

潮位差の大きな実海域における空中発射型 超音波潮位計の精度向上に関する研究

A STUDY ON ACCURACY OF THE ON-AIR ACOUSTIC TIDE GAUGE
AT SEA AREAS WITH LARGE TIDE AMPLITUDES

笹 健児¹・永井紀彦²・桑垣和雄³・服部慎一³
Kenji SASA, Toshihiko NAGAI, Kazuo KUWAGAKI and Shinichi HATTORI

¹正会員 博(商船) 広島商船高等専門学校助教授 商船学科
(〒725-0231 広島県豊田郡大崎上島町東野4272-1)

²フェロー会員 博(工) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部長
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³非会員 協和商工株式会社 (〒359-1167 埼玉県所沢市林2丁目131-5)

The real-time observation system of water levels is required to establish along coastal areas. The on-air acoustic tide gauge is newly developed here. It does not require the installation of the well in the water, so the construction cost is expected to be lower than conventional types. However, the accuracy is not verified in detail at the sea area which has large amplitudes of tides. In this study, tide data is continuously observed at the observation point in the Seto Inland Sea after the installation. At first, the property of temperatures in the steel pipe of the tide gauge is analyzed. The unevenness of temperatures is found, so we construct the algorithm of the correction of the acoustic velocity by using calibration bars. Finally, the improvement of the accuracy is confirmed by observed data.

Key Words: *Tide, On-air acoustic tide gauge, Ultrasonic wave, Reflection signal, Temperature
Zero up time method*

1. 研究の目的

近年、津波、高潮、異常潮位など海面水位が上昇することによる被害が大きく取り上げられ¹⁾、全国規模で港湾施設などに関する防災機能の強化について検討されている。一方、潮位変化が与える船舶運航への影響についてアンケート調査を行った結果、水位が上昇する時だけでなく、水位が低下する干潮時において船舶の操縦性が低下し座礁事故が発生するなど様々な問題点が明らかとされた²⁾。このような背景より、津波、高潮および潮位変動に関する対策の必要性が指摘され、防災・予報システムの開発・整備が急務となっている。防災や海難防止にあたり、まずは海面の水位変動をリアルタイムで計測・モニタリングすることによる全国規模の情報提供システムが必要である。このためには簡易かつ安価で設置工事でき、さらに海面水位を精度良く観測できる計測システムの開発が求められている。永井ら³⁾は空中発射型超音波潮位計(以下、本装置と呼ぶ)を既に開発・提案しているが、超音波センサーの下に数メートルの測定棒

を岸壁・栈橋に設置するため、海中工事が不要という利点がある。さらに本装置は従来のフロート型検潮器のように検潮井戸の設置工事も必要としないことから、これまでの計測機器よりも工事費がかなり安価かつ設置が容易という長所を有する。本装置は、管内の空中を伝播する超音波が水面で反射した信号の伝播時間を求め水位を算・算定するものであるが、管内の温度分布が不均一であることによる超音波の音速変化や反射信号に生じる雑音による誤差が測定精度上の課題とされていた。同時に本装置は潮位差の大きな実海域で長期間にわたるデータ計測を実施しておらず、この点に関する精度検証も必ずしも十分とは言えない。本研究では潮位差が非常に大きい瀬戸内海に立地する大崎上島に本装置を設置し、1年間にわたる連続観測を実施した。これにより、季節や潮汐ごとによる管内の温度分布を明らかにし、同時計測した水圧式のセンサーによる計測値と比較し、定量的な測定精度の検討を行った。これらによって生じる誤差を補正する構造・アルゴリズムを様々な側面より検討した。

2. 超音波潮位計の測定原理・構造

本装置は海面上に設置された超音波センサーより海面に向かって超音波を発射し、海面からの反射時間を測定することにより時々刻々の水位を求めるといった測定原理である。図-1に本装置による水位測定概念図を示す。

