

# 沖合水面変動記録を用いた津波成分 即時抽出法に関する研究

RESEARCH ON REALTIME TSUNAMI DETECTION SYSTEM USING  
OFFSHORE WATER SURFACE ELEVATION DATA

清水勝義<sup>1</sup>・永井紀彦<sup>2</sup>・李在炯<sup>3</sup>・泉裕明<sup>4</sup>・岩崎峯夫<sup>5</sup>・藤田孝<sup>6</sup>  
Katsuyoshi SHIMIZU<sup>1</sup>, Toshihiko NAGAI<sup>2</sup>, Jae Hyeng LEE<sup>3</sup>, Hiroaki IZUMI<sup>4</sup>,  
Mineo IWASAKI<sup>5</sup> and Takashi FUJITA<sup>6</sup>

- <sup>1</sup>正会員 (独)港空研 海洋・水工部海象情報研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)  
<sup>2</sup>フェロー 工博 (独)港空研 海洋・水工部長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)  
<sup>3</sup>正会員 工博 (財)沿岸技術研究センター主任研究員 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)  
<sup>4</sup>非会員 環境修 (財)日本気象協会首都圏支社 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1)  
<sup>5</sup>正会員 工修 (社)海洋調査協会専務理事 (〒103-0023 東京都中央区日本橋本町2-8-6)  
<sup>6</sup>正会員 工修 日立造船(株)技術研究所主任研究員 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

This paper introduces a newly developed real time tsunami detection system using offshore water surface elevation data obtained from GPS buoys or seabed installed acoustic/pressure wave gauges. In order to eliminate high frequency components caused by wind waves and swells, shape of the numerical low-pass-filter was determined with consideration of its real-time efficiency. To eliminate lower frequency phenomena caused by astronomical tides and other causes such as water temperature change, 6 days continuous passed data were found to be necessary to obtain harmonic constants of the 4 principal tide components and averaged sea level. Miss-fixed and data-loss phenomena, which may appear in the GPS buoy observation, were also considered to elaborate the automatic system.

Proposed system was checked with the actual offshore tsunami observation data caused by the 2004 Tokaido-off and 2005 Miyagi-off earthquake tsunami events, and the applicability was well confirmed with exception during a huge typhoon caused abnormal waves and sea-level events.

**Key Words :** tsunami, offshore observation, GPS buoy, seabed wave gauge, numerical filtering

## 1. はじめに

津波波形を沖合波浪観測機器で観測する技術<sup>1) - 6)</sup>を応用し, 沿岸到達前に津波来襲を把握できる津波監視システム構築が, GPSブイの開発<sup>7)</sup>や観測情報のリアルタイム化<sup>8)</sup>を通じて, 実現に近づきつつある<sup>9)</sup>. しかし, 海には, 風浪・長周期波・潮汐など, 津波以外の幅広い周期帯における海面変動が併存しているため, 海面の上下変動データから津波を適切に抽出・判定することは容易ではない. このため, 今日に至るまで, 沖合水面変動記録を用いた津波成分の抽出・判定は, 研究者によって事後的に検討されていたのが現状であった. 津波警戒情報の発信は, 緊急を要するため, 人手を介さない自動化されたシステムの構築が必要である. 反面, 自動化されたシステムであっても, 誤報は, 極力避けなければならない. 本研究は,

このような要請に応え, 沖合水面変動記録をリアルタイム処理し津波を自動的に即時に抽出するシステムの構築を, めざすものである.

すなわち, 本稿では, 過去に観測された津波の周波数特性を考慮し, フィルター長前後1分以内という限られた時間内に, 最も合理的に周期の短い波浪成分を除去する数値フィルターについて検討した. また, 天文潮汐や異常潮位等の津波より周期の長い長周期成分の除去法に関しても, 実際の観測事例をもとに, そのアルゴリズムを検討した. さらに, GPSブイによる観測上, 特に注意を要するミスフィックス事象やデータ欠落事象への対応についても考察した上で, 過去に観測された2005年宮城県沖地震津波, 2004年東海道沖地震津波等の実際の沖合観測波形事例をもとに, ここでとりまとめた津波の自動即時抽出システムの妥当性を検証した.

