来法よりもより適切に最短パスに近い検出値を

従来法



ゼロアップタイム検出法

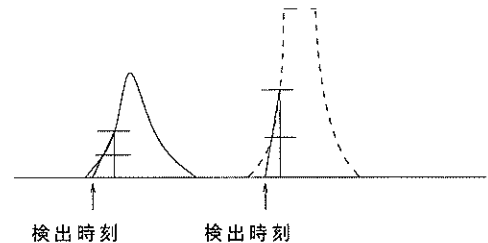


図-3 ゼロアップタイム検出法による反射信号の検出

得られる長所を有する。同時に、ゼロ付近にノイズがあった場合でも、ノイズレベルが反射エコーの1/4以下であれば、確実に検出時刻を求めることができる特徴を有する。

なお、反射エコーの検出時刻は、エコーが飽和しない範囲であれば、ノイズの影響がなければ、エコーの大きさに関係なく同一の時刻が検出時刻とされる。しかし、エコーが飽和した場合には、検出時刻に差が生じることに注意を要する。このため、前節で述べたように適切な受信信号レベルを設定することが重要になる。

2.4 超音波信号の送受信と反射信号サンプリングのタイムスケジュール

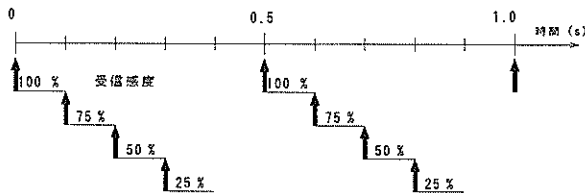


図-4 超音波信号の発信・受信タイムスケジュール

図-4は、超音波信号の発信・受信タイムスケジュールのタイミングを示したものである。波浪観測におけるデータサンプリングは、多くの場合、0.5s 間隔で行われている⁴⁾。このため、0.5s を発信・受信タイムスケジュールの1ユニットとして、データサンプリングの基本設計を行った。0.5s を0.1s 毎に5分割し、送信を0.1秒間隔で行う。受信感度を順に、100%、75%、50%、25%と変えて、4回の観測を繰り返す。残りの0.1秒では、データ処理を行うこととした。

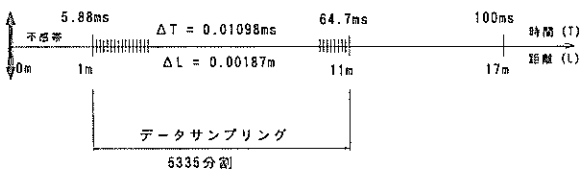


図-5 超音波信号のサンプリングタイムスケジュール

図-5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 型空中発射式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。空中の超音波信号の音速を340m/s として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 となる。通常の中空発射式超音波式波高計で採用されている測定範囲である1mから11mまでの観測を行う場合には、全観測時間は、64.7ms となり、0.1s の中に十分に収まる。観測における分解能は、5335 分割(1.87mm 間隔)となる。

なお、ここで述べた分解能は、機器のハードによるものであり、実際の測定精度とは異なるものであることには注意を要する。3.1 で後述するように、実際の計測では、超音波の指向性に伴う誤差が生ずるため、海面の測定精度の検討は、別途必要である。また、最大観測距離を11mに設定したことも、既存の UT-100 型空中発射式超音波式波高計にならったものであるが、超音波信号の距離減衰の問題を解決することができれば、図-5に示すように、17mまで最大観測距離を拡張することも将来的には可能である。

2.5 多段反射板によるキャリブレーション法

反射板による距離キャリブレーションをより精緻に行うためには、反射板をなるべく水面の近くに設置することが望ましい。このため、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⁵⁾。しかし、一枚の反射板を水面近くに設置すると、反射板は波浪や潮汐によって水没することもあり、水没した反射板からのエコーパルスは検出できない。このため、本システムでは反射板を複数設置し、最も水面に近い反射板からのエコーパルスをもとに距離のキャリブレーションを行うこととした。

図-6は、多段反射板によるキャリブレーションを解説したものである。ここでは、図-1に示すように、4基の反射板(うち3基が空中、残りの1基は海面下)を想定している。L1, L2, L3, L4 は、送受波器の位置する計測原点から各反射板までの距離(既知)であり、T1, T2, T3, および Ts は、各反射板および水面からのエコー受信時刻(測定値)である。Ls は、算出を要する水面位置である。

