

和歌山県沿岸に設置した海洋レーダによる近地津波および遠地津波の観測性能に関する数値実験

Numerical Experiment on Observation Capabilities of Oceanographic Radar on Far Field and Near Field Tsunamis

岡本 萌¹・門廻充侍²・高橋智幸³・日向博文⁴

Megumi OKAMOTO, Shuji SETO, Tomoyuki TAKAHASHI and Hirofumi HINATA

Two oceanographic Radars targeting tsunamis had been installed in Wakayama Prefecture in Japan. To study observation capabilities of the radars on far field and near field tsunamis, numerical experiments were carried out. After starting the operation of the radars, nine earthquakes occurred in the observation area, however, they were too small to be observed by the radars. Parameter study on near field tsunamis showed the radars can observe earthquake of Mw 7 and very shallow Mw 6. As a far field tsunami, the 2012 Haida Gweii Earthquake Tsunami arrived at Japan, however, the radars could not detect it because of very small velocity. Parameter study on far field tsunamis showed the main energy of tsunamis off Canada propagates northward, and Oshika Peninsula is suitable to observe the tsunamis.

1. はじめに

東日本大震災においては、津波警報が過小評価となったことや被災状況の把握が遅れたことが人的被害を拡大した要因になった可能性がある。今後発生が懸念される南海トラフでの巨大地震津波に備え、津波警報の信頼性向上や激甚被災地の探索技術の開発が求められており、そのためには津波の観測体制を充実させることが重要である。

既に国土交通省のGPS波浪計や海洋研究開発機構のDONETなどの整備が進んでいるが、すべてある地点での水位を観測している。しかし、津波のような大規模な現象の全体像を把握するためには面的なデータも必要であるため、リモートセンシングの活用が期待される。その一つの技術として、海洋レーダがある。海洋レーダは海流や潮流などの観測では実績があり、既に多くの海洋レーダが世界中に設置されている。よって、海洋レーダで津波が観測可能となれば、津波防災への貢献が期待される。

海洋レーダによる津波観測の可能性については、Barrick (1979) による理論的・数値的な検討から始まり、これまで様々な議論がなされてきた。そして、Hinataら (2011) やLipaら (2011)、HELZEL (2011) が日本やチリの沿岸に設置されていた海洋レーダにより、2011年東北地方太平洋沖地震による津波の観測に初めて成功し、海洋レーダによる津波検知の可能性を実証した。

このような背景を踏まえて、著者らは、世界で初めて津波を対象とした海洋レーダを和歌山県に設置して観測を行っている (以下、和歌山レーダ)。そして、被害が発生しない程度の中小地震による海面変動を観測し、巨大地震津波の検知技術を開発することを大きな研究目標としている。その基礎検討として、本論文では、和歌山レーダの近地津波および遠地津波の観測性能について、実津波と仮想津波により検討した。さらに、我国の太平洋沿岸における遠地津波の観測適地を数値実験により選定した。

2. 海洋レーダの諸元および設置状況

国土交通省国土技術政策総合研究所が所有する短波海洋レーダ (長野日本無線社製) を和歌山県美浜町と白浜町 (以下、美浜局および白浜局) に設置し、2012年9月22日より予備観測を実施した後、10月22日14:00から通常観測を開始した (図-1)。

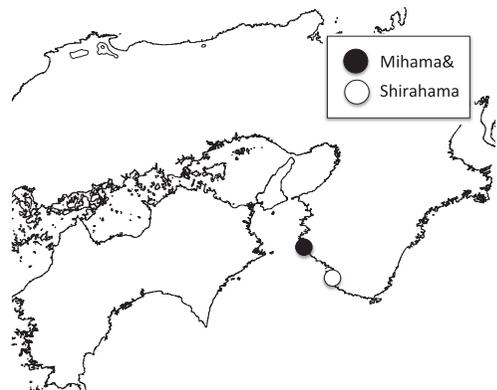


図-1 海洋レーダの設置位置 (和歌山県美浜町および白浜町)