## 2. 想定津波波形の水位変動量と周期範囲

文献8)で提案した通り、沖合津波観測では、津波第1波の波高・周期を確認してからの情報発信では遅すぎるため、長周期成分偏差が閾値を超えた時点で津波検出第1報を発表することが重要である。この場合、津波の周期が未知であるため、沖から岸への伝播増幅特性を正確に推定することは困難であるので、津波波高は水深の1/4乗に逆比例するという、グリーンの式に基づく断面的な変形を仮定し、沿岸で津波警報の目安となる1mの高さとなる沖合での閾値を提案した。ここで、津波波高が水深の半分を超えると碎波が生ずると仮定したため、水深2mで津波波高が1mとなる沖合での閾値を、水深に応じて以下のように考えた。

- ・ 水深100m： 閾値は偏差35cm
- ・ 水深200m： 閾値は偏差30cm
- ・ 水深500m： 閾値は偏差25cm
- ・ 水深1000m： 閾値は偏差20cm

誤報を避けるためには、津波成分抽出にあたっては、ノイズレベルを上記のように推定される閾値より相当程度小さくする必要がある。

次に、過去の津波周期測定事例をもとに、ターゲットとする津波の周期を考察する。

久里浜検潮所で観測された1960年チリ地震津波の周期は、津波到達直後は、ゼロクロス法で見ると60分程度、スペクトル解析によるとピークは83分程度であり、その後、徐々に久里浜の固有周期である16分程度の周期成分が発達していった。1993年北海道南西沖地震津波の周期は、輪島港沖の流速計型波向計によって観測された流れの記録から、引き波と押し波の時間間隔が約8分であったことから、周期約16分と推定された。1994年北海道東方沖地震津波では、むつ小川原港沖あるいは苫小牧港沖の波高計連続観測結果から、ゼロクロス法で見ると40-60分であり、スペクトルピークは20-80分に幅広く分布していた。1996年イリアンジャヤ地震津波では、波浮港沖の波高計連続観測結果から、ゼロクロス法でもスペクトル解析でも、周期は15分程度であったが、この周期は、久里浜検潮所でも、ほぼ同じであった。2003年十勝沖地震津波では、北日本太平洋沿岸の数多くの波浪観測点で津波が観測されたが、その周期は、ゼロクロス法で見ると40-60分程度であり、スペクトルピークは地点毎に異なり、多峰型も見られた<sup>4)</sup>。2004年東海道沖地震津波では、規模が比較的小さな津波が、室戸沖GPSブイなどで観測されたが、その周期は、ゼロクロス法で見ると10分程度であり、スペクトル形状は、13分程度と8分程度にピークを有する双峰型であった。海上保安庁のホームページで公表されている、昭和基地で観測された2004年スマトラ沖地震津波の第1波（ゼロアップクロス定義）周期は約40分であったが、次第に周期が短くなり10分程度の成分が増幅されていった。これは、地形による固有振動周期との関係と考えられる。

以上の既往の津波観測事例をまとめると、リアルタイム津波情報システムでは、概ね周期10分以上の長周期水位変動を正しく感知できれば、実用上は問題ないと考えられる。比較的規模の小さい2004年東海道沖地震津波の検討のように、より詳細な津波波形を検討するにしても、周期5分以下の成分は不要（ノイズ）であると考えてよさそうである。すなわち、誤報を出さないようにするためには、周期5分以下の短周期ノイズは、極力除去し、閾値よりも低いレベルにノイズを押さえなければならない。

## 3. 短周期波浪成分を除去する数値フィルター

沖合での早期津波検知が目的なので、フィルター処理に時間をかけられない。ここでは、沖合で10分程度早く津波を検知できるメリットを活かした情報発信を目標とするため、フィルター長としては±60s以下、すなわち、遅れ時間を1分間以下とすることを与条件として検討を行なった。

数値フィルター形状は、インパルス応答とも言われる。すなわち、インパルス信号を入力波形記録とし、任意形状の数値フィルターをかけた出力波形記録は、フィルター形状そのものとなるからである。逆に、数値フィルター形状がインパルス関数である場合、入力波形と出力波形は一致する。言い換えれば、インパルス形状のフィルターは、すべての周波数を透過させる周波数応答特性をもったフィルターである。