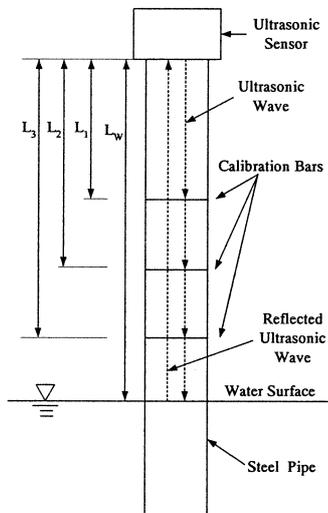


図-1 本装置による水位測定概念図

図-1に示すとおり、超音波が空気中の風による影響を防止するために直径数センチの鋼管内を伝播・反射する構造となっている。超音波センサーより発射された超音波が海面から反射し、再びセンサーに受信されるまでの時間を t_w とする。このときの超音波の音速を C とすれば、センサーから水面までの距離 L_w は次式によって求められる。

$$L_w = \frac{C t_w}{2} \quad (1)$$

式(1)より、正確な水位を求めるためには超音波の音速 C と反射時間 t_w が正確に求められていなければならない。空気中における超音波の音速は次式に示すとおり、温度によって変化する特性を有する。

$$C(m/s) = 331.45 + 0.607 T(^{\circ}C) \quad (2)$$

ここで、 T は超音波が伝播する空気中の温度($^{\circ}C$)を示す。測定対象である水面付近は気温と水温の境界であり、温度勾配が大きくなっていると考えられる。永井ら³⁾は超音波センサーから水面の途中に複数の反射板を取り付け、それぞれでの反射時間を計測することで補正を試みた。この中で水面に最も近い i 番目の反射板での反射時間 t_i を用いれば、センサーから各反射板までの距離は既知のため、次式で水面近くの温度に対応した音速が求められる。

$$C = \frac{2L_i}{t_i} \quad (3)$$

ここで、 L_i は水面に最も近い反射板からセンサーまでの距離を示す。式(3)によって補正された音速を式(1)に代入することにより、温度勾配による音速補正を行う原理となっている。当初は反射板を重ねる構造で設計されていたが、反射板によって発射パルスが減衰し水面での明瞭な反射信号を検出しにくく、多段の反射板を設置しにくいという問題点があった。このため、発射パルスが極力減衰しにくい構造である細い金属棒による校正棒に変更した。

3. 潮位差の大きな実海域での観測システムの構築

本装置は当初、製造工場の井戸にてテスト計測を行っていたが、気象海象条件が複雑な実海域にて設置し、長期間にわたる連続観測による検証が必ずしも十分ではなかった。本研究では潮位差の大きな海域にて水位変動をはじめ様々なパラメーターを用いて観測および分析した。

(1) 観測位置および本装置の構成

本装置の観測点として瀬戸内海・芸予地区の海域に立地する大崎上島の広島商船高等専門学校・練習船棧橋を選定した。図-2に本装置を設置した付近の位置図を示す。

観測点となっている大崎上島付近は本土と四国間に多くの島嶼部が位置し、極めて複雑な地形となっている。このため、大潮日には4m程度の非常に大きな潮位差が発生し、本装置の測定精度を検証し問題点を改良するにあたっては最適なポイントであると考えられる。図-3に本装置によるデータ処理および記録に関する流れを示す。

本装置の構成は、超音波センサーの下に長さ644cmの鋼管を配置し、管内を超音波が伝播する構造とした。校正棒もこの管内に設置されており、さらに鋼管の外側に直径10cmの塩ビ管で保護している。