- | | |
|-------------|------------------------|
| 1 学生会員 | 関西大学社会安全学部安全マネジメント学科 |
| 2 学生会員 修(学) | 関西大学大学院社会安全研究科防災・減災専攻 |
| 3 正会員 博(工) | 関西大学教授社会安全学部安全マネジメント学科 |
| 4 正会員 博(工) | 愛媛大学教授工学部環境建設工学科 |



図-2 和歌山レーダの美浜局(左)と白浜局(右)

美浜局および白浜局を図-2に示すが、両局とも1本の送信アンテナと8本の受信アンテナから構成されており、各アンテナは3エレメント八木アンテナとなっている。中心周波数は24.515MHz、周波数掃引幅は100KHzであり、レーダ前面 $\pm 45^\circ$ の海域の表面流速を距離分解能1.5km、方位分解能 7.5° で計測している。津波観測では、1時間あたり14分50秒のADデータ観測を4回繰り返している。その観測結果を基に15分データ（1780個）でドップラスペクトル解析や視線方向速度の計算を行っている。なお、観測可能流速の最小値は128秒解析の場合4.8cm/sである。また、観測域の代表水深を50mとして、線形長波理論を仮定すると、観測可能水位の最小値は10cmと換算できる。

3. 近地津波の観測性能に関する数値実験

(1) 既往地震による海面変動に関する数値実験

和歌山レーダの設置以降に、観測域で津波を引き起こすような地震は発生していない。しかし、日本沿岸では中小規模の地震が頻繁に発生しており、被害を生じるような津波が引き起こされていなくても、海面は変動している可能性がある。このような海面変動は、海洋レーダの観測性能を検証するためには重要なデータとなる。そこで、和歌山レーダの観測域で発生している中小規模の地震を抽出するため、気象庁の一元化処理震源リストの検索を行った。

検索範囲は図-3に示す和歌山レーダ観測域周辺、検索期間は2012年9月1日から2014年1月31日、検索対象地震は気象庁マグニチュード M_j で3.0以上、断層上端深さが20km以下のものとした。その結果、図-3に示す9地震が発生していたことが判明した。ただし、すべて小規模なものであり、モーメントマグニチュード M_w で3.42から3.89であった。

一元化処理震源リストからは各地震の震源（緯度、経度、深さ）と M_w のみが与えられているため、以下の方法で断層パラメータを決定した。断層長 L (km)、断層幅 W (km) およびすべり量 U (m) は $\log M_0 = 1.5M_w + 9.1$ (Hanks・Kanamori, 1979)、 $U/L = 10^{-5}$ (Kanamori・

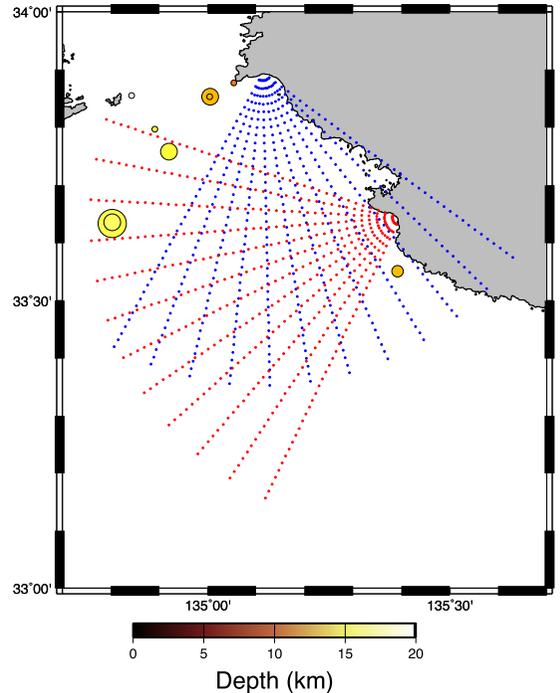


図-3 和歌山レーダによる観測域および近地地震の検索結果

Anderson, 1975)、 $M_0 = \mu ULW$ 、 $W = L/2$ から求めた。ここに M_0 は地震モーメント、 μ は剛性率 (4.0×10^{10} N/m) である。走向 θ は 90° 、すべり角 λ は $60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ 、傾斜角 δ は $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ と変化させて、不確かさを考慮した。