一般に、フィルター形状と周波数応答関数とは、フーリエ変換・逆変換の関係として整理される。ここで、入力波形としての時系列データ $X(i)$ に対して、フィルター長を± $M$ とする数値フィルター ( $H(i)$ ,  $i = -M$ から $+M$ まで) をかける場合を考える。ここに、 $i$ と $M$ は整数である。 $M$ が十分に大きい値である場合（フィルター長が十分に長い場合）、 $i = 0$ の場合だけ $H$ は値を有し、それ以外の $i$ に対しては $H$ がゼロとなるインパルス応答関数 $H$ は、次式で表現できる。

$$H(i) = A \sum_{j=1}^M \cos\left(\frac{(2j-1)\pi \cdot i}{2M}\right) \quad (1)$$

ここに、 $n$ はフーリエ変換の項数を示しており、 $i$ は $-M$ から $M$ までの値をとる。すなわち、式(1)は、もっとも低周波（長周期）成分である $j=1$ の成分（周期が $2M$ ）から、もっとも高周波（短周期）成分である $j=M$ の成分（いわゆるナイキスト周波数と呼ばれるデータサンプリング間隔の2倍周期）までの三角関数の和として、すべての周波数をそのまま透過させるインパルス形状フィルターを表現することができることを意味している。なお、式(1)の右辺に乘じられている $A$ は、正規化のための係数である。

十分に長いフィルター長を設定できれば、任意の周波数応答特性を有する数値フィルターを設定することは、理論的に可能である。しかしながら、津波抽出

フィルターの設計にあたっては、強くその即時性が求められるので、十分なフィルター長の確保が困難である。前述したように、±60sといったフィルター長の中で、周期5分以下の比較的短周期の成分をより効果的に除去することができるフィルターの選定が重要である。ここでは、図-1は、以下の代表的な4種類のフィルター形を想定したものである。

- ① 単純移動平均フィルター
- ② 式(1)の第1項だけをとったCOS型フィルター
- ③ ナウファス長周期波検出フィルター<sup>10), 11)</sup>
- ④ ハミングウィンドウをかけたフィルター<sup>12)</sup>

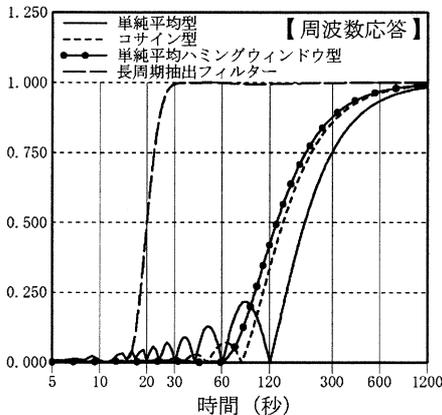


図-1 4種類の数値フィルターの周波数応答

①の単純移動平均フィルターは、いわゆるサイドローブが見られる周波数応答であり、波浪やうねりの影響を完全には除去できない。式(1)の第1項だけを抽出した②のCOS型フィルターは、サイドローブ現象が①に比べて小さくなっているが、完全には消えていない。③のナウファス長周期波検出フィルターは、周期30s以上の常時の長周期波の観測を目的としたものであるため、津波抽出の観点からはノイズとなる周期30sから300sにかけての透過率がほぼ1.0と大きいため、津波検出には不向きである。こうした観点から、サイドローブ現象が見られず、かつ、周期5分以下の短周期ノイズは、極力除去することができる、④のハミングウィンドウ型フィルターを、ここでは採用することとした。このフィルターは、次式で表現される。

$$H(i) = A \cdot \left( 0.54 + 0.46 \cdot \cos \frac{\pi \cdot i}{M} \right) \quad (i = -M, \dots, +M) \quad (2)$$

#### 4. 天文潮汐や異常潮位等の長周期成分の除去

津波成分の正しい抽出のためには、波浪等の津波よりも周期の短い成分を除去すると同時に、天文潮汐等のより周期の長い津波以外の成因を有する変動成分をリアルタイム処理で除去する必要がある。