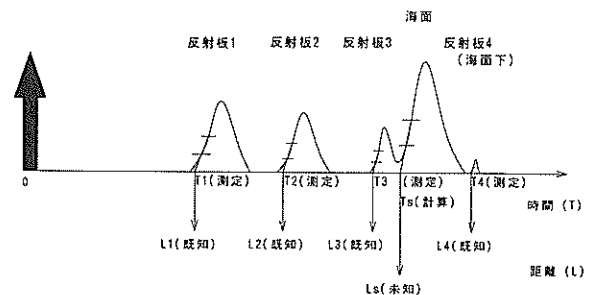


図-6 多段反射板によるキャリブレーション

一つだけの反射板を用いてキャリブレーションを行う場合、 L_s は、以下の式(1)で算出される。

$$L_s = (L_i / T_i) \cdot T_s \quad (1)$$

ここに、 i は各反射板（1 - 3）に対応する添え字である。

ここで新たに提案する多段法は、もっとも水面に近い2基の反射板（ここでは反射板2と3）からの検出時刻を用いて、より空気中の温度変化を合理的に推定するものであり、式(2)を用いる。

$$L_s = L_3 + \{(L_3 - L_2) / (T_3 - T_2)\} (T_s - T_3) \quad (2)$$

すなわち、多段法では、最も水面に近い反射板から水面までの超音波の音速を、超音波経路全体の平均値ではなく、最も水面に近い反射板とひとつ上方の反射板との間の超音波の音速として推定しており、上方と下方の温度差による誤差を減らす工夫を施している。

なお、表-1に示すように、本装置では、反射板としては、鋼製パイプを用いることとした。これは、安価であることに加えて、たわみに強い構造となっているためである。あわせて、径の細い鋼製パイプにすることによって、反射板からの反射信号レベルを低く抑さえ海面検出の誤差を生じにくくさせている。すなわち、反射板と海面が近接した場合に、反射板からの反射信号は水面からの反射信号より弱くなるので、図-6で示す反射板3からの反射信号レベルの大部分は、海面からの反射信号レベルの1/4以下となり、ゼロアップクロス検出法で得られる海面の位置に誤差が混入することが少なくなっている。

2.6 反射傘を用いた計測原点の設定

空中発射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、以下に述べる反射傘を用いた工夫が行われている。

超音波の送受波は振動子で行われる。振動子はドーナツ状になっており、呼吸運動のように径方向に振動する。振動子の振動により超音波は、水平方向（外周方向）に発信され、反射傘によって直下方向（水面方向）に向きが変わる。反射信号の受信にあっても、超音波の経路は同じであり向きが逆になる。この時の超音波の送受信位置、すなわち計測原点を、振動子の大きさにかかわら

ず1点に集中させる工夫が反射傘である。

なお、計測原点は、実際には、高さの等しい水準面を意味するが、ここでは、検潮基準面などとの混同を避けるため、あえて、計測原点という表記を行っている。

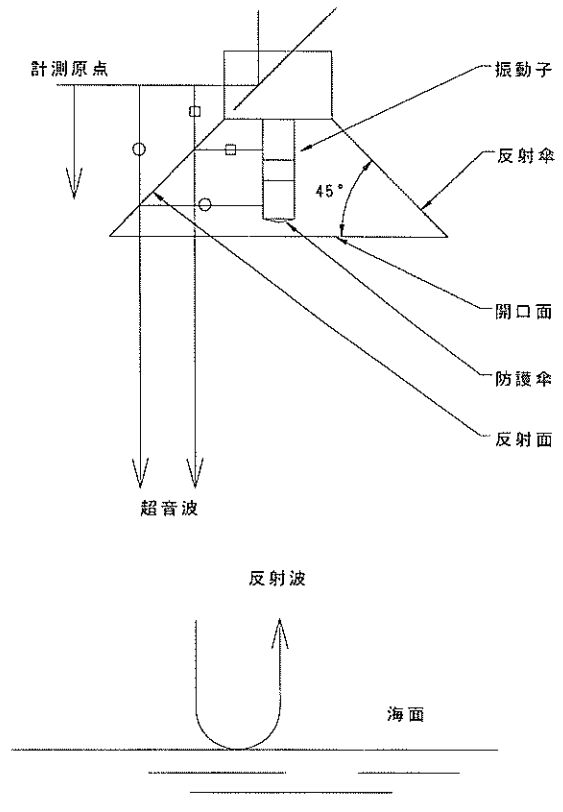


図-7 反射傘による送受波器計測原点の統一

図-7に、反射傘による送受波信計測原点の統一の原理を示す。反射傘の開き角度を±45度を設定することによって、振動子の上部で送受信される信号も、下部で送受信される信号も、空間的な信号の経路長が等しくなり、仮想的な計測原点を1点に集中させることができる。これによって、発信パルス信号を時間的に非常に尖った形状とし、誤差を小さくすることができる。なお、振動子の先端には、反射傘を経ずに直接送受波される超音波信号を遮断するための防護傘を設けている。

