海洋短波レーダによる津波観測の実現に向けた 吹送流成分の除去手法の検討

INVESTIGATION CONCERNING TSUNAMI OBSERVATION SYSTEM USING HIGH FREQUENCY RADAR

渡辺一也¹・富田孝史²

Kazuya WATANABE and Takashi TOMITA

¹正会員 博士(工) (独) 港湾空港技術研究所 津波防災研究センター 特別研究員
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 博士(工) (独) 港湾空港技術研究所 津波防災研究センター 上席研究官
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

Recently, a large-scale earthquake is predicted to occur in Japanese coast. There is a possibility that the tsunami is generated along with the earthquake occurrence. For that purpose, it is important to grasp the information on the generation of tsunami instantaneously. Additionally, whether this information can be effectively transmitted becomes an acute problem. Therefore, it is necessary for understanding the attainment of the tsunami by the distant point and earlier. Above all, the high frequency radar is expected as a technique to which the tsunami can promptly be observed by the distant point. In the observation with high frequency radar, there is a possibility from the coast at about 80km can be known the tsunami. Moreover, it is very useful because time necessary for the observation is about one minute.

In this study, the accuracy of obtained data with high frequency radar was investigated based on the current velocity at Fort No.2 in Tokyo Bay and it was examined to exclude the wind current effect in observed data.

Key Words : Tsunami, High frequency radar, Tokyo bay, Water level, Surface velocity
Wind data, Fort No.2

1. はじめに

我が国では、大規模な地震とそれに伴う大規模な津波が懸念されている¹⁾。現在の津波予測情報は地震発生から数分以内に発表される優れたものであるが、2006年11月15日および2007年1月13日の千島列島沖の地震による津波の際には、津波警報が発表されたにもかかわらず実際に来襲した津波は数10cm程度であったことや津波注意報解除後に最大の津波が観測された場所があったこと等の問題点も指摘されている(例えば²⁾)。本研究では、沿岸に来襲する津波の予測精度を向上させるために、沖合で観測された津波情報を活用する手法を開発する。津波の沖合観測は、室戸岬沖合13kmに設置されたGPS波浪計により実証されている³⁾が沿岸部から約80kmと遠い地点の海面を観測することが可能な海洋短波レーダは沖合津波観測に有効な技術と期待が出来る。さらに、即時的な観測が可能な海洋短波レーダ技術も開発中である。ただし、これまで実際に海洋短波レーダで津波を取得した例がないため、津波観測ができたという既往の研究では仮定して津波予測を行って

その有効性を示している^{4) 5) 6)}が、実海域には、津波による流れの他にも、潮流、吹送流など様々な流れが混在しているため、それから津波成分を抽出する必要がある。また、津波の来襲は非常に早いことが予測されるため、吹送流などの影響をリアルタイムに除去する方法が必要である。

本研究では、津波観測事例がないために、潮流を津波に見立てて、海洋短波レーダによって得られた流速データから吹送流などの影響をリアルタイムに除去する手法を提案する。

2. 研究の目的と内容

既往の研究において、海洋短波レーダによる広域な面的データが取得できれば、リアルタイム津波予測の精度が向上することが、数値計算上で明らかとなっている⁶⁾。本研究では、海洋短波レーダによる津波観測を目的として、まず、海洋短波レーダによる津波観測技術について、既往の成果を取りまとめる。

次に、津波の検出に際して、吹送流の影響をリアルタイムに除去する手法を提案する。

海洋短波レーダで観測するのは流れであり、実海域には津波による流れの他にも、潮流、吹送流など様々な流れが混在している（図-1 参照）。このため津波を検知するためには、雑多な流れ成分を含んだ観測値から津波成分を抽出する必要がある。とくに、海洋短波レーダが観測する表層流速は、水表面を吹く風により大きな影響を受けるので、それによる流れ（吹送流）を除去しなければならない。さらに、吹送流の数分程度の周期は、短い周期の津波の周期に近いので、吹送流の除去は重要である。