図-2は、実測データから主要4分潮の調和常数算定を可能とする入力データの最短期間を検討した事例

である。検討対象としたデータは、有義波高が3-4mという比較的高波浪条件の中で、室戸岬沖水深100mのGPSブイが捉えた、2004年東海道沖地震津波波形の観測時のものである。図では、直前の1日分、6日分、および365日分のデータをもとに主要4分潮の振幅と遅角(位相)といった調和常数を、観測時を追って最小自乗法によって算定し、津波波形の抽出を行った。津波以外の成因による潮汐偏差成分の除去としては、直前12時間の平均水位を実測と一致させるようにして行った。なお、波浪等の短周期成分の除去は、3. で紹介した、±60sの単純移動平均にハミングウィンドウをかけたフィルターを採用した。図より、入力データ1日分では天文潮位が正確に予測できていないため、津波波形の抽出ができていないが、6日分の情報があれば、365日分の結果と同等の抽出結果を与えていることがわかる。

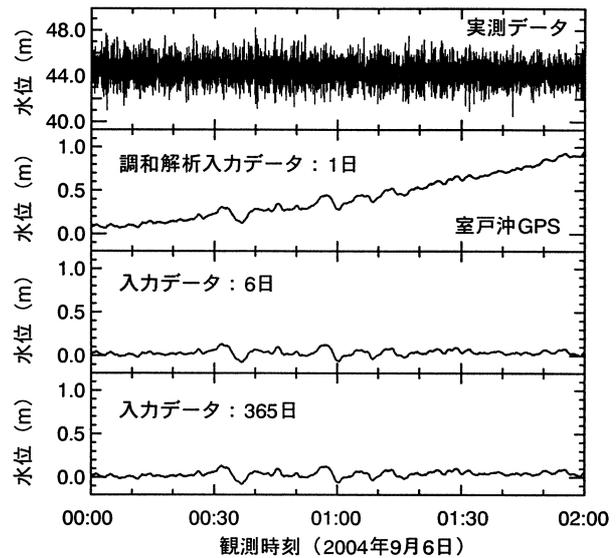


図-2 調和解析入力データ数に応じた抽出波形

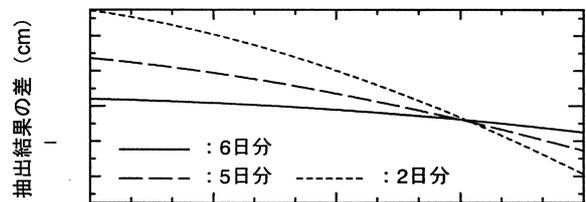


図-3 入力データ日数別の抽出波形水位の差

調和解析への具体的な入力データ日数を検討するため、短期間の入力データを用いた抽出波形から、365日分の入力データを用いた抽出波形を差し引いた結果(差)を図-3に示す。図には、入力データとして2日分、5日分、6日分を示している。図より、点線で示す入力データ2日分の予測潮位を用いた場合の差は、最大で約5cmであり、津波第1波の最大偏差時(6日, 0:31)には約4cmとなっている。一方、実線で示す入力データ6日分の予測潮位を用いた場合の差

は1 cm以下で、津波第1波の最大偏差時（6日、0:31）での差は殆ど無い。これらの結果より、津波波形抽出に用いる主要4分潮算定に必要とされる調和解析入力データの最短期間は6日程度を設定すれば、実用上問題は無いものと考えられる。

## 5. GPSブイによる観測で留意すべき事象

実際のGPSブイによる水位観測では、採用する測位方式によって誤差が補正されたり軽減されたりする。これらの誤差補正は、測位演算ソフトで処理されるが、GPSのユーザーは、測位結果と共にソフトから出力される識別フラグを確認することによって、測位精度を知ることができる。測位精度を示すフラグは演算ソフトによって異なり、ステータスやクォリティーなどと呼ばれているが、RTK-GPSにおける測位精度の一般的な分類は、次に示すとおりである。

- ・ フィックス解： 精度 数cm程度
- ・ フロート解： 精度 数cm～数十cm程度
- ・ DGPS解： 精度 数m程度
- ・ 単独測位解： 精度 数十m程度
- ・ 測位演算不能： 解なし