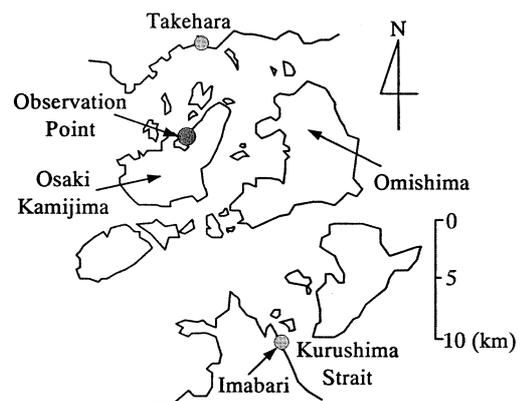


図-2 本装置を設置した位置図

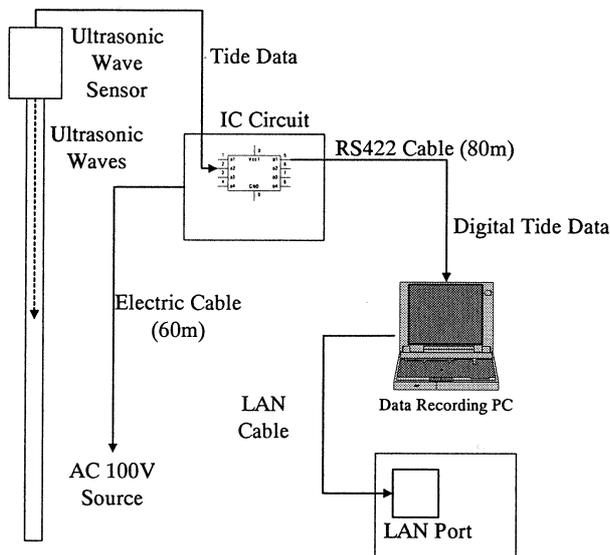


図-3 本装置によるデータ処理の流れ

電源はAC100Vの電源により本装置を起動する方式であり、超音波センサーにより検知した反射時間をもとにデータ演算部に転送し、較正棒によって補正された水位値を計算する。演算されたデータはRS422ケーブルを介し、パソコンに転送される。本研究では水位観測時における詳しい気象海象の状況を把握するため、気圧計、温湿度計を同時に設置し、水位観測値と同時に1s間隔でデータ転送できるシステムを構築した。

(2) 本装置の管内における温度分布

水位および気象海象の観測は2005年1月より開始し、一部システムの不都合で欠測となった時期（2005年2月および3月）を除く年間を通じた連続観測が実施できた。本装置で観測精度に影響を大きく与える要素としては、管内の温度分布および超音波の信号波形である。まず、管内の温度分布を把握するため、センサーの1m下から1m間隔で4箇所温度センサーを設置し、水位等のデータと同時に出力できるようにした。図-4および図-5に2005年4月16日および8月2日における管内の温度（4箇所）および外気温の変化を示す。

