

2011年東北地方太平洋沖地震津波の観測による田辺湾の共振現象

岸本 治*・馬場 康之*・久保 輝弘*・東 良慶*・平石 哲也*

Characteristics of Harbor Oscillation in Tanabe Bay due to 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami

Osamu KISHIMOTO*, Yasuyuki BABA*, Teruhiro KUBO*,
Ryokei AZUMA* and Tetsuya HIRAIISHI*

Abstract

The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami caused huge Tsunami along the Pacific Coasts including Shirahama located almost 1,000 km far from epicenter. The offshore GPS buoy, Shirahama Observatory (Kyoto University) and Katada tidal station (Metrological Agency) located near the Tanabe bay in Wakayama prefecture obtained clear tsunami profiles at each location. The tsunami profiles obtained in those stations showed the amplification by natural oscillation in the bay. The characteristics and continuous time becomes important to predict the evacuation plans preventing the future tsunami events in the Tanabe bay. The paper shows the profiles of tsunami obtained in the Tanabe bay and discusses their amplification modes, interval and long-term characteristics.

キーワード：津波，観測，波形解析，グリーン公式，避難計画

Key words : tsunami, observation, wave analysis, green function, evacuation planning

1. はじめに

2011年3月11日14時46分に宮城県三陸沖を震源とするマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震津波が発生した。この巨大地震は国内観測史上

最大の地震となり、これにより発生した津波は東北地方太平洋側沿岸部を中心に甚大な被害をもたらし、日本国内のみならず北米、南米、オセアニアといった環太平洋地域で津波が観測された。国

* 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

本報告に対する討論は平成25年2月末日まで受け付ける。

内では東北地方の沿岸地域における観測で沖合津波高8 m以上、最大遡上高さで40mを越すところもあり、四国でも3 m弱の津波が観測されている (Mori, N etc., 2012)。紀伊半島田辺湾でも京都大学高潮観測所において水位変動を観測し、その観測値は田辺湾の地形影響を大きく受けていた。これらの津波高は局地的な地形の影響を強く受けており、その特性を把握しておくことは、今後の南海・東南海地震時の危険予知に大きく貢献できる。そこで、和歌山県田辺湾沖の国土交通省所有するGPS波浪計および田辺湾口に位置する京都大学が管理する中島高潮観測塔、さらに湾内の気象庁堅田検潮所のデータを同時に解析し湾内での津波特性や津波の持続時間等について考察を行った。

2. 観測システムの概要

2.1 GPS 波浪計

震源付近での検潮所の観測値はないけれども、国土交通省が我が国の沿岸約20km 沖合に設置を進めている全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) (河合ら, 2012) の沖合観測装置 GPS 波浪計から得られた各地点の観測データは震災後回収が進められており、沖合で観測された津波波形データが順次公開されている。本研究では田辺湾沖合に設置されている GPS プイのデータを用いた。

GPS 波浪計は海岸から概ね20km, 水深約200mの海面に、GPSを搭載したプイを係留した観測機器である。2008年から導入されたものでプイの上部に搭載したGPSでRTK方式(予め正確な高度の分かっている陸上局を基準としてGPS波浪計の相対的な高度を計測する方法)により1秒毎に高度を計測するシステムである。図1にGPS観

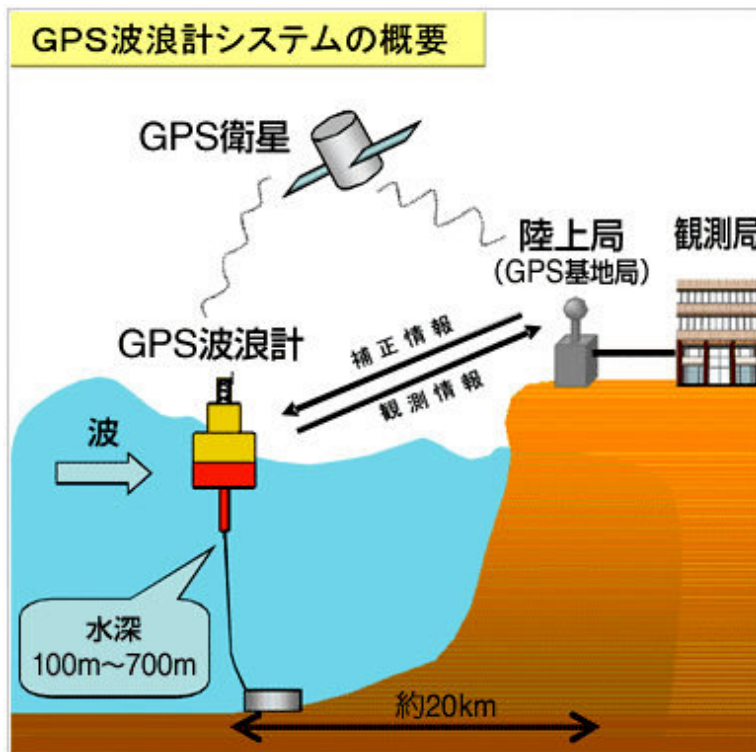


図1 GPS 波浪計のイメージ

測のイメージ図を示す。電波環境が良いとその鉛直方向の誤差の標準偏差は離岸距離が20 km でも数 cm と小さい。

田辺湾沖での沖合観測のデータはNOWPHASの和歌山南西沖(和歌山白浜沖)GPS波浪計の観測データを用いた。和歌山南西沖GPS波浪計は北緯33°38'32", 東経135°09'24", 水深201mの海面に位置しており, 平成19年12月に設置され, 現在では気象庁でも活用されている。

また, 和歌山県の田辺湾周辺地域には浅海域の田辺湾湾口に位置している京都大学白浜海象観測所田辺中島高潮観測塔, 田辺湾の湾奥沿岸部に位置する気象庁堅田検潮所と3つの観測点がある。同じ海域の津波解析を水深が異なる3地点で, 行うことができる場所は希少であり, 平石ら(2011)は2010年チリ地震津波で3地点での観測データを利用した田辺湾の増幅特性を検討している。図2に3地点の位置相関を示す。

しかし, 遠地から到達したチリ地震津波では, 津波の波高が小さく, 精度の高い検討とはいえない。本研究では, 2011年東北地方太平洋沖地震津波で観測された津波波形をもとに増幅特性を検討する。

2.2 京都大学での観測

京都大学防災研究所白浜海象観測所は, 1966年に開設されて以降, 田辺湾口沿岸から約1.5 km, 水深約30mに設置された田辺中島高潮観測塔を用いて沖合で継続した観測が行われている。田辺中島観測塔には上部に設置したソーラーパネルとバッテリーを電源に, 風速・風向計, 日射計, 気温・湿度・気圧計, IRT(赤外線を利用して水温を測る装置), 波高計, 水圧式潮位計, 水温計(5 m, 10mに設置)と様々な観測機器が設置されており, 共同研究にも利用されている。これらの観測データは約4 km離れた田辺湾の湾奥にある観測所に無線LANで送信され, 観測所では多くのチャンネルでモニタリングすることができるようになっている。

2.3 気象庁での観測

気象庁和歌山地方気象台堅田検潮所は田辺湾の湾奥部, 堅田漁港付近に設置されている。観測機器にはフロート式検潮儀を用いている。フロート式検潮儀は検潮所の井戸の中に浮きを浮かべて, 海水面の上下動に合わせて上下する浮きの動きを井戸上に設置した測定器で計測するものであり,