ここに示した具体的な精度は一般に認識されているもので、基準局と移動局の距離（基線長）によって異なる。正確な測位精度は、基線長に応じて演算ソフト毎に定められている。

GPS測位ではミスフィックスと呼ばれる現象が発生する場合がある。ミスフィックスとは、一定もしくは幾分傾斜したシフト量が測位値に加算される事象であり、正確な位置情報とは異なる情報である。大船渡沖水深53mのGPSブイが観測した、2002年2月21日に発生したミスフィックスの例を、図-4に示す。ミスフィックスは、図に示すように10分間程度継続して生じることが多く、津波誤報となりうる事象である。

しかし、ミスフィックス事象は、その前後に測位信頼度がDGPS解以下に低下している際に現れていることが、過去の観測事例で示されているため、これを判断材料として判別することが可能である。

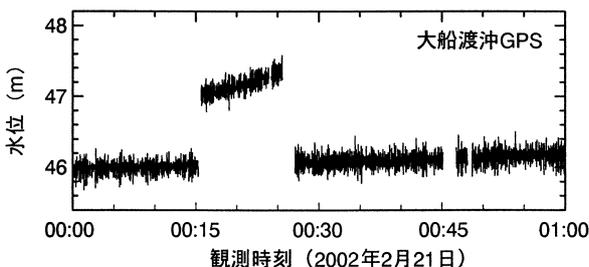


図-4 ミスフィックス事象の例

GPSブイを用いた観測では、測位精度とは別に、無線によるデータ欠落も生じ得ることに注意が必要である。無線断線の要因は、自然環境や海面反射もしくは航行船舶による遮蔽など様々な要因が考えられ、欠

落期間は、一般に、数秒から数分程度である。さらに、大型台風などの異常気象・海象時には断続的に無線断線する現象も確認されている。こうした無線断線に加えて、RTK-GPS測位精度に起因する欠落や、ミスフィックスによる欠落も考慮しなければならないので、データ欠落への対応が重要となる。特に、津波抽出のための短周期成分除去フィルターは、観測時刻の±60s（計120s）のデータを用いているため、1つでもデータ欠落があると、その影響は±60s（計120s）に及ぶ。このため、何らかの欠落データに対するデータ補完が重要となる。こうしたデータ補完の適用範囲を明らかにするため、数値的検討を実施した。

図-5は、津波第1波による偏差発生時に、破線に示すデータの仮想欠落を与え、各観測時以前の1時間のデータを用いて線形補完した場合の結果である。仮想欠落の個数は、120個のうち（サンプリング1.0s）それぞれ連続して、0個、30個、60個、90個とした。欠落個数が多くなるにつれて、抽出された津波波形上で、ひずみが徐々に顕著に現れる。同じような検討を、室戸沖GPSブイで観測された2004年東海道沖地震津波の際の波形記録に対しても行った結果、概ね、30個程度までの連続欠測であれば、抽出津波波形に現れるひずみは小さく、補完可能であると考えられた。

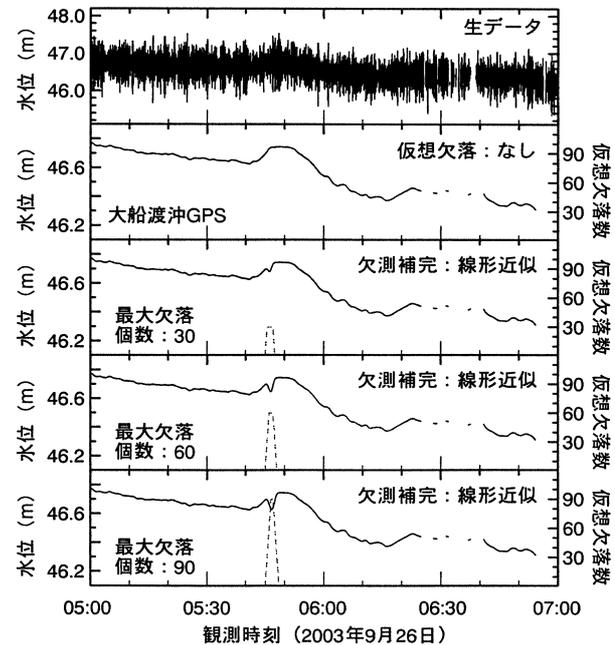


図-5 データ欠落個数による補完結果の比較

## 6. 津波波形抽出処理フロー

図-6は、以上の検討結果をふまえて提案する津波波形抽出処理フローを示したものである。このフローは主としてGPSブイを想定したものであるため、海象計などの海底設置式波浪計による場合は、測位信頼性評価やミスフィックス事象への対応部分は除いて考えることができる。なお、観測波形記録における異常値判定は、ナウファスの手法<sup>13)</sup>・<sup>14)</sup>を採用した。