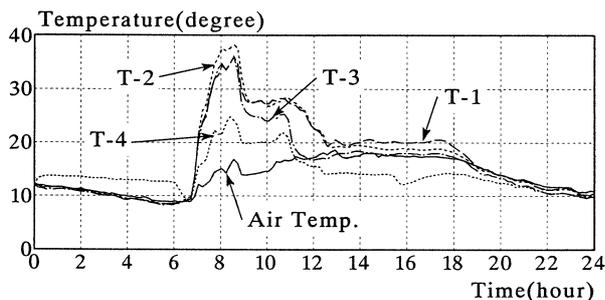


図-4 管内温度および外気温の変化（2005年4月16日）

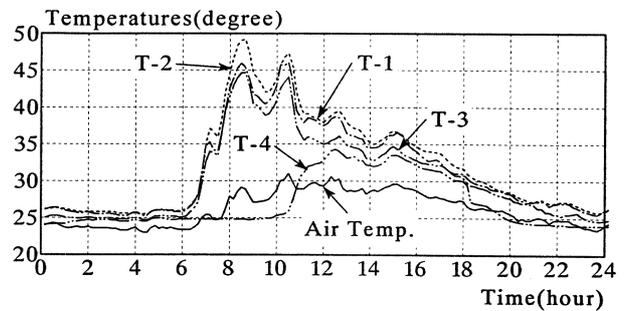


図-5 管内温度および外気温の変化（2005年8月2日）

温度計の位置関係より、センサーの4m下（T-4）は上げ潮から満潮になる局面で水没するため、水温と気温が周期的に入れ替わる形となる。3m下（T-3）については大潮の満潮時に水没するが、1mおよび2m下（T-1およびT-2）については高潮などの異常時を除き水没しない。図より、夕方から早朝までの時間帯では管内温度と外気温はほぼ同じであるが、午前中を中心に両者の差は両者とも10~20°C程度生じている。管内の温度分布で見ると、T-2が最も高く、T-1、T-3がT-2よりも5°C程度低くなっている。T-4については、4月16日のケースではピーク時の温度が25°Cであり、他の部分よりも10°C近く低くなっており、水温による影響がある程度作用しているものと考えられる。このように風の影響を低減する目的で設置された鋼管内の温度分布は時間・空間的に非常に不均一であり、管の上部は気温よりもかなり高温となっている。この対策として、管の上部にファンを取り付け通気することで温度を均一にする方法もあるが、これだけで完全に均一にするのは難しい。このため、較正棒を当初設置した2段式から3段式に変更し、水面が干潮時に大きく低下した状況においても温度補正が可能となることを図った。

4. 潮位差の大きな実海域での水位データの計測精度

本装置にて計測した水位データについて、まず現状の測定精度を検証する必要がある。このため、本装置の近く（練習船棧橋の先端）に水圧式の計測器（小型の水温深度計：TD計）を設置し、連続観測を同時に実施した。TD計は海底に設置され、時々刻々のセンサーにかかる圧力を計測することで水深の変化を求める原理で構成されている。このTD計は1cm程度の測定精度と言われている。ただし、気圧による圧力を標準気圧の一定値として処理しているため、以下のように実際の気圧変動に対応した水深値は次式のように求められる。

$$h_c = h_p - \frac{\Delta P}{\rho_w g} \times 100 \quad (4)$$

ここで、 h_c ：気圧補正された水深(m)、 h_p ：水温深度

計にて計測された水深(m), ΔP : 実際の気圧と標準気圧の気圧差(hPa), ρ_w : 海水密度 ($\approx 1025\text{kg/m}^3$), g : 重力加速度をそれぞれ示す. 気圧差については, 今回設置した気圧計でのデータを用いれば, 正確な水深の変動, すなわち潮位変化が求められる. TD計から補正して求めた値と本装置による計測値の比較を行い, その違いを定量的に明らかとした. 図-6~図-9に表-1に示す年月日における本装置およびTD計による水位変動の計測結果の比較を示す.

表-1 水位データを比較した月日および潮位条件

年月日	潮位条件	較正棒の段数
2005年5月15日	小潮	2段式
2005年5月24日	大潮	2段式
2006年1月8日	小潮	3段式
2006年1月16日	大潮	3段式

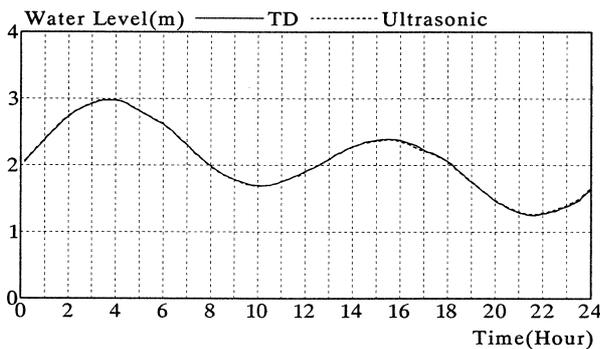


図-6 水位変動の観測結果の比較 (2005年5月15日 小潮時 2段式較正棒で温度補正)