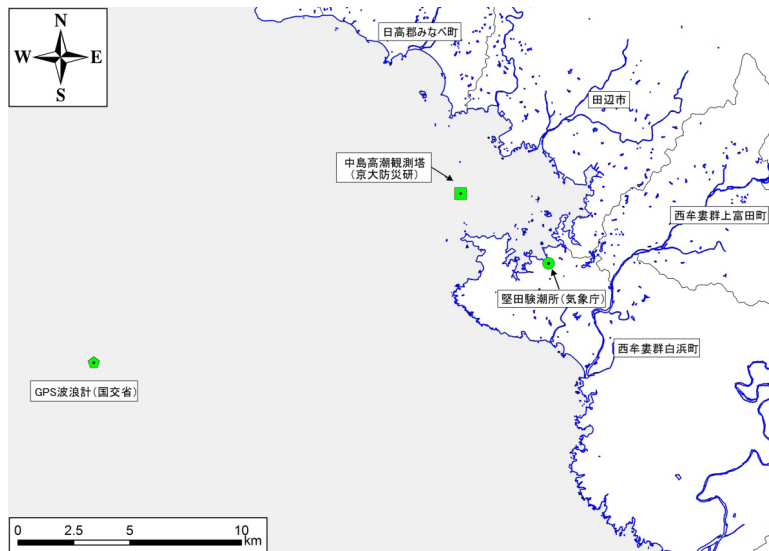


図2 3観測地点の位置

最も古くから使われているタイプの検潮儀で、全国の多くの検潮所で使われている。堅田検潮所は京都大学白浜海象観測所が管理する中島高潮観測塔から直線距離にして約 5 km 離れた位置にある。本研究では、沿岸部における津波波形や田辺湾内における地形の影響等を調べるために用いる。

3. 田辺湾における津波波形

3.1 観測データの特性

観測されたデータのサンプリング間隔は3地点で異なっており、GPS波浪計では5秒間隔、観測塔では1秒間隔、検潮所では15秒間隔でデジタルデータが取得されている（気象庁和歌山气象台による）。

NOWPHAS の GPS 波浪計データは、公開時に予め潮位成分が抽出されており、チリ地震時に比べて、今回の津波の規模は大きく、津波成分もはっきりしているため、入手したデータをそのまま活用する。観測塔と検潮所のデータについては、波浪成分が含まれた潮位データとなっている。短周期の波浪成分を含む潮位データから長周期の津波成分を抽出する方法として、もとの潮位データから「30分の移動平均を5回行った値」を

引いた偏差が適していることを平石ら（2011）が検討しており、これを用いて観測塔と気象庁の潮位データを計算する。

解析したデータの期間は、地震発生前の約2時間46分前2011年3月11日12時00分00秒から沖合観測のGPS波浪計データで津波が収まったと考えられる2011年3月12日23時59分55秒までとした。図3から図5までに示す3地点での津波観測波形グラフでは、縦軸の潮位データの範囲を-150cm～150cmとし、横軸は1目盛を1時間としている。

3.2 和歌山南西沖 GPS 波浪計での観測結果

図3はNOWPHAS和歌山南西沖GPS波浪計で観測された津波波形である。GPS波浪計では、初動が16時04分で、3月11日14時46分の地震発生から1時間18分後に見られた。最大波は初動時刻から34分後の16時38分に到達した第1波で波高は32.6cmである。

この波形を見ると1時間を超えるような長い周期の波が10時間ほど続いていることがよく分かり、津波がほとんど地形の影響などを受けずに伝わり、減衰していないことが分かる。12日の9時00分頃にもう一度波が高くなっているが、12日の終わりには潮位の変化がほとんど見られなくなった。

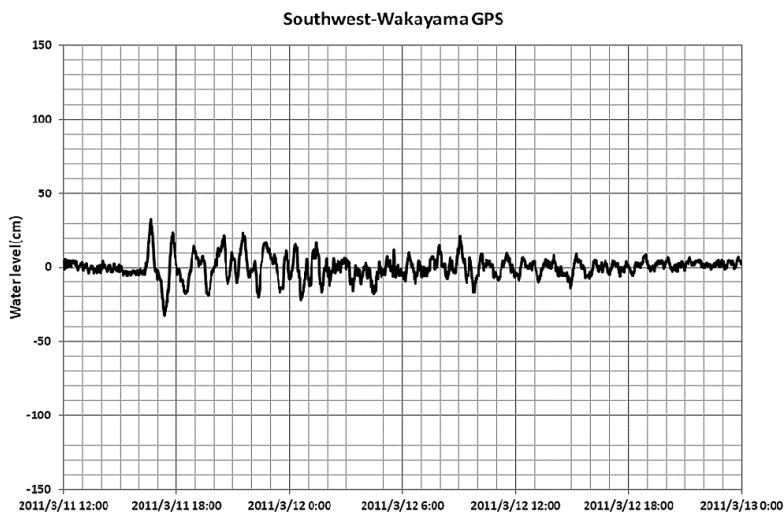


図3 和歌山南西沖 GPS 波浪計津波波形

3.3 田辺湾中島高潮観測塔での観測結果

図4は京都大学白浜海象観測所が管理する田辺湾内の中島高潮観測塔で観測された津波波形である。観測塔では初動が地震発生から1時間28分後、GPS波浪計の観測から10分後の16時14分に見られた。最大波は初動時刻から1時間54分後に到達した第2波で、波高は49.4 cmであった。

観測塔では、12日2時から4時までの時間帯と12日の10時から11時までの時間帯を除いて、同じ周期をもつ波が継続していることが波形から分かる。最初の到達から12日2時頃までは1時間を超すような長周期の波の中に、わずかに30分から40分くらいの周期の波が混在しており、12日の4時以降は10時から11時までを除いて周期が30分から40分程度の波が20 cmから30 cmの波高で継続している。

GPS波浪計や検潮所に比べて、11日に見られる波の形が規則的でないことを見ると、津波の影響が残っている時間帯では、湾口では沖合からの津波や紀伊水道による影響と湾内からの田辺湾による影響のどちらもが顕著に現れているのではないかと考えられる。

3.4 堅田検潮所での観測結果

図5は気象庁和歌山地方気象台堅田検潮所で観測された津波波形である。検潮所では、初動が地震発生から1時間33分後、GPS波浪計での観測から15分後、観測塔での観測から5分後の16時19分に観測された。最大波は地震発生から約10時間後、田辺湾周辺地域でGPS波浪計が初動を検知してから8時間以上経った3月12日0時35分に観測され、その波高は113.27 cmである。この最大波観測時刻と波高は気象庁の発表とほぼ一致する(気象庁, 2011a)。

検潮所では第1波から80 cm程度の波高で周期が30分程度の波が到達後ずっと継続して増幅、減衰を繰り返しており、最大波もその過程で観測されている。12日の10時頃をピークにそれ以降は湾内でも徐々に減衰している。周期はほとんど変動のない状態で続いていることから、検潮所に到達した波には田辺湾の地形による影響が大きく現れており、湾内の固有周期で振動が生じたものの周期は津波による周期よりも顕著に短くなることがあると考えられる。