3. 室内基礎実験とその結果

3.1 超音波の指向性に関する検討

超音波空中発射式潮位計の送受波器を写真-1に示す。送受波器には、送受信回路・信号変換回路・CPU回路・出力回路等が内蔵される。

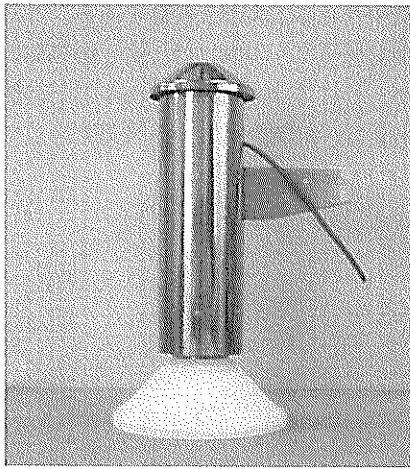


写真-1 送受波器

室内実験は、工場内の天井のH鋼に送受波器を直下方向に向けて固定して実施した。井戸水面に向けて超音波を発信し、オシロスコープで波形観測を行い、受信エコーパルスが最大になるよう送受波器の方向を微調整した。

室内基礎実験の第一段階では、超音波の指向性を検討した。このため、井戸上に反射板を水平にテーブル間に渡し、反射板を軸直角方向に平行移動させた。この結果、送受波器から反射板までの鉛直距離は285cmであったのに対して、超音波の反射エコーが半減する水平移動距離が±8cmであることが確認された。すなわち、半減半角は1.6度であった。

このことは、計測原点から水面までの鉛直距離が11mであれば、半減半角内の反射信号のサンプリングは、直径が60cm程度で行われていることになる。表面波周期3秒の比較的周期の短い波浪であっても、沖波波長は約14mである。このことから、ハード的な分解能である1.87mmの海面検出精度を保つことは困難であるにしても、本装置では、比較的周期の短い波の波形を観測することができる。

3.2 温度変化に伴う反射板による補正に関する検討

図-8は、反射板による補正の検討を行ったものである。図は、1段の反射板と仮想水面（鉄板）による室内実験の結果を示す。

実験は、室内温度が変化する夜間に行われた。空気中の超音波の伝播速度 C は、式(3)で示される⁹⁾。

$$C = 0.607 t + 331.45 \quad (\text{m/s}) \quad (3)$$

ここに、 t は気温（摂氏）である。実験を開始した時刻

の室温は20°Cであり、実験終了時には11.8°Cであった。従って実験時間中に超音波速度 C は、343.6m/sから338.6m/sに変化したことになる。

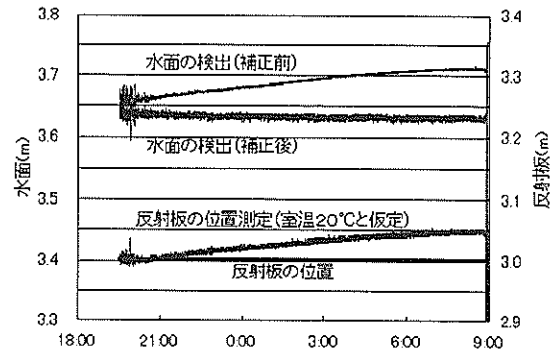


図-8 井戸を用いた室内実験

図中には、反射板による温度補正を行わずに超音波速度 C を一定値(343.7m/s)と仮定して求めた水面位置の検出結果と、1段の反射板によって式(1)で補正を行った水面位置の検出結果とを示している。補正を行わなければ、温度の低下とともにあたかも反射板も水面も送受波器に徐々に近づいているように見える。しかし、式(1)で補正を行った水面位置は、ほぼ一定となっており、反射板による補正の有効性が示された。

室内実験では、温度勾配を送受波器と仮想水面との間に設けることが難しい。このため、一段補正法(式(1))と多段補正法(式(2))との比較検討は、実証実験で行うこととした。

3.3 井戸を用いたフロート型検潮器との比較測定

写真-2および写真-3に、井戸を用いたフロート型検潮器と空中発射式潮位計との比較実験の状況を示す。写真-2は送受波器の設置状況を撮影したもので、送受波器は天井H鋼に下向きに設置されている。写真-3は、井戸の水位計測の状況を示している。フロート型検潮器のフロートを井戸に浮かべており、同時観測に使用した反射板も見られる。図-9は、実験状況を模式的に示したものである。

図-10は、フロート型検潮器による同時観測結果との比較である。横軸はフロート型検潮器による水面検出値を、縦軸は空中発射式潮位計による水面検出値を、それぞれ示す。井戸内の水位を約50cm毎に変化させ測定を行った。図中の斜線は、45度線であり、縦軸と横軸の一致する状態を示している。プロットされた実験結果は斜線上に位置しており、空中発射式潮位計による観測結果には大きな間違いがないことが確認された。