図-6および図-7は2段式の較正棒にて音速補正を行っているが, 水位が4.68m (第二較正棒) および5.38m (第一較正棒) の位置にあるため, 通常の大潮日の満潮時においても水没していない. また, 干潮時には水面から約5m上の較正棒の反射時間をもとに補正していることになる. 一方, 図-8および図-9は図中に示すとおり, 水位が1.94m (第三較正棒), 3.27m (第二較正棒), 4.30m (第一較正棒) の配置となっており, 第一較正棒は大潮日の満潮時においても水没していないが, 第二較正棒は1月16日の満潮時 (10:30~13:00) には水没し, 第一較正棒のみで補正している. また水位が1.94mよりも下がった状況では3本の較正棒で補正していることとなり, 干潮時には水面の約1.5m上の較正棒での反射時間をもとに補正していることになり, より実際の温度分布に近い音速補正ができていたものと考えられる. しかし, データ全体で見ると較正棒の構造を変化させても, いずれのケースも水圧式 (TD計) のそれとあまり大きな違いは見られない. そこで両者による水位変動の差について統計的かつ定量的に値を把握する必要があると思われるため, 較正棒を2段式および3段式とした場合でそれぞれ次式によってrms値を求めた.

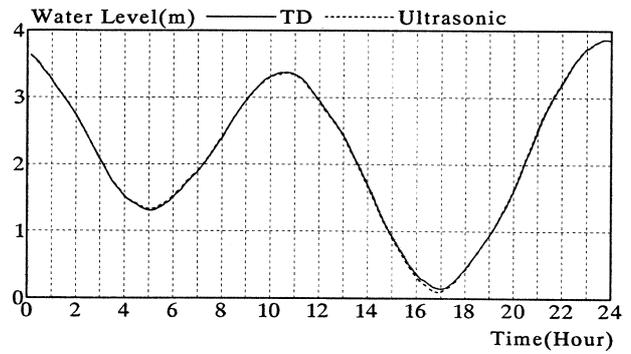


図-7 水位変動の観測結果の比較 (2005年5月24日 大潮時 2段式較正棒で温度補正)

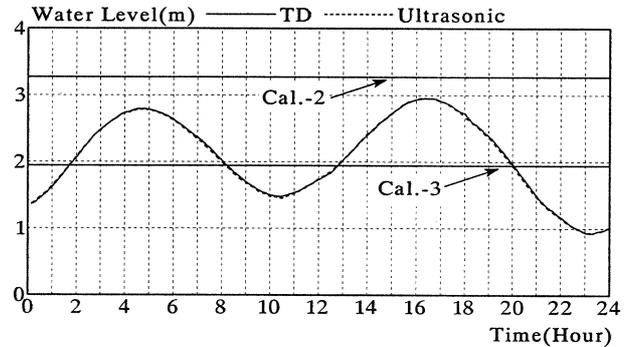


図-8 水位変動の観測結果の比較 (2006年1月8日 小潮時 3段式較正棒で温度補正)

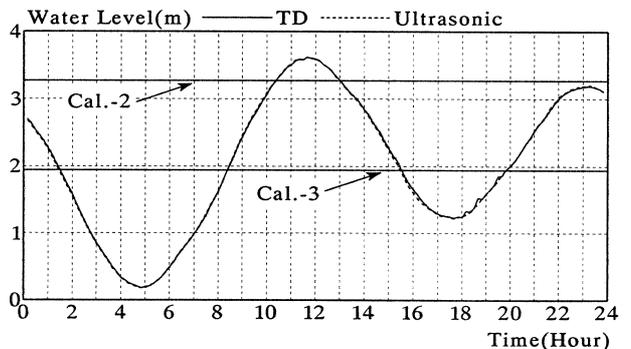


図-9 水位変動の観測結果の比較 (2006年1月16日 大潮時 3段式較正棒で温度補正)

$$rms = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\eta_{1i} - \eta_{2i})^2}{N}} \quad (5)$$

ここで, rms : 水位差のrms値 (m), η_1 : 本装置による水位変動 (m), η_2 : 水温深度計による水位変動 (m), N : データ個数を示す. 表-2に較正棒の本数ごとにデータ個数およびrms値の比較結果を示す.