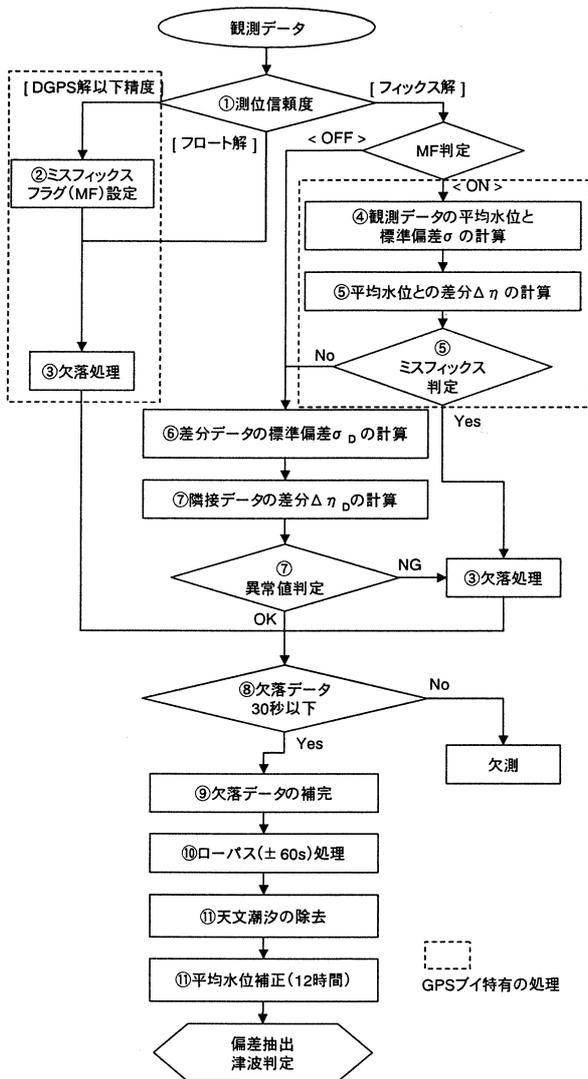


図-6 提案する津波波形抽出フロー

## 7. 津波成分即時抽出法の適用性に関する検討

本手法を適用した津波波形処理事例を、以下に示す。

図-7は、2004年9月6日に室戸沖GPSブイ（水深100m）および室津港沖ナウファス海底設置式波高計（水深27m）が捉えた2004年東海道沖地震津波波形記録である。すなわち、GPSブイでは1.0s間隔の、ナウファス波高計では0.5s間隔の水面の、それぞれの海面上下変動記録をもとにして、図-6に示すフローに従って津波抽出を試みた結果である。

この地震は、2004年9月5日23:57に発生したものであり、東海から四国に至る太平洋沿岸で、津波波形が観測された<sup>5)</sup>。この時の海況は、南方から台風0418号が徐々に接近していた高波浪状態であり、有義波高が3-4mであった。これは、下側の図のGPSブイ観測記録上段の生データを見ると、水面が最大8mもの範囲で変動していることから、理解できる。ただし、上の図に示すナウファス波高に示す生データとは、常時から運用されている長周期波抽出フィルター（図-1で長周期抽出フィルターと記載されたもの）を経た後

の、5s間隔の波形記録である<sup>10)</sup>。この時点におけるナウファスデータ収集システムは、0.5s間隔で切れ目なく海面の上下変動記録を取り続けるものではなく、毎偶数正時前後10分間については波浪解析用に0.5s間隔のデータ取得を行なうものの、それ以外の2時間毎の100分間については、長周期抽出フィルターを経た5s間隔の波形記録だけが蓄積されるシステムであったためである。