これらの断層パラメータから、Mansinha・Smylie (1971)の方法で海底地盤変動量を計算し、海面変動に等しいとした。その結果、すべての地震で鉛直変位はほぼゼロであり、和歌山レーダ設置後に観測可能な地震津波が発生していないことを確認した。

(2) 近地津波の観測性能に関するパラメータスタディ

和歌山レーダで観測可能な近地津波を調べるため、断層モデルについてパラメータスタディを行った。 M_w を4, 5, 6, 7、断層上端深さ H を1, 5, 10, 15, 20km、 δ を $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ と変化させ、上述の方法で L 、 W および U を求めた。 θ は 90° 、 λ は 90° とした。各断層パラメータからMansinha・Smylie (1971)の方法によって計算された海底地盤変動量を図-4に示す。同図には、和歌山レーダによる観測可能水位の最小値も示している。

$M_w 7$ の地震が発生すると和歌山レーダで観測が可能であるが、 $M_w 4$ および 5 の地震による海面変動は観測可能水位に至っていないことがわかる。 $M_w 6$ の地震では、 H が1kmまで浅くなると観測可能となる。 δ については、高角になるほど鉛直変位が大きくなるため、より観測されやすくなる傾向を示した。

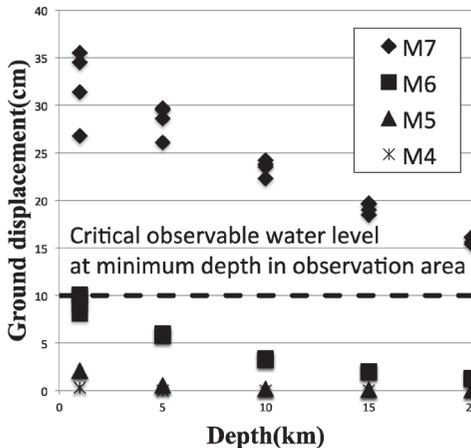


図-4 Mw, 断層上端深さ, 海底地盤変動量の関係

4. 遠地津波の観測性能に関する検討

(1) カナダ・クイーン・シャーロット諸島沖津波

2012年10月27日20時4分(日本時間で28日12時4分)に、カナダ・クイーン・シャーロット諸島沖を震源(深さ14km)とするMw7.8の地震が発生した。この地震による微小な津波(以下、2012年カナダ津波)は、地震発生から約10時間後の28日22時頃、紀伊水道沖に到達した。(独法)海洋研究開発機構(2014-5-21参照)が運用するDONETでは28日の22時前に和歌山県沖(北緯33度26.754分, 東経136度15.386分, 水深1909m)で7mm程度の第1波を観測している。

和歌山レーダによる観測データから、2012年カナダ津波による流速の時空間変化の解析を行った。美浜局で観測された視線方向速度の時間変化を図-5に示す。赤枠は津波が到達している予想される時間を示しているが、津波の来襲を示す有意な変化は得られなかった。次に、美浜局および白浜局の視線方向速度を合成した表層流速の空間変化を図-6に示す。同図(a)および(b)の空間分布が発生している時刻は図-5に矢印で示しているが、前者は津波到達前、後者は津波来襲時に対応している。両者を比較すると、津波来襲時に流速値の空間変化が小さくなっている傾向は見られるが、津波の来襲を示すほどは明瞭でなく、津波が観測できているとは言えない。また、流向についても、観測域全体で一様になるなどの特徴も見られない。

以上のように、和歌山レーダは2012年カナダ津波を観測できているとは言えない。その原因としては、地震の規模が小さかったため、レーダ観測域での流速場も小さかったことが考えられる。そこで、同津波の伝播計算を実施して、和歌山レーダの観測域内での流速を求めた。