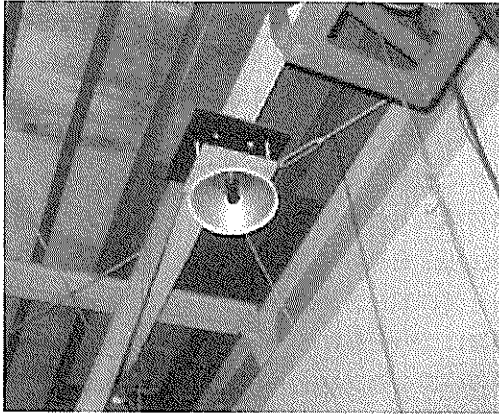


写真-2 室内実験における送受波器の設置状況

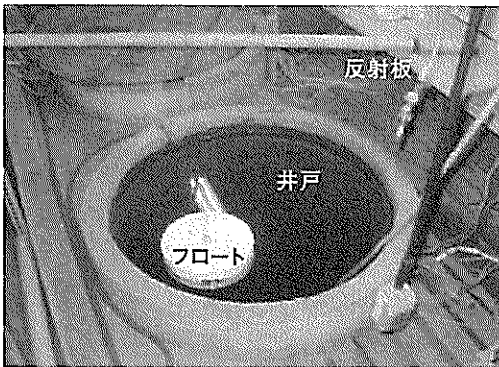


写真-3 室内実験における井戸の水位観測

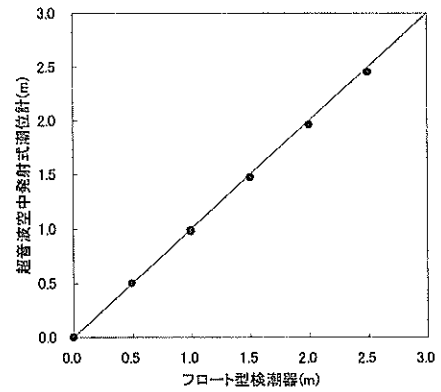


図-10 フロート型検潮器による観測結果との比較

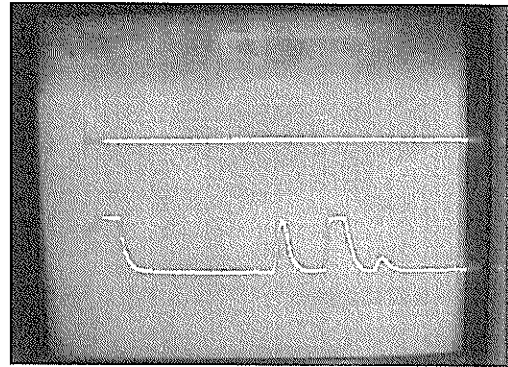


写真-4 室内実験における井戸の水位観測

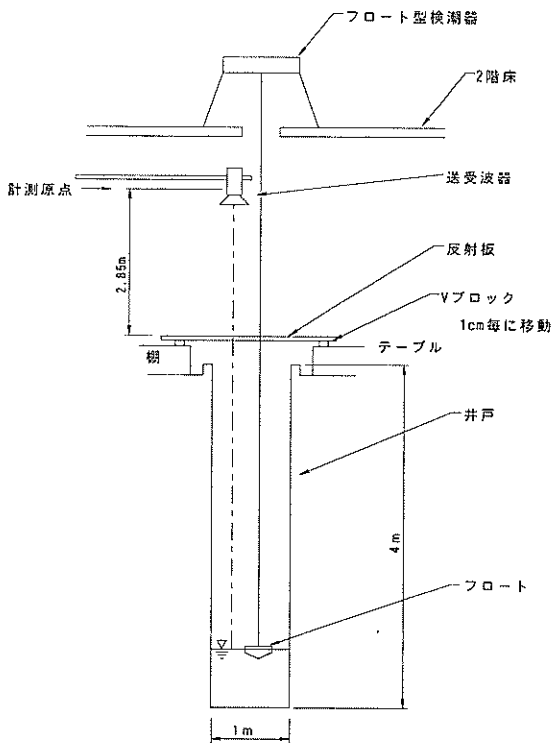


図-9 井戸を用いた室内実験

写真-4は、室内実験におけるオシロスコープ波形の例である。波形の左から、送信波形・反射板・水面・反射板の第二エコーを示している。ただし、上部の一本線は回路の基準のためのもので測定には関係ない。

4. 実証実験とその結果

4.1 実証実験の概要

図-11は、実証実験の概略を示したものであり、横須賀市の久里浜湾に面した港湾技術研究所の岸壁に、送受波器と多段反射板を設置した状況を示す図である。港湾技術研究所では、1959年以降、継続してフース型検潮器による潮位観測を行っており、空中発射式超音波式波高計による津波・高潮・波浪に関しても1996年以降、並行観測を続けている⁷⁾。このため、観測結果を比較検証するためにも好都合な実証実験場所であった。