図-7から、①ナウファスで採用されている長周期フィルターでは、このような高波浪時には短周期成分を完全に除去することは難しく、20cm程度のノイズを伴う津波波形が抽出されていること、②ここで提案したハミングウィンドウフィルターを用いれば、目視上ノイズと評価される短周期水面変動はほぼ完璧に除去できること、が理解できる。なお、津波の第1波の最大偏差は、水深100mのGPSブイでは0:31に10cm、水深27mのナウファス波高計では0:32に22cmであった。

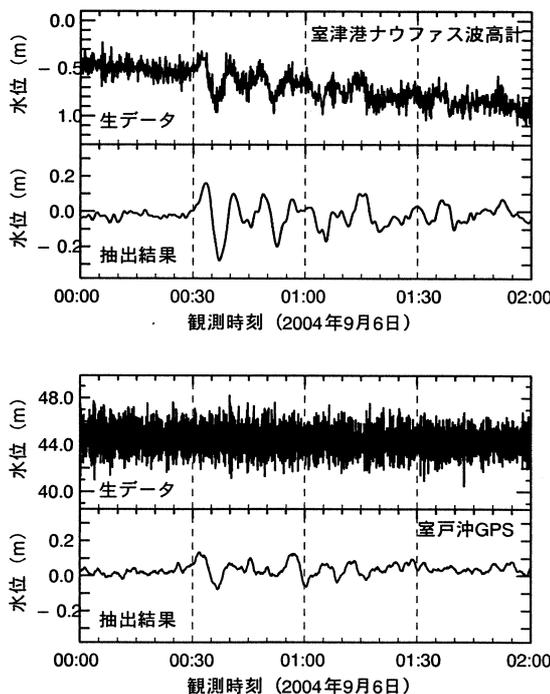


図-7 2004年東海道沖地震津波の観測例

図-8に、久慈港沖のナウファス海象計（水深50m）が捉えた2005年宮城県沖地震津波の観測結果を示す。この時の久慈港沖海象計は、新しいデータ収集方式の導入により、0.5s間隔で切れ目なく波形記録の収集が行なわれていた<sup>8)</sup>。この地震は、2005年8月16日11:46に発生したものであり、函館から銚子に至る広範囲で津波による海面変動が観測されている<sup>6)</sup>。

この時の海況は比較的静穏であり、有義波高は1m程度であったため津波の検出には好条件であったが、図-6で提案したフローによって、10cm程度の微弱な津波波形も、ほぼ的確に捉えることができた。

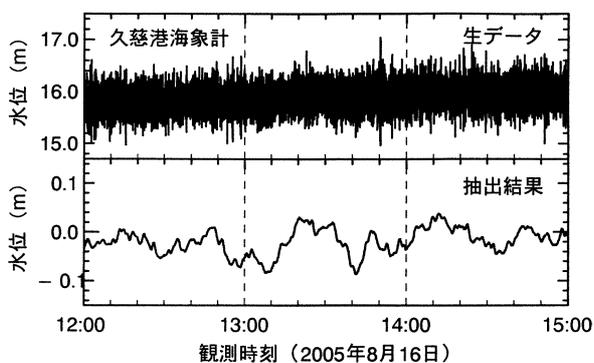


図-8 2005年宮城県沖地震津波の観測例

図-9は、極端な高波浪状態における波形記録を検討した事例であり、ナウファス既往最大有義波高14.21mを記録した台風0423号が室戸岬に近接した前後の、室戸沖GPSブイによる観測有義波高と図-6による津波偏差抽出結果を示したものである。10月20日の有義波高が概ね5mを超えている高波期間中を通じて、抽出偏差は30cmを超える値となっていたことがわかる。これは、台風によって発生した高潮偏差を、忠実に抽出したことによるものである。すなわち、台風通過時のように、極端な高波浪条件下で気圧低下による高潮偏差も同時に発生する場合には、本システムだけに依存する自動津波抽出は困難であり、高潮事象との識別は、人による確認が必要であることが、改めて示された。