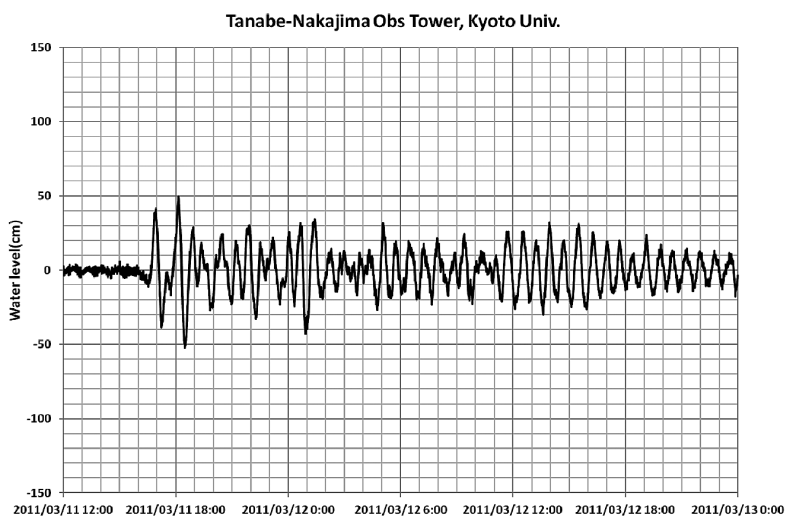


図4 田辺湾中島高潮観測塔での津波波形

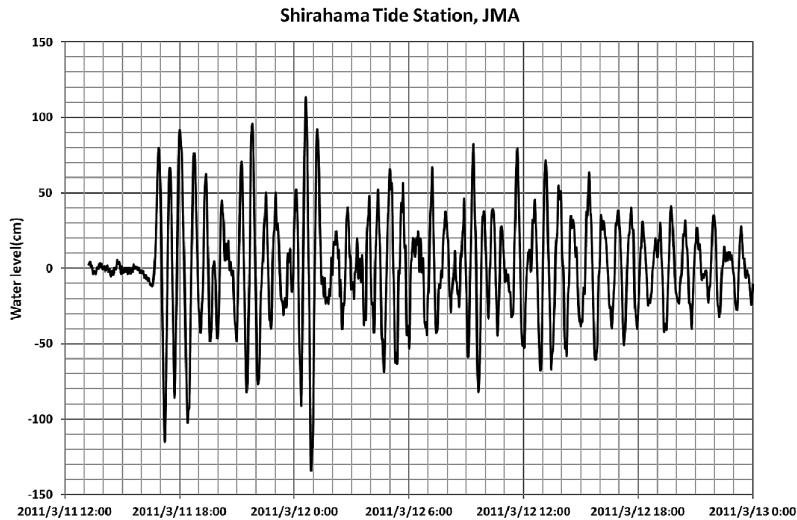


図5 堅田検潮所での津波波形

3.5 津波波形の抽出

田辺湾周辺にある3地点での観測波形を比較するにあたり、それぞれの観測データのサンプリング間隔を統一する。津波の成分は長周期の波であり、短時間のデータの除去は大きく影響しない。そのため短周期の波浪成分を取り除いた潮位偏差データにした後、3地点で最もサンプリング間隔が長い検潮所データの15秒間隔を採用し、GPS波浪計と観測塔のデータを検潮所データと同様に3月11日12時00分00秒から12時00分15秒、12時00分30秒、…として、15秒おきのデータを抽出し、これをもとに3地点の比較を行うこととする。

3.6 ゼロアップクロス法を用いた比較

これまでは各地点の観測波形のグラフから主に目測で値を読み取ることで考察してきたが、ここでは観測波形からゼロアップクロス法を用いて津波を定義し、その各波についても最高水位と周期のデータから比較を行う。沖合のGPS波浪計の観測波形において、津波の影響が大きいと思われる長周期の波が続いている時間帯は3月12日2時頃までである。また、検潮所で最大波を観測したのは12日の0時35分である。

これらが含まれることを考慮して、解析に用い

る津波はそれぞれ第15波までとした。各図の棒グラフが各波の最高水位で左側の縦軸、折れ線グラフが周期で右側の縦軸を用いて値を表している。

図6はGPS波浪計の第1波から第15波までの水位と周期である。これを見ると、水位と周期ともにほとんど右肩下がりとなっており、沖合では第1波から水位は徐々に減衰していること、周期は徐々に短くなっていることが読み取れる。直前の波より水位が高くなる第6波、第8波、第10波、第12波を見ると、水位が高いと周期も長くなっていることが明らかであり、また水位が顕著に低く、周期が3分程度と極端に短い第13波は津波成分というよりは波浪成分が含まれているのではないかと考えられる。

図7は観測塔の第1波から第15波までの水位と周期である。観測塔では第1波に津波の成分と思われる長周期の波が到達した後、周期が30分程度から1時間程度の波が交互に何度も到達しており、波高も第12波までは15cmのものもあれば30cmのものもある、というようにGPS波浪計のように徐々に減衰することはなかった。波高と周期に相関があるとは言えないが、どちらも湾口では沖合からの津波成分の波と湾内の増幅による振動を受けた波の両者の影響を強く受けていること

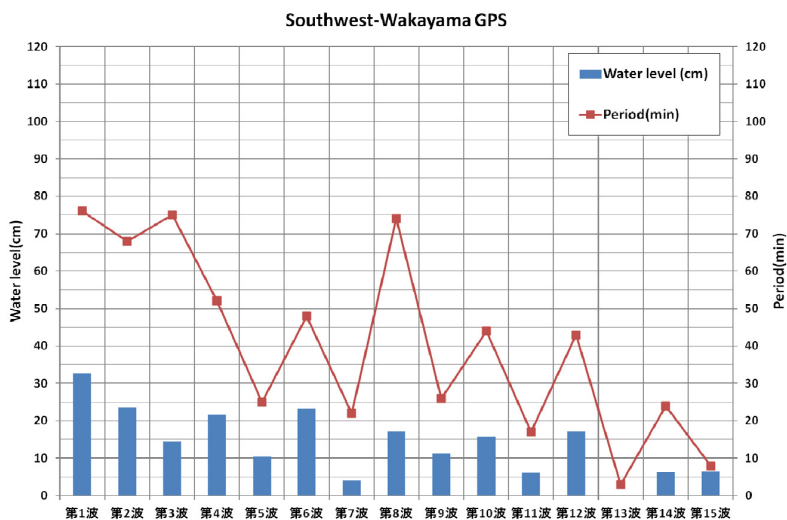


図6 ゼロアップクロス法による津波解析 (GPS 波浪計)

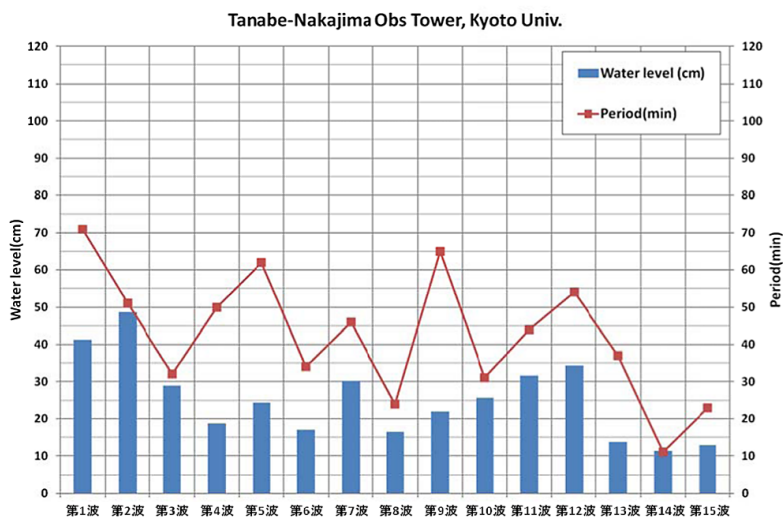


図7 ゼロアップクロス法による津波解析 (中島高潮観測塔)