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、測定の結果、それぞれ、1157mm、1963mm、および2763mmであった。

写真-5は、実証実験の状況を示したものである。

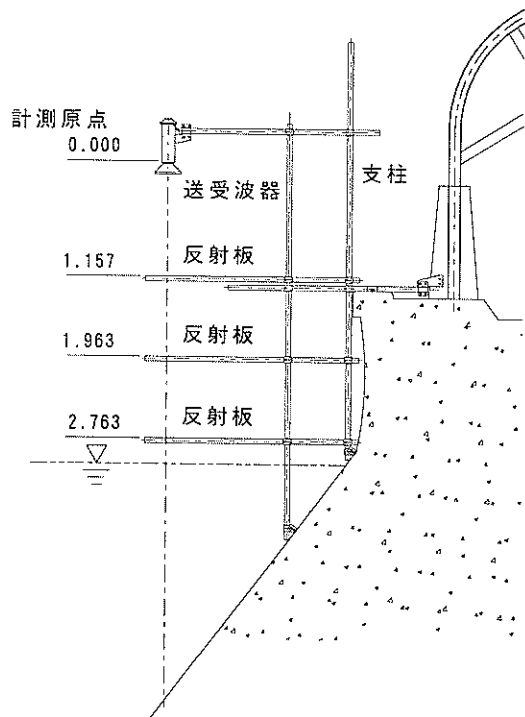


図-11 実証実験における送受波器と多段反射板の配置

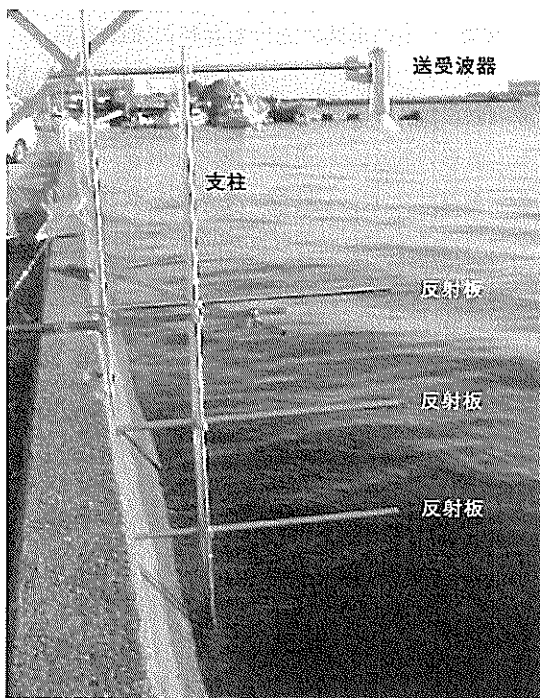


写真-5 実証実験の状況

4.2 ゼロアップタイム検出法と多段法の検証

(1) ゼロアップタイム検出法

図-12 は反射板 1, 2, 3, に関して, 測量した値と, 超音波空中発射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-12 に示す計測結果を数値で記載している。

なお, 表-2に示す実験結果は, 2000年11月30日の14時頃に得られたものであるが, この時の気温は約 20°C であった。表-2に示す実験結果は, 測定された超音波パルスの発信・受信時間差に, 20°C における超音波速度 343.7m/s を乗じて距離に換算した値を示している。従来法とゼロアップタイム検出法との比較は, 4段階の受信感度についてそれぞれ行った。

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。

なお, 受信信号の感度について見ると, 反射板1に対しては, 感度設定を100%にすると飽和が見られたため, 75%以下としたときの計測結果と若干異なった値となっている。また, 反射板2と3に対しては, 感度設定を25%にすると受信信号レベルが低くなり過ぎノイズの影響が若干現れているようである。このため, このケースに関しては, 50%あるいは75%の感度設定が望ましいことがわかる。

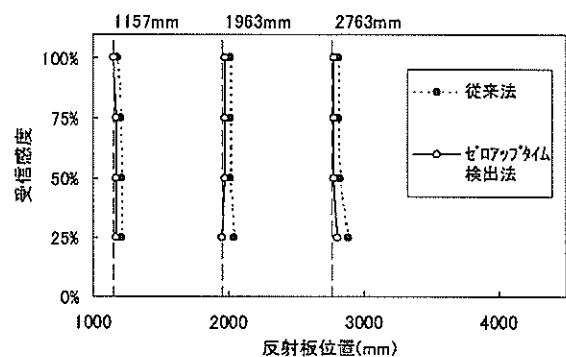


図-12 ゼロアップタイム検出法と従来法との距離検出の比較

(2) 多段法

実証実験では, 反射板によるキャリブレーションは, 式(1)による一段法よりも式(2)による多段法の方が誤差が小さくなることが多くのケースで示されたが, 以下にその検討の具体的な一例を示す。なお, 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