表-2 較正棒の本数ごとにおけるrms値の比較

較正棒	データ数	rms値
2本	12395	0.021m
3本	2304	0.024m

表より、rms値は較正棒が2本および3本であっても2cm程度生じている。ただし、両者のずれは一定に発生せず、干満のピークで大きくなる傾向にある。較正棒の本数を3本に増やすことによっても測定精度の大きな変化は比較したデータよりは見られなかったが、比較するTD計の精度もcmオーダーであるため、これよりも詳細なmmオーダーの精度検証はここでは困難である。これより、本装置は潮位差の大きな実海域においても、実用上はほぼ問題のない範囲での精度を有していることが確認できた。

5. 反射信号のノイズ除去に関するアルゴリズムの開発

本装置とTD計の測定値の差異が2cm程度であることが示されたが、誤差を発生する原因として管内の温度勾配だけでなく、超音波の反射信号を処理する際のノイズも原因であると考えられる。本装置は2章でも示したとおり、較正棒での反射信号によって音速を求め、さらに水面の反射信号と補正された音速より水位を求める原理である。このため、各較正棒および水面での反射パルスが立ち上がる時間を正確に求める必要があるが、ノイズが発生するためデータから直接求めるのは困難であるとされている。そこで図-10に示すようなゼロアップタイム法がすでに提案されているが³⁾、潮位差の大きな実海域において観測された反射信号のデータがほとんど存在しない。

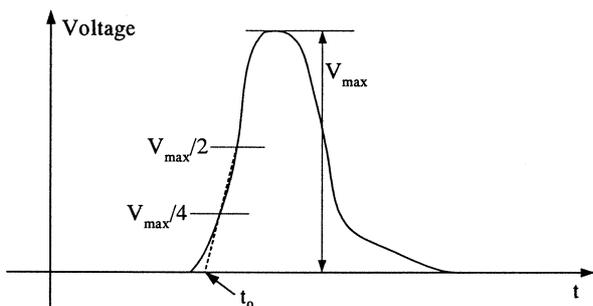


図-10 ゼロアップタイム法の概要

そこで実海域にて発射および反射信号に関するデータをまず計測した。データ計測は大潮日の満潮時(2005年12月15日)および干潮時(2006年1月31日)に本装置の集積回路にシンクロスコープを接続し、データをパソコンにて収録した。ここでは、計測データにおけるノイズ特性に対応した立ち上がり時間 t_0 を正確に求めるアルゴリズムを検討する。図に示すとおり、反射パルスの最大値 V_{max} の1/2および1/4の値における時間を $t_{1/2}$ および $t_{1/4}$ とすれば、両点を通る直線の方程式をもとに t_0 は次式のように求められる。

$$t_0 = t_{1/4} - V_{1/4}(t_{1/2} - t_{1/4}) / (V_{1/2} - V_{1/4}) \quad (6)$$

ここで、 $V_{1/2}$ および $V_{1/4}$ はそれぞれ V_{max} の1/2および1/4の値を示す。図-11および図-12に満潮時および干潮時に計測された発射パルスおよび反射パルスの波形を示す。ここで、信号データのサンプリング間隔は $25 \mu s$ であった。

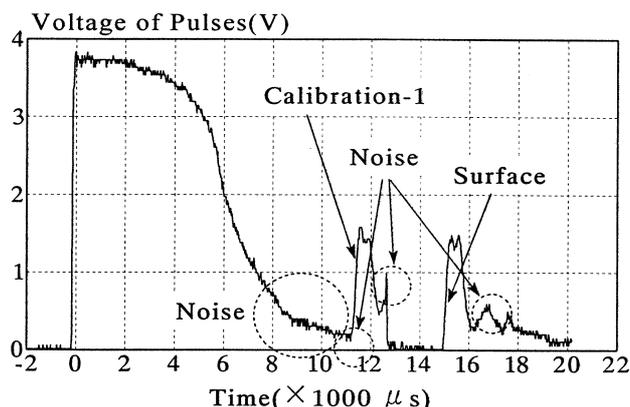


図-11 発射および反射パルスの計測結果(2005年12月15日 満潮時)