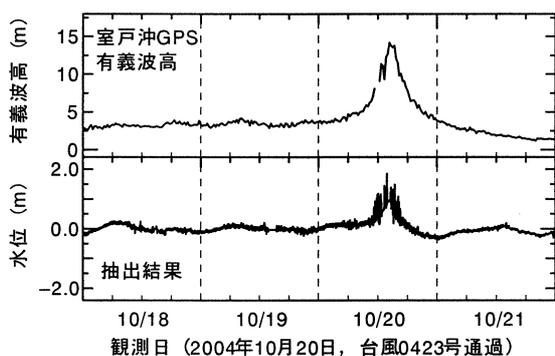


図-9 台風近接時における有義波高と抽出結果

## 8. おわりに

本稿では、津波警戒情報発信の基準となる長周期成分波形偏差の閾値<sup>4)</sup>についての検討結果をふまえ、波形記録中の風浪による短周期海面変動成分の除去にあたって、過去に観測された津波の周波数特性を考慮し、情報の即時性を確保できる数値フィルターを選定した。天文潮汐や異常潮位等の津波より周期の長い長周期成分の除去法に関しても、実用的な手法を提案した。さらに、GPSブイによる観測において、特に注意を要する、ミスフィックス事象やデータ欠落事象への対応についても考察し、沖合水面変動記録を用いた津波成分即時抽出アルゴリズムを提案し、過去の津波観測事例をもとに、その妥当性と適用範囲を検討した。

謝辞：沿岸波浪計を活用し沖合でのネットワーク津波観測を可能としたのは、国土交通省港湾局関係機関の多くの方々による長年の努力のたまものである。また、ここで紹介したGPSブイシステムは、東京大学地震研究所・(独)港湾空港技術研究所・(財)人と防災未来センターおよび日立造船(株)が、文部科学省の補助金を得て開発したものであることを紹介し、ここに改めて謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 永井紀彦・橋本典明・浅井正：平成5年北海道南西沖地震津波波形記録解析速報，港研報告第32巻第4号，pp.51-97，1993.
- 2) 永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義：平成6年(1994年)北海道東方沖地震津波の特性，港研資料No.802，97p.，1995.
- 3) 小舟浩治・永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義：1996年イリアンジャヤ地震津波の特性，港研資料No.842，96p.，1996.
- 4) 永井紀彦・小川英明：平成15年(2003年)十勝沖地震津波波形の特性，港湾空港技術研究所資料No.1070，92p.，2004.
- 5) 永井紀彦・里見茂：2004年東海道沖地震津波の観測結果，港湾空港技術研究所資料No.1096，22p.，2005.
- 6) 永井紀彦・里見茂：2005年宮城県沖の地震津波の観測結果，港湾空港技術研究所資料No.1119，35p.，2006.
- 7) 永井紀彦・小川英明・寺田幸博・加藤照之・久高将信：GPSブイによる沖合の波浪・津波・潮位観測，海岸工学論文集第50巻，土木学会，pp.1411-1415，2003.
- 8) 永井紀彦・小川英明・額田恭史・久高将信：波浪計ネットワークによる沖合津波観測システムの構築と運用，土木学会，海洋開発論文集第20巻，pp.173-178，2004.
- 9) 永井紀彦・加藤照之・額田恭史・泉裕明・寺田幸博・三井正雄：沖合・沿岸・オンサイト観測を組み合わせた津波観測網に関する提言，土木学会，海洋開発論文集第21巻，pp.61-66，2005.
- 10) 永井紀彦・橋本典明・川口浩二・佐藤和敏・菅原一晃：ナウファスの連続観測化による我国沿岸の長周期波の観測，港湾技術研究所報告第38巻第1号，pp.29-69，1999.
- 11) 沿岸技術研究センター：港内長周期波影響評価マニュアル，沿岸技術ライブラリーNo.21，86p.，2004.
- 12) 岩崎峯夫：デジタルフィルターを用いた津波計，カイジョー技報，Vol.2，No.4，(株)カイジョー，pp.51-58，1996.
- 13) (財)沿岸開発技術研究センター：沿岸波浪・海象観測データの解析・活用に関する解説書，181p.，2000.
- 14) 合田良実監修，海象観測データの解析・活用に関する研究会編集：波を測る(沿岸波浪観測の手引き)，(財)沿岸技術研究センター，212p.，2001.