が読み取れる。

図8は堅田検潮所における第1波から第15波までの水位と周期である。検潮所では第1波から第15波までほとんど20分から40分程度の周期の波がずっと続いており、田辺湾内で増幅される成分はほぼこの時間内の周期に含まれるのではないかと考えられる。水位についても第6波、第8波、第

13波を除いてほぼ50cm程度あるいはそれ以上の水位が続き、第10波や第15波のようにある程度時間が経ってからもそれまでよりも高い波が来るため、湾内の沿岸部では長時間にわたって警戒する必要があることが分かる。

図9はGPS波浪計、中島観測塔、堅田検潮所での観測波形を、それぞれゼロアップクロス法に

より津波の周期を数え、それらの時間帯を度数分布により表したものである。比較した波は3月11日の第1波から3月12日0時00分までに到達していたものである。この図から、検潮所では31分から40分の周期の波が最も多く、観測塔では41分から50分程度の周期の波が最も多く分布していた。GPS波浪計では、図9で見られるような水位が低

く、周期が短い波が数えられてしまうため0分から10分の周期の波が多くなったと考えられる。71分から80分の周期はGPS波高計と中島観測塔での沖合の観測点での分布が高いことから、この周期帯が津波そのものの影響を受けた振動であると考えられる。

一方、検潮所ではこの時間の周期の波は全くな

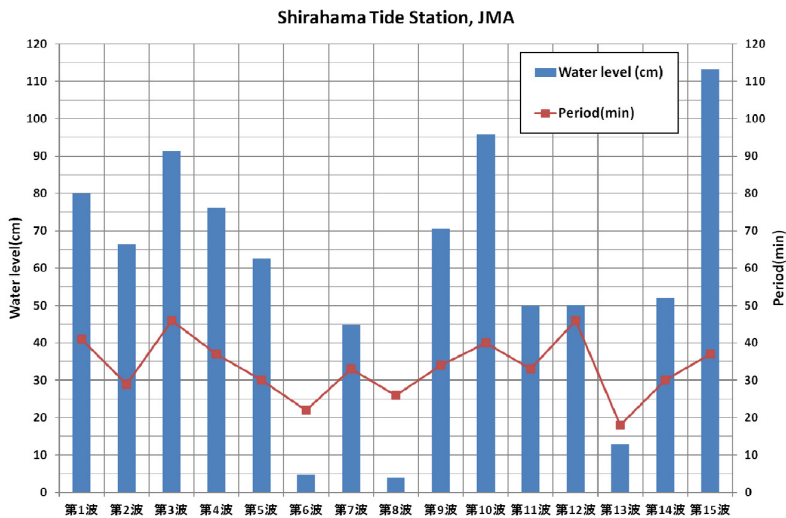


図8 ゼロアップクロス法による津波波形（堅田検潮所）

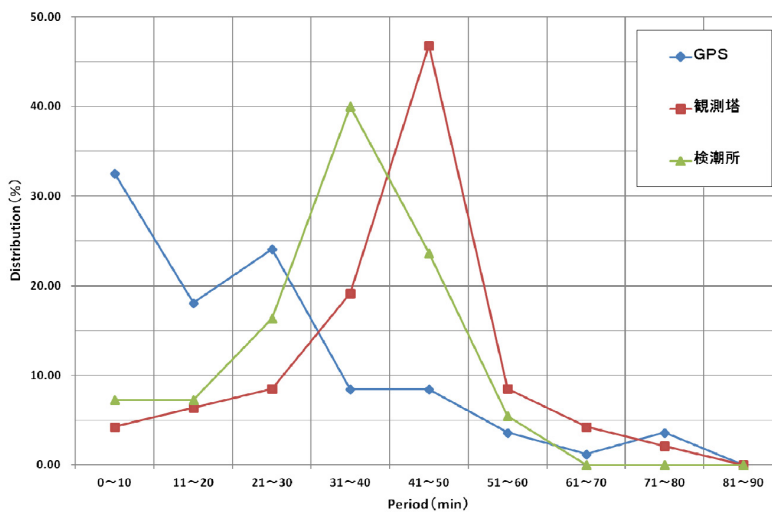


図9 津波周期の頻度分布

いため、湾内では長周期の波は全く消失し、反射等の影響により湾の形で決まる固有振動に近い短周期の波成分が増幅されることが読み取れる。

3.7 3地点での到達時間の比較

3地点での観測データから到達時間に着目すると以下ようになる：

津波の初動時刻は3月11日16時04分に沖合のGPS波浪計、それから10分後の16時14分に湾口の観測塔、15分後の16時19分に沿岸部の検潮所となった。

第1波のピークについては、16時38分にGPS波浪計、その18分後の16時56分に観測塔、GPS波浪計から15分後の16時53分に検潮所で観測されている。

和歌山県の東南海・南海地震津波の浸水シミュレーション(防災わかやま(2011))による第1波のピーク到達予想時間は田辺湾内では22分となっており、今回の震災のように地震発生後3分で気象庁からの第1報が発表された場合、18分後には中島観測塔で実際にピークが観測されるので、残りの4分間で、沿岸部にどの程度の津波が押し寄せるのかという詳細情報が分かる手助けとなる。湾内では津波の影響は長時間残り、最大波が初期波到達後長時間して現れることは、検潮所データだけでなく、沖合、湾内のどちらの影響も受ける観測塔データでも確認することができる。したがって、湾内の危険度を避難場所において目測よりも正確に確認するためには、観測塔や検潮所のデータは有効であると考えられる。さらに沿岸部に比べて津波が低い観測塔では検潮所よりも津波に対する耐久性があると考えられるため、ここでの長時間のモニタリングは重要である。

4. 田辺湾の増幅率の検討

4.1 津波波形のスペクトル特性

観測波形やゼロアップクロス法を用いた3地点の比較により、津波の波高や周期の関係性がある程度知ることができた。さらに詳しく津波成分の特性を知るために、外海からの津波の影響が強く残っていると考えられる3月11日16時00分から3

月12日09時00分の期間で周波数スペクトル解析を行う。スペクトル解析には、エクセルの分析ツール「フーリエ解析」を用いる。

図10は解析結果である。図中の紫の矢印の周波数は、沖合から沿岸に向かって振幅スペクトルが順番に増大していることから、今回の津波の卓越周波数に起因するピークと考えられ、これを周期に直すと、68分(4,096秒)、54分(3,234秒)、49分(2,926秒)となっている。図中の赤の矢印の周波数は沖合のGPS波浪計が観測していないことから、田辺湾の固有振動周波数と考えられ、これを周期に直すと、41分(2,458秒)、38分(2,276秒)、35分(2,119秒)に相当する。青の矢印の部分は周期32分(1,920秒)である。周期は田辺湾の固有振動に近いが、エネルギースペクトルが観測塔よりもGPSの方が大きいため、増幅されたとは言えず、何の影響を受けているのかは再度検討する必要がある。