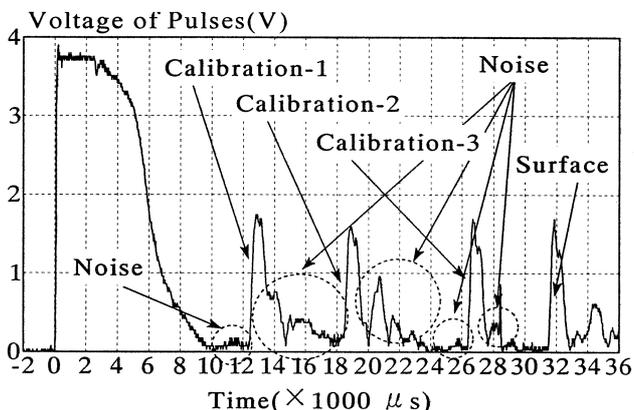


図-12 発射および反射パルスの計測結果(2006年1月31日 干潮時)

満潮時の信号であるが、第一較正棒のみ水面上にあり、図に示すように発射信号の残響が強く、発射後もなかなか減衰していない。これは製造工場の井戸では現れなかった現象であり、実際の海上ではこの部分のノイズのために第一較正棒の立ち上がり時間を求めにくくなっている。また第一較正棒での反射信号にもノイズが発生した。干潮時の信号については、3本とも較正棒が水面上にあり、水面の反射信号を含めて4つの反射パルスが観測されている。発射パルスのノイズは満潮時よりも小さく、第一較正棒の立ち上がり点は検出しやすいと思われる。しかし、いずれの較正棒とも信号の後ろにノイズが発生している。特に第二較正棒の後ろにあるノイズは実際の反射信号と非常に類似した形となっており、これを間違えて較正棒の反射信号と検出してしまうおそれがある。満潮および干潮時に計測された信号に発生するノイズを除去し、正確な信号の立ち上がり点を求めるため、以下のような判定条件をアルゴリズムに加えた。

- ①発射パルスの立ち上がり時間から8750 μ s過ぎた状況でなければ第一較正棒に達しないと定義した。
- ②較正棒間のピーク間時間 $>3000 \mu$ sとなる条件を付加し、反射パルスのすぐ後ろに波形が検出されても較正棒または水面の反射信号とは判定しないようにした。
- ③反射パルスの判定条件としては、データの傾きが正でかつ発射パルスの最大値の1/5以上に達した時点とした。

従来の装置では反射パルスの最大値の1/2となる点の時間 $t_{1/2}$ によって音速・水位の計算を行っている。このため、従来の方法とゼロアップタイム法にて音速・水位値をそれぞれ計算し、水位値の誤差を比較した。図-13および図-14に満潮時および干潮時に計測した計28ケースにおける水位値の誤差の計算結果を示す。

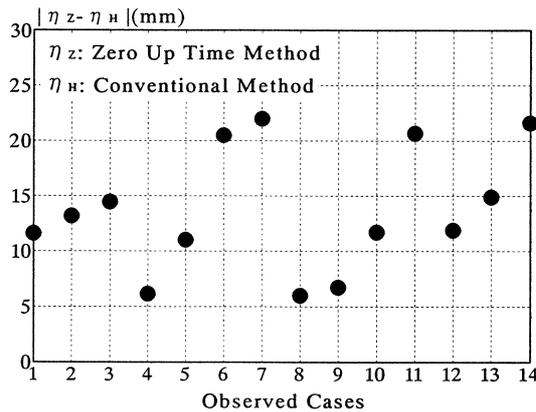


図-13 水位値の誤差比較(満潮時:2005年12月15日)