図-1 海における流れ成分

3. 海洋短波レーダに関する既往の研究

海洋短波レーダの津波観測への応用は、1970年代から試みられている^{7) 8) 9)}。しかし、実際に海洋短波レーダによる津波の観測事例は無い。既往の研究では、津波による流れが観測できたものとして、津波の検出や津波の初期水位変動の推定などに活用している。

海洋短波レーダは、一度に広領域の面的なデータを取得することができ、さらに GPS 波浪計よりも沖合の津波を検知できるので、津波のリアルタイム予測に有用なデータをもたらすと期待できる。観測可能な距離は、レーダの種類・測定法により異なるものの、HF 方式では沿岸部から約 80km という海域において津波を捉えられる可能性がある。

現在行われている、多くの海洋短波レーダによる観測では、環境の把握が主眼であること、さらに観測精度向上のために、1 時間程度という観測時間で流れの時・空間的な変動を解析している。しかし、津波の検出には、この観測時間は不適切であり、より短い時間での観測が必要である。短時間の観測に関しては、電力中央研究所が 15 分間隔での観測に成功している¹⁰⁾。さらに技術開発により、DBF 方式を採用することにより、約 1 分のインターバルでの観測が可能になりつつある。

4. 海洋短波レーダによる観測の有用性

(1) 海洋短波レーダの特性

海洋短波レーダを津波観測に適用することを検討するにあたって、その特徴を整理する。

第一の特徴は、広範囲にしかも遠距離の流速データを測定できることである。さらに、陸上に基地局

を設けるために従来の手法に比べて保守・維持が容易であることが利点として挙げられる¹¹⁾。特に広範囲を測定できるという点では、測定距離は方式・測器にもよるが、HF 方式で沿岸から約 80km と非常に遠方の観測が可能である。

図-2 は、津波検出点の海岸から距離と津波の到達時間の関係を示したものである。津波検出点から海岸までの平均水深を 200m, 500, 1,000m と仮定した。平均水深を 1,000m と仮定した場合には、津波が沖合で観測されてから沿岸に到達するまでにおよそ 13 分程度かかる。平均水深が 200m と浅くなれば、さらに時間的な余裕は増大し約 30 分程度となる。

図-2 計測距離と津波到達時間との関係

(2) 海洋短波レーダによる流れ観測の原理

海洋短波レーダが海面の流れを観測する基本原理は、ドップラー効果を利用したものである。レーダ基地局に向かってくる流れにのった波により反射された電波は、流れの速さに対応して高周波数側に変調し、逆に遠ざかる流れに乗った波により反射された電波は低周波数側に変調する。この周波数の変化を解析することにより流れを観測する。計測方法の詳細については既往の文献^{11) 12)}に詳しい。

(3) 津波観測の可能性 (DBF 方式による観測)

短時間で流況を観測することが可能である DBF 方式がある。これは、電波送信アンテナ 1 本に対し、受信アンテナを複数基設置するものである。この複数基設置した受信アンテナで観測した、観測範囲の全方位から帰ってきた信号を同時に処理することにより、一度の送受信で観測を行うことができる。すなわち、観測時間が従来の手法に比べて短くすることができる¹⁰⁾。

津波観測においてはさらに短い時間での観測が必要であると考えられる。そのため、観測精度は多少落ちるものの約 1 分間隔 (128 回の掃引, 64 秒) での流速の観測技術の検討が行われている。

5. 吹送流の即時的除去手法

(1) 研究対象領域とモニタリングスポット

海洋短波レーダによる津波の観測事例はないが、実測データから吹送流成分を除去する手法を検討するために、海洋短波レーダおよび流速計並びに風速計による種々の観測データが得られる東京湾を対象とした（図-3 参照）。

海洋短波レーダは、基地局が船橋、大黒埠頭、千葉の3箇所に設置され、ほぼ東京湾全体での表層の流れ（水面下 45cm）を観測している。ここで、図中の黒丸（●）は、海洋短波レーダで観測が行われている点であり、測定間隔は 1.5km で 241 点である。観測データは1時間インターバルで東西・南北成分の流速データとして解析され、web⁽¹³⁾ を通じて一般に公開されている。