4.2 スペクトルから判断できる田辺湾での増幅率の検討

前節までに津波波形の考察とスペクトル解析による卓越周期の考察を行った。その結果、沖合の深海域、湾口の浅海域、沿岸部での観測データには津波の成分に加えて、田辺湾の固有振動等の影響が顕著に表れていることが分かった。これらを踏まえて、沖合から沿岸にかけての増幅率についてグリーンの公式(堀川, 1973)と、観測波形の中で津波の影響が大きいと考えられる部分の観測値を用いた代表増幅率とスペクトル解析で津波成分と思われる部分の振幅スペクトルの増幅率を検討し、田辺湾の副振動の有無を考察する。また沖合観測による予想津波高を考える場合に用いる理論値と観測値の検証を行う。

4.3 グリーン公式の導入についての検討

沖合から沿岸にかけての増幅率を理論的に求めるときに、水深と湾の地形を用いて計算するグリーンの公式を用いる。

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \left[\frac{h_2}{h_1} \right]^{\frac{1}{4}} \left[\frac{b_2}{b_1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

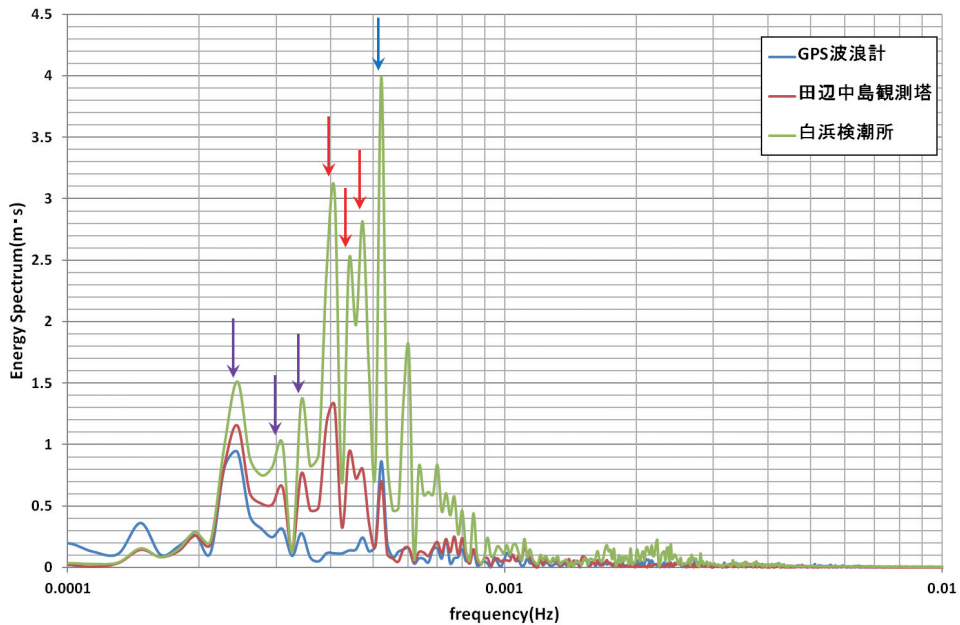


図10 津波周期のスペクトル解析（ピーク周期に矢印を示す）

ここに、

- η_1 : 沿岸（湾口）における波高
- η_2 : 湾口（沖合）における波高
- h_1 : 沿岸（湾口）における水深
- h_2 : 湾口（沖合）における水深
- b_1 : 沿岸側の幅
- b_2 : 沖合側の幅

であらわされる。

グリーンの公式を適用するに当たり、湾口と沿岸ではその幅が定義される。しかし沖合と湾口、沖合と沿岸では沖合の幅を定義することはできない。そのため沖合と湾口で公式を適用する場合、両者の幅の比を1として、水深のみの比による検討を行う。次に沖合と沿岸の幅の比を考える場合、これには沖合と湾口、湾口と沿岸の2つの比を組み合わせる。すなわち沖合の幅は湾口の幅とみなし、湾口と沿岸の比を採用する。なお、気象庁の津波予測でグリーンの公式を用いる場合、沿岸部での水深を1 mとして計算しているが、今回は堅田漁港の平均水深5 mを堅田検潮所での水深とした。

4.4 海岸での増幅とグリーン公式との比較

図11は3地点の観測波形を並べたものである。この中で津波が増幅したと考えられる時間（図中の観測所で最大波を観測したAライン、検潮所で最大波を観測したBライン、12日のGPS波浪計で最大波を記録したCラインの3本）について代表増幅率を採用する。

図12は沖合を基準とした場合のグリーンの公式と観測波形の中から選んだ代表増幅率との比較である。これを見ると、沖合のGPS波浪計を基準とした場合、グリーンの公式による沿岸の増幅率と検潮所での最大波が観測された時の代表増幅率は約7.2倍でほぼ一致する。次に湾口の観測塔を基準とした場合のグリーンの公式と観測波形の中から選んだ代表増幅率との比較を図13に示す。この場合、グリーンの公式による理論値は4.5倍、観測値は3.5倍程度となっており、実際に沖合観測による予報値を出す場合、観測塔から算出する値の方がやや安全側になって出すことができると考えられる。ただし、グリーンの公式はエネルギーが保存されることを前提とした式であり、反射や

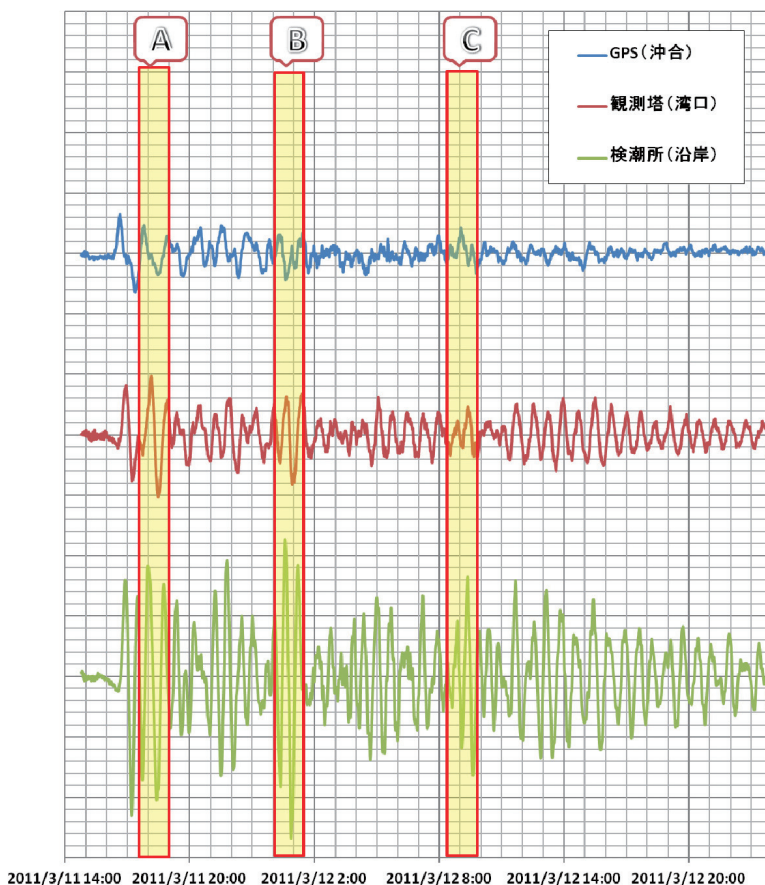


図11 観測点の波高を比較した時間帯

屈折が生じる局所的な地形の影響は考慮できない。したがって、推定値の誤差も大きく、数値の信頼度については今後も引き続き検討していく。

次にスペクトル解析の結果で今回の津波の卓越周波数とみられる図10の紫の矢印で示した周波数を左からNo. 1, 2, 3として、この3つに紫ついでの沖合のGPSを基準とした場合の増幅率とグリーンの公式による検潮所における増幅を比較したものを図14に示す。これによると検潮所で最も高くなるNo. 3の周波数では5.0倍弱となり、グリーンの公式で津波の影響による波の増幅率はカバーできることが分かる。