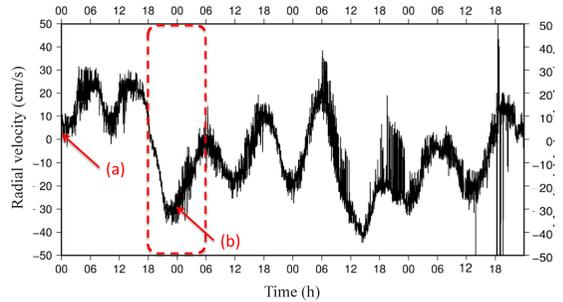


図-5 美浜局で観測された視線方向流速の時間変化

断層パラメータは、USGS(2014-5-21参照)にしたがって、 θ を 121° 、 λ を 100° 、 δ を 26° 、 H を14kmとした。また、 L 、 W および U は3、(1)と同様の方法で決定した。津波伝播計算については、地球座標系の線形長波理論をStaggered格子によるLeap-frog法で解いた。その際、時間間隔は2秒、格子間隔は1分とし、地形モデルはGEBCO(2014-5-21参照)を使用した。計算された流速の時間変化を図-7に示すが、観測可能流速の最小値である4.8cm/sを大きく下回っていたことがわかる。すなわち、2012年カナダ津波の規模では、和歌山レーダにより観測できないことを示している。

(2) カナダ沖で発生する遠地津波の観測性能に関するパラメータスタディ

和歌山レーダの観測性能を調べるため、カナダ沖で発生する遠地津波を対象として、以下のようなパラメータスタディを行った。Mwを8.0、8.5、9.0と変化させ、 L 、 W および U を3、(1)と同様の方法で求めた。また、プレート境界型の低角逆断層を想定して、 θ はプレート境界に平行に 132° 、 λ は 90° 、 δ は 25° 、 H は1kmとした。断層位置については、隆起域と沈降域の境界がプレート境界に平行になるように決めたCase 1を標準として、そこから太平洋側に38.3kmずつずらしたCase 2とCase 3を設定した。

これらの各断層パラメータからMansinha・Smylie(1971)の方法で計算した海底地盤変動量を津波波源とし、4、(1)と同様の方法で津波伝播計算を実施した。Mw8.0と8.5のCase1, Mw9.0のCase1, Case2, Case3による和歌山レーダ観測域での流速の時間変化を図-8に示す。Mw9.0のCase3での流速値が最大となるが、それでも2.5cm/s程度であり、和歌山レーダの観測可能水位を下回っていることがわかる。これは津波エネルギーの指向性の影響と考えられる。Mw 9.0のCase3による津波伝播過程を図-9に示すが、津波エネルギーの主成分は北方に向かっており、和歌山レーダが設置されている海域への伝播は少ないことがわかる。そのため、カナダ沖でMw 9.0クラスの地震津波が発生しても、和歌山レーダでは観