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 1157mm				反射板2 1963mm				反射板3 2763mm			
	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

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することとした。

①計測結果

反射板1：計測原点からの距離は1157mm
送受信時間差は6.784ms

反射板2：計測原点からの距離は1963mm
送受信時間差は11.473ms

反射板3：計測原点からの距離は2763mm
送受信時間差は16.119ms

②一段法によるキャリブレーション（反射板1による）

式(1)より反射板3の計測原点からの距離は2749mmと算定され、設定値2763mmとの差は14mmであった。

③一段法によるキャリブレーション（反射板2による）

式(1)より反射板3の計測原点からの距離は2757mmと算定され、設定値2763mmとの差は6mmであった。
反射板2は、反射板1よりも反射板3に近く、より超音波パスの全体に近い領域でキャリブレーションを行ったため誤差が減少したものと考えられる。

④多段法によるキャリブレーション（反射板1と2）

式(2)より反射板3の計測原点からの距離は2761mmと算定され、設定値2763mmとの差は2mmであった。
反射板2は、反射板2と反射板3との間の超音波速度は、計測原点と反射板2までの全区間で想定するよりも、反射板1から反射板2までの区間で想定する方が、より妥当な値を示したためである。

以上の検討を、他の2観測事例とともに表-3にまとめたが、いずれの事例も多段法の有効性が示されている。

表-3 一段反射板による補正と二段反射板による補正の比較

年月日	2000.11.30	2000.11.30	2000.11.30	
時刻	16:13	16:23	16:27	
真値	L1	1157mm		
	L2	1963mm		
	L3	2763mm		
計測値	L1	1166mm	1172mm	1160mm
	L2	1972mm	1982mm	1961mm
	L3	2770mm	2783mm	2750mm
	T1	6.78ms	6.82ms	6.75ms
	T2	11.47ms	11.53ms	11.41ms
	T3	16.12ms	16.19ms	16.00ms
一段法	(L1) : L3	2749mm	2748mm	2742mm
	(誤差)	14mm	15mm	21mm
	(L2) : L3	2758mm	2756mm	2753mm
	(誤差)	5mm	7mm	10mm
多段法	(L1,L2) : L3	2765mm	2768mm	2768mm
	(誤差)	2mm	5mm	5mm

4.3 実証実験における水面観測データ

図-13は、実証実験における水面観測記録の中で、大潮時に反射板3が没水した観測結果を含む部分を示したものである。横軸には、2000年12月25日12時から26日15時までの時間経過、縦軸には超音波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。

図には、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。

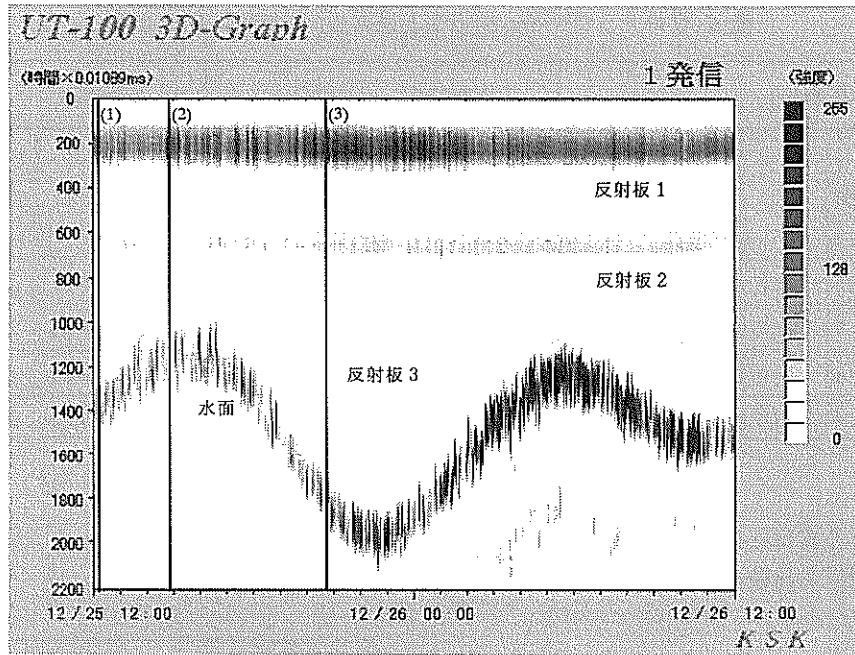
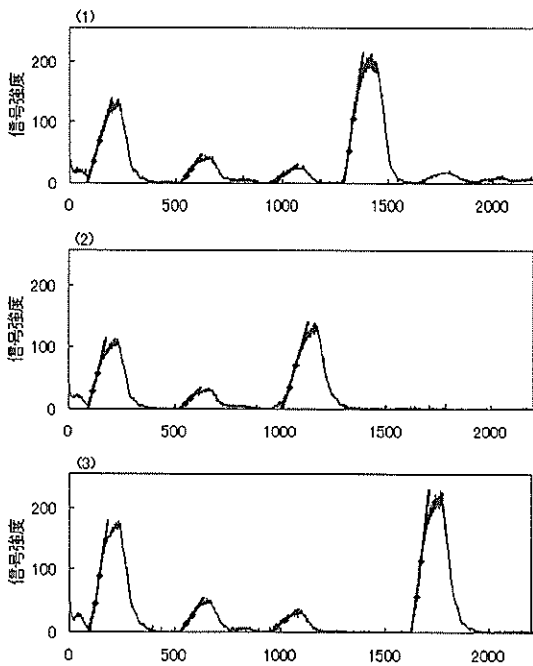