同様に、湾口の観測塔を基準とした場合の、スペクトル解析から求めた振幅とグリーンの公式との比較を図15に示す。こちらでも観測波形から求

めた代表増幅率と同様に、沖合観測による予報値を出す場合、沖合のGPSに比べて安全側に立った値を算出することができると考えられる。これに加えて、気象庁のように沿岸の水深を1 mとしてグリーンの公式を適用すると、さらに安全側の予想津波高を算出することができるため、予想津波高の算出にGPS波浪計と田辺中島高潮観測塔は有効であると考えられる。

5. 増幅特性を用いた地域防災への観測施設の活用

5.1 東北地方の教訓をもとにした白浜での避難行動

ここでは、これまでの観測情報を有効に今後の地域防災に生かすための教訓を示し、観測情報の

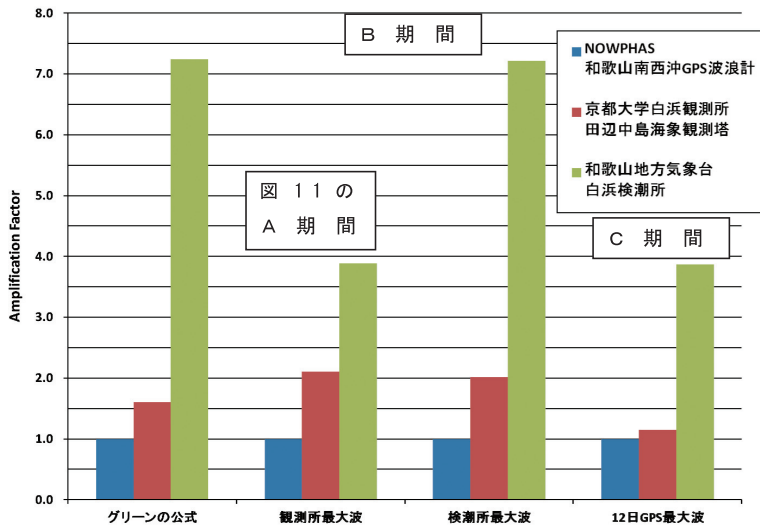


図12 GPS 波浪計の値を基準とした増幅率

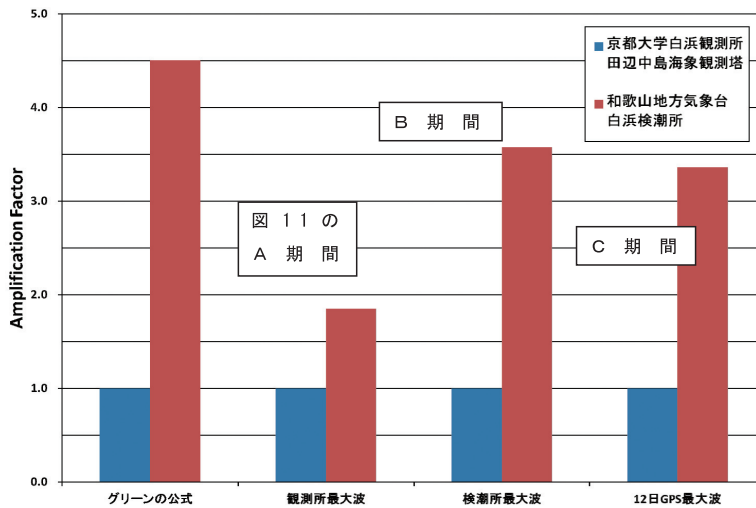


図13 中島高潮観測塔を基準とした増幅率

重要性を検討する。

東北地方太平洋沖地震発生時、和歌山県田辺市や白浜町では震度1の揺れを観測した(気象庁2011b)。地震発生から3分後の14時49分、気象庁の第1報で和歌山県の沿岸には津波注意報(予想津波高0.5m)が発表された。その後、15時30分に津波警報(津波)(予想津波高2m)、16時08

分には津波警報(大津波)(予想津波高3m)へと修正が行われ、翌12日13時50分に津波警報(津波)、20時20分に津波注意報へと切り替わり、地震発生から2日後の13日17時58分に注意報も解除された。なお、この13日17時58分には全国すべての沿岸地域の警報・注意報が解除されている。

京都大学白浜海象観測所周辺地域での地震発生

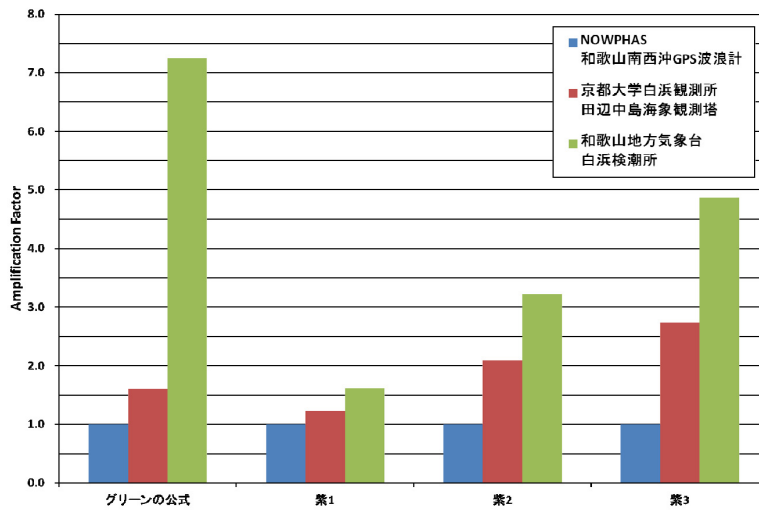


図14 グリーンによる簡易式とスペクトル解析による増幅率の違い（GPS 基準）
（紫1, 2, 3はそれぞれ図10のピーク周期に相当する）

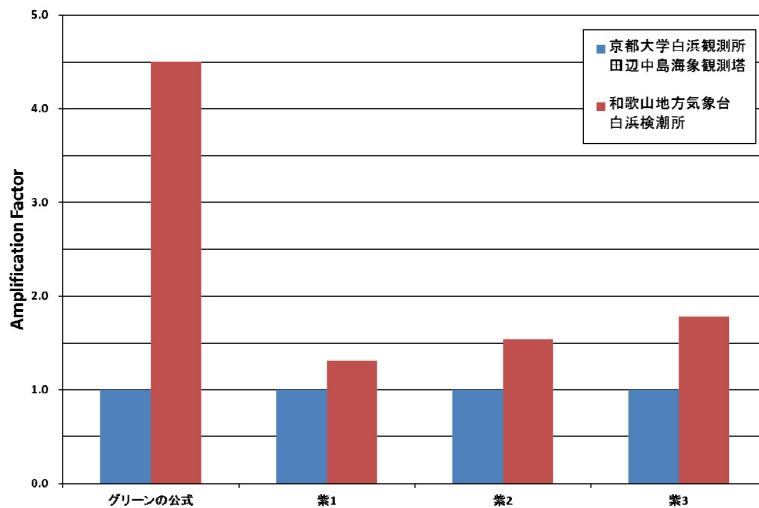


図15 グリーン公式による簡易式とスペクトル解析による増幅率の相違
（紫1, 2, 3はそれぞれ図10のピーク周期に相当する）

時の避難の実態を調べるため、白浜海象観測所、観測所前の住宅、近傍の堅田の釣り堀、堅田漁港、堅田保育園の計5地点で、当日の避難行動についてヒアリングを行った。ヒアリング地点の位置関係を図16に示す。以下、その証言を記す。