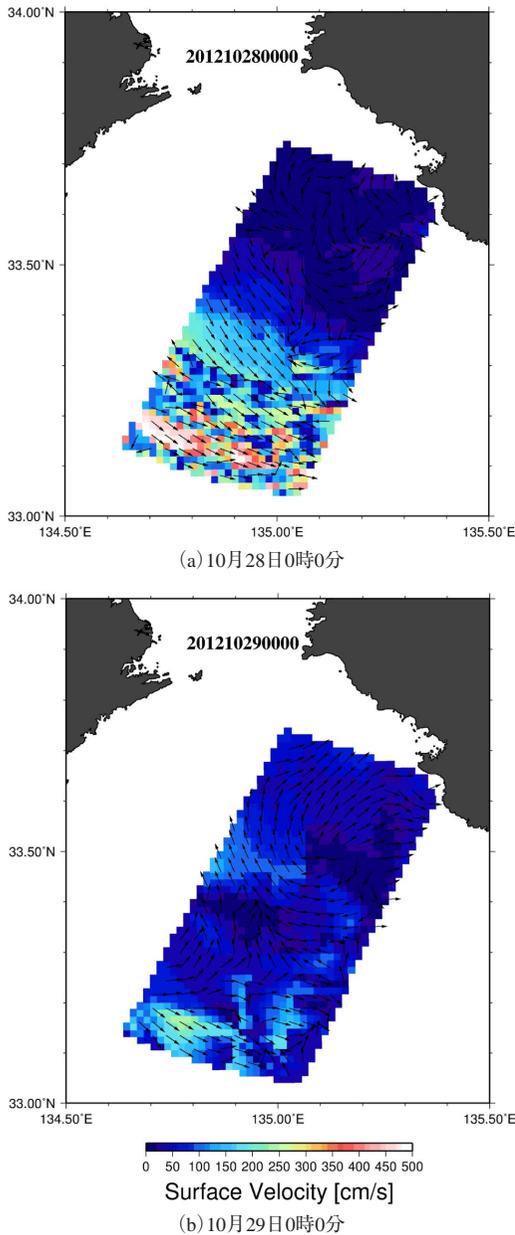


図-6 和歌山レーダで観測された流速の空間分布

測できない結果となった。

(3) カナダ沖で発生する遠地津波の観測適地に関する数値実験

カナダ沖で発生する巨大地震津波の観測に対して、和歌山レーダの設置地点は不向きであることを示した。そこで、我が国沿岸の各地域での観測性能を調べるために、以下のような数値実験を実施した。カナダ沖で最大規模 Mw9.0 (Case3) の地震を発生させ、4. (1) と同様の方法で津波伝播計算を実施した。図-10に示す10地点に仮想

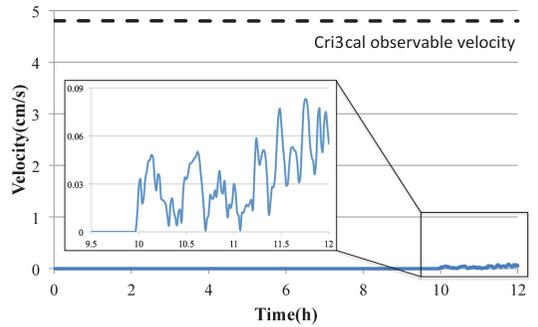


図-7 2012年カナダ津波の再現計算 (和歌山レーダ観測域での計算流速の時間変化)

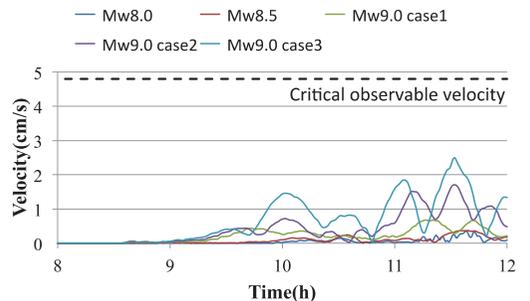


図-8 カナダ沖での想定津波による和歌山レーダ観測域での流速の時間変化

の海洋レーダを設置して流速を出力した。なお、各海洋レーダの観測域の水深は、和歌山レーダに準じて70~80mとした。

観測可能流速の最小値を上回った牡鹿半島(最大8.0cm/s)、いわき市(最大6.5cm/s)、犬吠埼(最大5.5cm/s)での流速の時間変化を図-11に示す。特に、牡鹿半島では長時間にわたって観測できており、カナダ沖で発生する遠地津波に対して適していることわかる。

5. おわりに

津波を対象として設置した和歌山レーダの観測性能に関する数値実験により、以下のような結果を得た。

- (1) 観測開始以降、観測域では9地震が発生していることが判明した。しかし、いずれも小規模な地震であり、観測可能な海面変動は発生していなかった。
- (2) そこでパラメータスタディを実施し、観測域でMw7以上あるいは浅いMw6の地震が発生すると観測可能であることを明らかにした。
- (3) 観測した流速の時空間分布からは、2012年カナダ津波を示す明瞭な傾向は得られなかった。
- (4) これはカナダ沖で発生する津波の主エネルギーは北方に伝播するためであり、和歌山レーダの設置地点は観測に不向きであることがわかった。