第二海堡では、流況および海上風の観測も行われている。

流況について、NOWPHAS 海象計によって上層・中層・下層の3箇所における流速・流向が、毎正時を中心とした10分間に0.2秒間隔で観測され、それらを平均して1時間間隔のデータとして整理されている。

海上風については、関東地方整備局港湾空港部によって風速および風向が、毎正時を中心とした10分間に0.1秒間隔で観測され、流れと同様に、それらを平均して1時間間隔のデータとして整理されている。

本研究では、レーダ観測、その比較対象になる海

象計による流況観測、および吹送流を除去するのに必要な海上風の観測が全て行われている第二海堡を対象とした。

図-3 対象領域

図-4 第二海堡における東西方向流速（上・中・下層）

図-5 第二海堡における南北方向流速（上・中・下層）

(2) 第二海堡周辺の流れの特性

第二海堡における海象計で観測された流れの特性を以下に示す。

図-4 および図-5 は、第二海堡において海象計で観測された上・中・下層の流速を東西および南北成分に分けて、1 時間間隔データの時系列として示したものである。この図から、今回取り上げた観測期間において、東西および南北ともに、いずれの層においてもほぼ同じ方向かつ速さで流動していることがわかる。このように鉛直方向に様な流れであるので、水表面で顕著に表れる吹送流があれば、それは表層での観測データに際立って表れると考えられる。

(3) 海洋短波レーダによる流速観測の精度に関する検討

実際に海洋短波レーダによって観測された流速は、図-6 のように、東京湾のほぼ全域にわたる流速ベクトルデータとして示すことができる。この図は、実際に観測された流速データを 1/3 に間引いて表示したものである。

図-7 および図-8 に、2006 年 5 月の海象計による上層流速、風速および海洋短波レーダによる流速を東西および南北方向成分にそれぞれ分けて示した。図中の実線は海洋短波レーダによる流速、点線が海象計による流速、白丸 (○) が風速である。

実線と点線を比較すると、東西および南北各成分ともに、定性的によく一致していることがわかる。しかし、5 月 5~8 日に見られるように、風が強いときには両者の差異が大きくなる。これらのことは、両者の差異は吹送流の影響を示していると考えられる。

風速とレーダより得られた流速の相関を取ると、東西方向では相関係数が 0.55 であり、南北成分では 0.48 となっており無視できない大きさである。これは、風が卓越しているときの吹送流の影響を除く必要があることを示している。

図-6 海洋短波レーダによって取得された面的な流速データ

図-7 海象計と海洋短波レーダにより得られた流速の比較 (東西成分)

図-8 海象計と海洋短波レーダにより得られた流速の比較 (南北成分)

図-9 流速の推定値と海象計の比較（東西成分）

図-10 流速の推定値と海象計の比較（南北成分）

図-11 推定値と実測値の相関（東西成分）

図-12 推定値と実測値の相関（南北成分）

(4) 流速データからの吹送流成分の除去についての検討

本研究では、従来行われていた物理モデルを使用した吹送流成分と恒流成分の分離ではなく、重回帰分析を使用した統計学的なアプローチにより吹送流成分を除去する手法について試みた。

物理モデルを使用した手法においては、長期間、しかも多岐に渡る観測データの蓄積が必要であるが、吹送流の再現を行うことは可能となってきた。しかし、データ量の多さと計算時間の膨大さの面から、即時性という面からみるとこの手法は今回の検討に対しては適していないと考えられる。

津波来襲時にはリアルタイムでの観測が必要となるので、本研究では、風速データを使用して即時的に吹送流を推定することができる、統計学的なアプローチを用いた。具体的には、流速計の流速を目的変数、風とレーダの流速を説明変数とした重回帰分析によって、吹送流の影響を除く。ただし、統計学的なアプローチは、データ数によりその推定精度が左右されるため、今回の検討では、2週間分のデータを使用した。実際に適用するにあたってどの程度の長さのデータが必要であるかは今後の課題である。