(1) 白浜海象観測所

観測所の技官久保氏にヒアリングを行った；地震発生時、車を運転しており発生的事实を知らないまま観測所へ戻った。この時、来客があり地震があったことを知らされ、インターネットで津波警報等の情報を入手した。第1波到達予想時刻まで多少の余裕があったため、観測船係留棧橋へ行



図16 白浜海象観測所周辺でのヒアリング位置
(国土地理院1/25,000電子地図に加筆)

き、係留ロープの締め直し、長さの調整等津波来襲に向けた準備を行った。この時点で携帯電話から大津波警報を確認した。栈橋での作業終了後、県道33号南紀白浜空港線沿いにある細野港の奥の水門付近へ自動車での避難すると、既に水門の閉鎖が完了されており、住民、町役場職員、消防、テレビ局等の人々が避難していた。この時、県道33号線では交通規制は行われていなかったが、避難場所付近では、海面を見ながら通行する車両や路肩へ停車する車両などにより、小規模な渋滞が発生していた。

なお、国道42号線については交通規制が行われていた。津波到達後、観測船の確認に向かうと引き波時に船首が完全に着底したことが確認できた。船尾側は着底していなかったため、観測船そのものや栈橋への被害は見られなかった。その後はもう一度水門付近へ移動した後、大きな海面変

動がなくなったのを確認しつつ、観測所へ戻った。

(2) 観測所前の住宅

観測所前に居住しておられる住民の方にヒアリングを行った；津波の警報はテレビから知った。幼少時に経験した1946年の南海地震時には、家が床上浸水しており、安全な避難場所まで避難した方がいいが、避難場所はとても遠くて行けないので自宅の裏山へ上がった。裏山は非常時に上がるように普段から草刈りなどの整備をしている。避難して山上にいる途中で食べ物等必要なものがあると、一時的に自宅に取りに帰っていた。

(3) 堅田の釣り堀

釣り堀を管理しておられる職員の方にヒアリングを行った；この釣り堀では、養殖いかだ等津波

による被害は見られなかった。地震発生時は警報を受け、堅田のとれとれ市場に移動した。とれとれ市場は高台にあるので普段からそこに避難することに決めているが、その途中の道路ではしばしば落石が見られ、南海地震の時には実際に通行できるかどうかは分からない。津波の時は遠くからの目視で付近の海面が1 m程下がったように見られ、危ないのではないかと思った。震災以降、客に向けた地震発生時の避難の看板等を設置することにした。

(4) 堅田漁港

漁協組合の方にヒアリングを行った；当日は堅田のとれとれ市場に避難した。堅田の漁港では2010年チリ地震津波の時のような浸水等の被害はあまり見られなかったと思う。漁港付近では一度水位がかなり下がった。

(5) 堅田保育園

当日勤務されていた保育園の先生から電話でヒアリングを行った；保育園には園児68名、職員21名がいる。3月11日は揺れを感じ、テレビで地震発生と津波注意報を知った。その後、時間をはっきり覚えていないが順次保育園の前の避難通路を通して最上段にある広場まで6人乗りの手押し車や4人乗りのベビーカーを使い園児を避難させた。避難場所と保育園前の道路に職員が待機し、トランシーバーで連絡を取った。迎への保護者が来た順に園児を下し、帰宅させた（全員の帰宅が完了した時間は不明）。自主的に避難したため避難指示のような連絡があったかどうかは覚えていない。

5.2 地域防災への沖合観測の活用

将来予想される東海・東南海・南海地震でも広範囲に巨大津波が押し寄せ、避難・復旧の長期化や過疎地域での被害、物流の停止といった東日本大震災と同様の甚大な災害になることが考えられる。とりわけ市町村再編による職員・専門家の不足、支援物資の不足や避難所での長期化生活といった自治体や地域が関わるような問題も非常に

多くなると考えられる。東日本大震災では「想定外」という言葉をしばしば耳にするが、今回の震災で数多く出た問題点は事前の取り組みで解消できることもあり、地域防災を見直すきっかけが多くあると考えられる。

ここまで示したNOWPHASによる津波波形解析、田辺湾での浅海域や沿岸部での増幅特性と本章における東日本大震災における避難行動や地域防災の現状を踏まえ、地域防災への沖合観測の活用方法を論じる。

今回の東日本大震災では、測定範囲を上回るほどの巨大地震によって気象庁の津波の予報システムが本来の能力を発揮できず、予想津波高の過小評価や修正発表の遅れといった事態が生じたため、沿岸地域の人々の避難行動の遅れや判断の迷いに繋がり被害が大きくなった（気象庁2011c）。また、巨大津波災害が東日本沿岸という広範囲に被害が及んだため、各自治体では防災行動の遅れや被害状況の把握が容易に進まず、被災者は避難場所へ移動した後もほとんど情報を入手することができず、不安と緊張状態が続く中で長時間滞在を強いられることになった。これはヒアリングでも確認したことである。

平石ら（2011）は、周辺地域への災害時の情報提供を行うための白浜海象観測所を中心とした観測ネットワークの提案をしている。実際、東日本大震災でも最大波来襲の直前に津波警報を切り替えるきっかけとなったように、沖合観測装置GPS波浪計等の情報を用いた予報は、シミュレーションなどの想定に基づいたものよりも精度が高いものとなる。和歌山県の田辺湾は紀伊水道の入口に位置しており、この水域にあるNOWPHAS和歌山南西沖GPS波浪計、京都大学白浜海象観測所中島高潮観測塔の観測データは、田辺湾周辺地域にとって効果的なだけでなく、和歌山市といった紀伊水道周辺地域、さらには大阪市や神戸市といった大阪湾周辺地域にも活用できると考えられる。

第4章の解析結果から田辺湾では、津波はGPS波浪計への到達から約15分、観測塔への到達から約5分後、沿岸部に達すると考えられる。第4章の結

果からその増幅特性もグリーンの公式の適用範囲に含まれることが分かり、GPS 波浪計だけでなく、観測塔からの増幅率の適用を行うとより安全な予報を出すことができ、避難行動において効果的な情報となり得る。さらにNOWPHASの解析や検潮所では地震発生から半日ほどしてから最大波が現れていることから分かるように、湾内での津波は長時間にわたって注意することが必要である。現状では気象庁による大きな地域区分の警報・注意報では2日以上経ってから解除されたように、住民、さらには現地になじみのない観光者や高齢者等の災害弱者の方々にとっては周辺の詳細情報が伝わらないまま長時間を過ごすことになる可能性が高い。

リアルタイムの観測データをインターネット等による発信以外にも避難所や周辺の地方自治体、警察、消防等の公的機関、保育園・学校等の教育機関、老人福祉施設、あるいは白浜のような観光地の場合、旅館や駅といった高齢者、観光客の方が集まりやすい所で見ることができれば、一人一人の正しい避難判断や不安を取り除くことが少しでもできると考えられる。