図-13 実証実験における検討対象記録

4.4 反射信号の検出結果

図-14 は、実証実験における水面位置の検出例で、図-13 中に(1)・(2)・(3)で示した時刻に対応したものである。(1)は、最下段の反射板と水面とが接近しているが、信号の分離はできる事例である。(2)は、最下段の反射板と水面とが接近しており、信号の分離ができない事例である。(3)は、最下段の反射板と水面とが離れている事例である。



図

図-14 実証実験における水面位置の検出例

4.5 多段反射板による補正結果

図-15 は、多段反射板によって補正された水面の観測結果を示したものである。数値は、計測原点からの表示とした。多段法による補正によって図-13 よりも水面位置の変動幅が小さくなりより鮮明に水面位置を識別できている状況がわかる。約 12 時間周期の潮汐変動の線に 10cm 程度の幅があるのは、風浪あるいは副振動などの長周期波によるものと考えられる。

図-16 は、図-15 の観測結果に数値フィルターをかけ、周期 30 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、同時に並行観測が行われているフロート型検潮器の記録との比較を示している。空中発射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-17 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、すべて両者の値が等しくなる斜め直線と一致しており、空中発射式潮位計による観測結果の妥当性を検証したものとなっている。

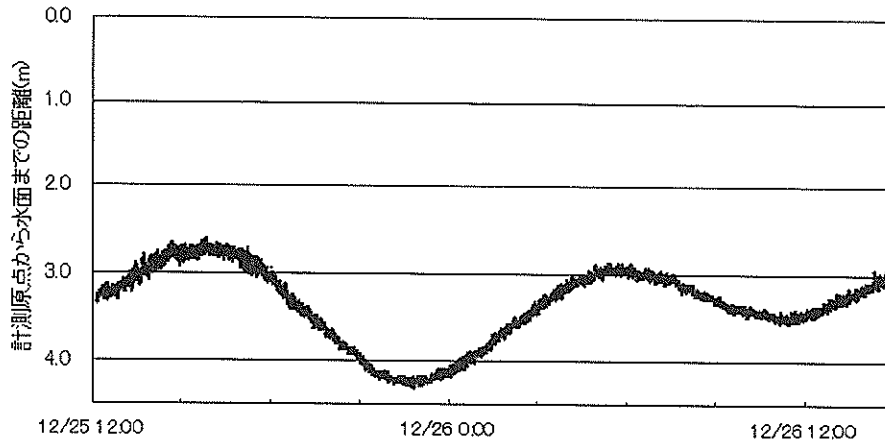


図-15 多段反射板によって補正された観測結果

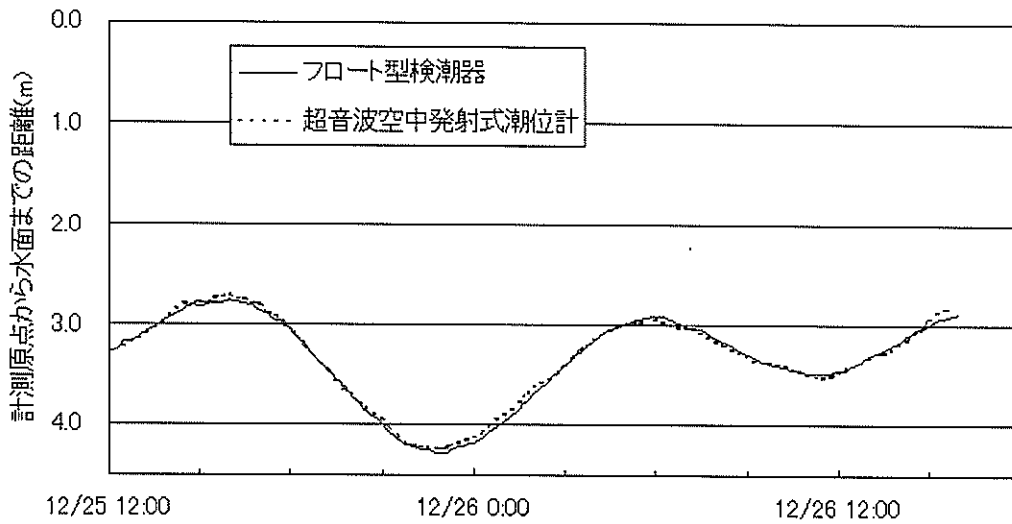


図-16 補正後平滑化処理された観測結果とフロート型検潮記録との比較 (1)

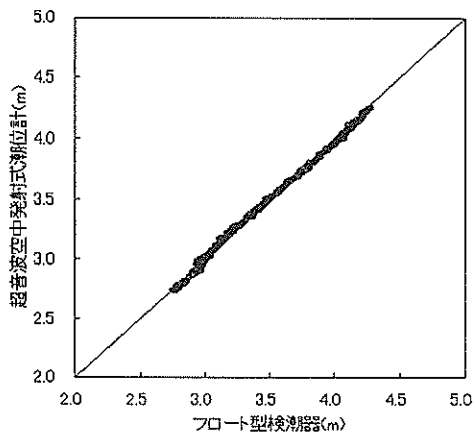


図-17 補正後平滑化処理された観測結果とフロート型検潮記録との比較 (2)

5. おわりに

本資料では、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の精度と長期安定性の向上を実現させた空中発射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式潮位計は、以下の特徴を備えている。

- (1) 多段反射板によるキャリブレーション
- (2) ゼロアップタイム検出法による最短経路に対応する信号受信時刻を特定する手法
- (3) 超音波信号レベルの多重化による最適反射信号の採択システム (マルチレベル法) の採用

室内試験と実証実験との結果から、ここで開発した空中発射式潮位計による観測結果の妥当性を示すことができた。