図-9および図-10に、レーダによる観測流速から吹送流の影響を除いた流速の推定結果と海象計に

よる上層流速の結果を示す。両者には定量的な一致が認められた。

両者の相関を、図-11 および図-12 に示す。高い相関を得られていることが確認できる。これを相関係数で評価すると、吹送流の影響を除くことにより、東西成分では 0.60 から 0.69 へ、南北成分では 0.77 から 0.86 へと精度の向上が見られた。

6. おわりに

本研究の結論と今後の課題を以下に示す。

(1) 結論

本研究における主要な結論は以下のようである。

- a) DBF 方式の海洋短波レーダ観測により、津波の観測の可能性がある。
- b) 海洋短波レーダにより得られた流速データから吹送流成分を除去することについての検討を行った。その結果、重回帰分析を用いることによってリアルタイムに吹送流の成分を除去することが可能であることが示された。

(2) 今後の課題

今後の課題は以下のようである。

- a) 今回の検討では、2 週間分のデータを用いて重回帰分析を行ったが今後はどの程度まとまったデータ数が必要であるのかを検討する必要がある。
- b) 第二海堡において点として検討を行った場合に、風の影響を除くことが可能であった。しかし、広い領域ではもっと複雑な風の挙動が起こることが考えられる。そのため、より広範囲における面的な風データに対しての検討が必要である。海洋短波レーダによる海上風の観測技術も検討されているようなので、今後、海水流動と海上風の同時観測についても検討が必要である。
- c) 統計的手法により吹送流の影響を除いた面的な流速データを用いて、実海域における津波の水位の推定手法の検討が必要である。

謝辞：本研究を行うに当たって、国土技術政策総合研究所、沿岸海洋研究部海洋環境研究室、古川恵太室長、日向博文主任研究官よりデータの提供を受けた。ここに記し、厚く謝意を表する。

参考文献

- 1) 中央防災会議：「中央防災会議のページ」＜<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/>> (2007/04/9 アクセス)
- 2) 北海道新聞：「津波予報」＜<http://www5.hokkaido-np.co.jp/motto/20070210/>> (2007/04/10 アクセス)
- 3) 永井紀彦・小川英明・寺田幸博・加藤照之・久高将信：GPS プ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，pp.1411-1415, 2003.
- 4) 泉宮尊司・今井達也：海洋レーダによる海表面流速場を用いた津波のリアルタイム予測に関する研究，海岸工学論文集，第 52 巻，pp.246-250, 2005.
- 5) 泉宮尊司・中島俊秋：時間平均された海表面流速場を用いた津波のリアルタイム予測，海岸工学論文集，第 53 巻，pp.246-250, 2006.
- 6) Tomita, T., Tatsumi, D. and Takahashi, S.: Improvement of Real-time Tsunami Prediction Based on Earthquake Information and Spatial Distribution of Water Surface Elevation, Proc. Techno Ocean, 2006. (CD-ROM)
- 7) Barrick, D.E.: A coastal radar system for tsunami warning, Remote Sensing of Environ., Vol. 8, pp. 353-358, 1979.
- 8) Lipa, B. et al.: SeaSonde Detection of Tsunami Waves, CODAR report, 2005.
- 9) Lipa, B. et al.: HF Radar Detection of Tsunamis, Journal of Oceanography, Vol. 62, pp.705-716, 2006.
- 10) 坂井伸一・平口博丸・松山昌史・坪野考樹・森 信人・杉山陽一・藤井智史・佐藤健治・松岡健志：短時間観測が可能なデジタルビームフォーミング方式による沿岸海洋レーダの開発，海岸工学論文集，第 49 巻，pp.1511-1515, 2002.
- 11) 土木学会：陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測，213p, 2001.
- 12) Barrick, D.E.: First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea, IEEETrans. Antennas Propag., AP-20, pp. 2-10, 1972.
- 13) 東京湾環境情報センター：気象海象リアルタイム情報＜<http://www.tbeic.go.jp/index2.html>> (2007 年 4 月 9 日アクセス)