太平洋沿岸の過疎地域とは違い、大阪湾周辺では沿岸の低地部に大都市圏が形成されており、避難行動は大勢の人の移動が生じ、自治体の防災対策としても防潮水門を閉じるといったある程度の時間を要する作業を津波到達までに行わなければならない。地域を守る対策の中心となる市町村、府県といった自治体等の公的機関への観測データの提供だけでなく、会社など集団行動のもととなる団体への配信やスマートフォン・タブレット等の通信機器を利用した個人への配信が迅速に情報を伝えることができ、効果的であると考えられる。配信するにあたり、災害情報に併せて携帯電話のGPS機能を利用した近隣の避難場所への誘導方法なども掲載することで、大人数の移動であっても比較的スムーズに避難できると考えられる。一刻も早い避難行動を要する津波災害においては、こういった気象庁を介さない、自治体、対象者独自の判断体系を構築させることができる。しかし、観測システムネットワークの課題もあ

る。前述のように、現状のままではこのようなシステムをすぐに行うことはできない。京都大学白浜海象観測所では現在、様々な種類の観測データの速報値を前述の図4のようにホームページ上で発信しており、また試験的な運用として2011年4月より海上保安庁田辺海上保安部のマリネリジャー情報の一部としても発信している。ただし本来は研究を目的としているため、今回の津波は大丈夫であったが、普段は欠測等の不備が多く、観測データの連続性や信頼性という部分で問題があり、観測の機能を強化する必要がある。また特定の機関や周辺の希望者に参考情報としてデータを提供することは大学の機関という制限上、現状では無理があり、図17のような理想的なネットワークシステムを整備するためには、地域防災の一環として海上保安庁、漁業組合、自治会、県や市町村等の公的機関等との連携を深めていく必要がある。

白浜海象観測所本体の立地条件にも問題がある。観測所の建物は田辺湾の海岸沿いにあり、この周辺を調査したところ観測所前の道路はおおよそ海面から2mのところであり、観測所の本館は1階でおおよそ3m、2階でおおよそ5mの高さであった。東海・東南海・南海地震時の白浜町の浸水予想図(防災わかやま, 2011)と比較してみても観測所の建物の浸水は免れず、観測データの解析、発信の拠点となる中心の機能を果たせず、観測所の本来の役目である観測についても多くの機器を早期に避難させる必要がある、災害時の観測、さらには信頼のある警報発信は不可能である。

東日本大震災では、広範囲にわたった災害ということもあって携帯電話の回線使用が集中するということが起こった(朝日新聞, 2011)。大阪湾周辺地域など大勢の人々への発信を目的とする場合、情報を伝達する方法もまだまだ考慮しなければならない。

津波災害は長期間起きないこともあり、3mの津波なら大丈夫、防波堤があるから避難する必要はないといったような個人の判断が東日本大震災の被害の拡大にも繋がった。これを改善するため

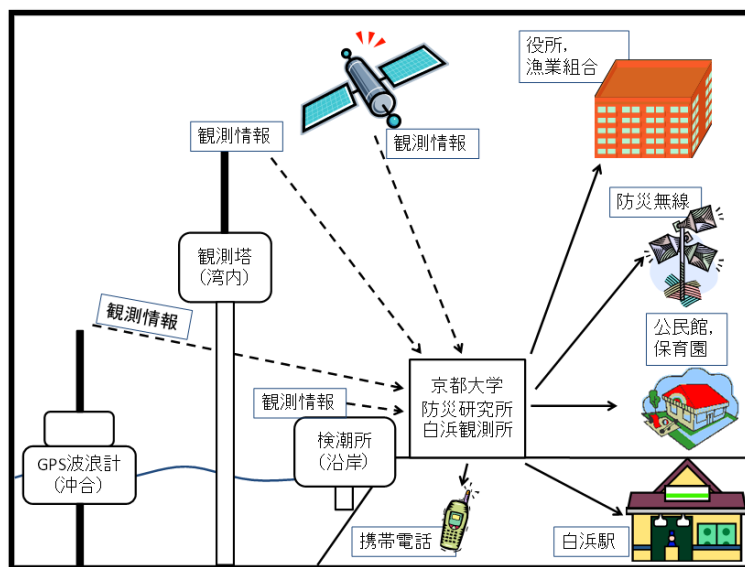


図17 理想的な地域警報ネットワーク

には平常時の防災訓練や防災教育といったソフト面の対策が欠かせない。継続して海洋の観測・研究を行う京都大学の観測所を地域防災に活用するために、観測所本体の高台移転により観測の継続性を確保すること、そして非常時だけでなく平常時から観測所の公開や防災教育への参加といった地域との関わりを持つことが、観測ネットワークシステムの普及につながり、研究機関の意義にも繋がると考える。

6. まとめ

本研究では和歌山県田辺湾を対象として2011太平洋沖地震津波の特性解析を行った。その結果、津波は数時間にも判り最高波は湾奥では数時間後に現れることが明らかとなった。また、増幅特性は簡単なグリーン公式であらわされるので沖合の観測値を使うと沿岸の保育園等に素早く情報を発信できることが判明した。また、保育園などでは避難を解除するタイミングについても津波観測情報が必要であることがヒアリングによって判明した。

最後に本研究を進めるにあたり、NOWPHASの観測データを提供して下さった国土交通省港湾

局ならびに独立行政法人港湾空港技術研究所の関係者の皆様に深く感謝いたします。気象庁和歌山地方気象台からは田辺湾の観測データを貸与頂きましたことに深く感謝いたします。

参考文献

- 朝日新聞記事 (2011) : <http://www.asahi.com/special/10005/TKY201104200249.html>, 参照日 2011-12-21
- 河合弘泰, 佐藤 真, 川口浩二, 関 克己 (2012) : GPS 波浪計で捉えた東北～四国地方太平洋沿岸の沖合波浪特性, 港湾空港技術研究所資料, No. 1226, 120p.
- 気象庁 (2011 a) : 東北地方太平洋沖地震・津波解析データ, http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2011_03_11_tohoku/index.html, 参照日 2011-12-18
- 気象庁 (2011 b) : 災害時地震・津波速報 平成23年(2011年) 東北地方太平洋沖地震, http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_201101/saigaiji_201101.html, 参照日, 2011-12-21
- 気象庁 (2011 c) : 報道発表資料東北地方太平洋沖地震による津波被害を踏まえた津波警報の改善の方向性について, <http://www.jma.go.jp/jma/press/1109/12a/torimatome.pdf>, 参照日 2011-12-21
- 平石哲也・武藤裕則・鈴木崇之・久保輝広・岸 弘毅・島田広昭 (2011) : 田辺湾における2010年チ

- り地震津波の増幅特性と沿岸観測網の活用,
pp. 20-26, 海洋開発論文集
- 防災わかやま (2011) : 津波浸水予測図 <http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/011400/index04.html#sinnsuiyosoku>, 参照日 2011-12-24
- 堀川清司 (1973) : 海岸工学, 東京大学出版会, pp. 108-109.
- Mori, N., T. Takahashi and The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group (2012) Nation Post Event Survey and Analysis of The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami, Coastal Engineering Journal, Vol.54, No.1, (印刷中).

(投稿受理：平成24年5月9日
訂正稿受理：平成24年7月30日)