近年、潮位観測の目的は、従前からの潮汐の調和定数の算定を行って基準水面を決めることに加えて、より周期の短い現象としては津波・高潮・港内長周期波浪観測へと拡がり、より周期の長い現象としては地球環境の変化として捉えられる平均水面上昇の監視へと拡がりつつある。このような多目的な用途に活用できる簡易かつ安価な潮位観測装置として、今後、ここで開発した空中発射式潮位計が広く活用されることを、著者らは願ってやまない。

今後は、関係機関の協力をいただき、空中発射式潮位計を多くの観測地点に展開するとともに、さらに長期間のデータの蓄積を行い、長期安定性や、合理的なメンテナンス手法などに関しても、検討・改善を進めていきたい。

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。また、ここで報告した空中発射式潮位計は、平成11年度と12年度の2か年にわたって行われた、港湾技術研究所と協和商工（株）との間の共同研究によって、開発されたものである。5名の著者ばかりでなく、両機関の多くの関係者の努力によって、この共同研究は本資料で紹介した成果を得ることができたことを付記する。特に、港湾技術研究所水工部海象調査研究室の佐藤和敏研究官およびパート職員の岩上美紀さん・橋本由紀子さんには、検証データとして用いたフース型検潮器による観測結果の整理とりまとめに、ご尽力を果たしていただいた。ここに謝意を表す。

(2001年2月13日受付)

参考文献

- 1) 永井紀彦・菅原一晃・浪間雅晶・小園みちる：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，2000年，pp.16-17.
- 2) 土子良治・佐々木弘・河野信二：超音波式砂面計について，第13回技術発表会予稿集，海洋調査協会，1996年，pp.39-44.
- 3) 高橋智晴・佐々木弘：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，1982年，pp.3-29.
- 4) 永井紀彦：ナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）による我が国沿岸の波浪特性の解明，港湾技研資料

No.863，1997年，113p.

- 5) G.W.Lennon, M.J.Woodland, and A.A.Suskin : 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, 1992.
- 6) 実吉純一・菊池喜充・能本乙彦監修：超音波技術便覧改訂新版，日刊工業新聞社，1971年1月，1166p.
- 7) 永井紀彦・菅原一晃・渡辺弘・川口浩二：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，1996年，pp.3-35.

港湾技研資料 No.998

2001.6

編集兼発行人 国土交通省港湾技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社ポートサイド印刷

Copyright © 独立行政法人港湾空港技術研究所 2001

本報告書の転載・複写を希望される場合は、港湾空港技術研究所企画課へご連絡をお願いします。