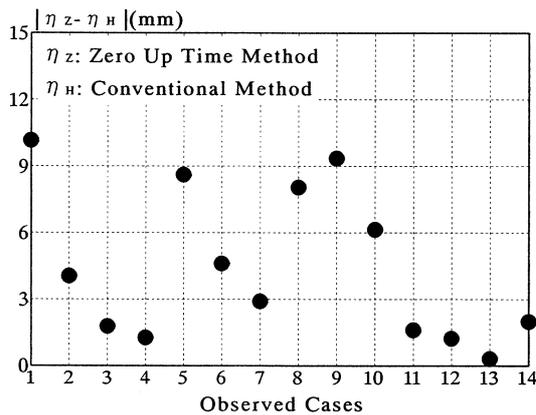


図-14 水位値の誤差比較(干潮時:2006年1月31日)

これより、各ケースによってばらつきは見られるが、立ち上がり時間の違いにより水位値に満潮時で22mm、干潮時で10mmの差異が発生している。

さらに両者の方法にて求めた水位値に対し、それぞれ、二次の多項式にて最小二乗近似を行い、二次式近似曲線と水位値の差の標準偏差を求めた。干潮時のデータについての標準偏差は、従来の方法では5.62mm、ゼロアップタイム法では4.47mmとなってお

り、後方で計算した方が1mm程度ばらつきは小さい。潮位は、滑らかな二次関数的に時間変動すると考えられるので、標準偏差の小さいゼロアップタイム法の方が、実際の水面変動を忠実に再現していると推測される。すなわち、ゼロアップタイム法を採用したアルゴリズムの改良により精度向上が期待できることを示唆している。今後はmmオーダーの比較が可能なデータを測得し、設置工事も容易かつ安価な本装置の有効性をさらに詳細に検証する必要がある。

6. 結論および今後の課題

結論および今後の課題は以下のように要約される。

- (1) 鋼管内の気温分布を温度計により連続観測した。これより、センサーの1m下および2m下の温度がどの季節も午前中に気温よりも10℃~20℃高く、水位の変動による水温の影響も合わせて考えると極めて不均一な温度分布となっている。
- (2) 較正棒を2段式とした場合、3段式に変更した場合の両方について、大潮、小潮時を中心に精度比較を行った。較正棒がどちらの本数の時も水圧センサーとの違いについてのrms値は約2cmであることが分かった。
- (3) ゼロアップタイム法により各反射信号のゼロ点を正確に推定できるアルゴリズムを作成した。ゼロアップタイム法にて計算した場合、ケースによってばらつきはあるが、従来法に対する水位値の違いは5~20mm程度であることが分かった。
- (4) 本装置では安全な作動を考慮し、較正棒の水没時だけでなく、較正棒より30~40cm以内の距離となった場合にはその較正棒が水没しているものとして取り扱い、直前の反射時間をもとに補正を行っている。管内の温度分布が時間的に変化の早い場合、どの程度の誤差が生じるのかについては、今後把握しておく必要がある。
- (5) mmオーダーの精度を比較するためには同時にそのオーダーの精度を保障する観測機器を併設する必要があり、潮位差の大きな実海域での確認実験ができれば望ましい。

参考文献

- 1) 末永正次, 松本英雄, 板橋直樹, 三原正裕, 梅木康之, 磯部雅彦: 広島湾の異常潮位について, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.1316-1320, 2002.
- 2) Sasa, K., Mizui, S., Nagai, T. and Hibino, T.: *Basic Research on Operational Troubles for Ships and Harbours Due to Abnormal Water Levels*, Proceedings of the 15th International Conference of Offshore and Polar Engineering, Vol. III, pp.720-727, 2005.
- 3) 永井紀彦, 菅原一晃, 清水康男, 高山俊裕, 小園みちる: 空中発射型超音波潮位計の開発, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.1426-1430, 2001.