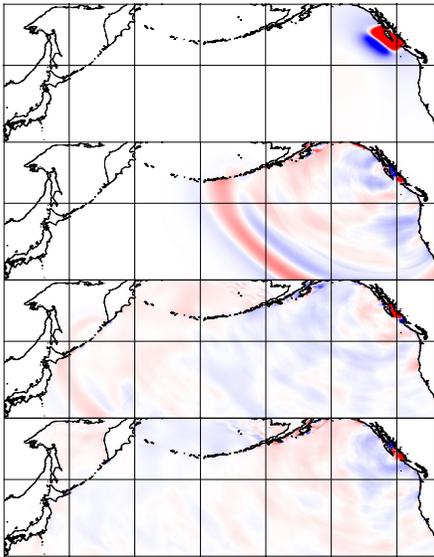


図-9 カナダ沖での想定津波の伝播過程
(赤：上昇, 青：下降)

(5) カナダ沖で発生する津波の観測に対しては牡鹿半島が適地であることを明らかにした。

謝辞：本研究の一部は平成24～25年度関西大学研究拠点形成支援経費（研究課題「東日本大震災を踏まえた観測およびシミュレーションが連携した津波減災技術の開発」）の助成を受けて行われた。

参 考 文 献

Barrick, D. E. (1979) : A coastal radar system for tsunami warning, Remote Sensing of Environment, Vol.8, pp. 353-358.
 Hinata, H., S. Fujii, K. Furukawa, T. Kataoka., M. Miyata, T. Kobayashi, M. Mizutani, T. Kokai and N. Kanatsu (2011) : Propagating tsunami wave and subsequent resonant response signals detected by HF radar in the Kii Channel, Japan, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.95, pp. 268-273.
 Lipa, B., D. Barrick, S. Saitoh, Y. Ishikawa, T. Awaji, J. Largier and N. Garfield (2011) : Japan tsunami current flows observed by HF radars on two continents. Remote Sensing, Vol.3, pp. 1663-1679.
 HELZEL (2011) : WERA Ocean Radar in Chile Observed Tsunami Signatures after the Earthquake in Japan on March 11, 2011, PRESS RELEASE, 2p.



図-10 仮想レーダの設置地点

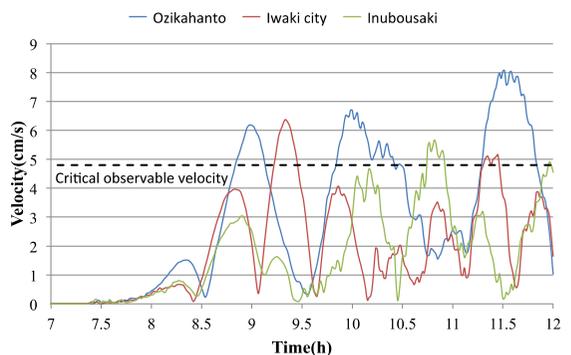


図-11 観測可能地点での流速の時間変化

Hanks, T. and Kanamori, H. (1979): A moment magnitude scale, J. Geophys. Res., v. 84, no. B5, pp. 2348-2350.
 Kanamori, H. and Don L. Anderson (1975): Theoretical basis of some empirical relations in seismology, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 65, NO.5, pp. 1073-1095.
 Mansinha, L. and D. E. Smylie (1971): The displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 61, NO.5, pp. 1433-1440.
 (独法) 海洋研究開発機構：北米西部の地震を観測（オンライン）, <http://www.jamstec.go.jp/donet/j/topics/201210canada/>, 参照2014-5-21.
 USGG: M7.8 - Haida Gwii, Canada (BETA) (オンライン), http://comcat.cr.usgs.gov/earthquakes/eventpage/pde20121028030408820_14, 2014-5-21参照.
 GEBCO: The General Bathymetric Chart of the Oceans (オンライン), <http://www.gebco.net>, 2014-5-21参照.