

令和元年6月1日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04419

研究課題名(和文) 仮想津波観測実験に基づく海洋レーダ津波計測性能検証と津波防災への展開

研究課題名(英文) Validation of tsunami detection performance of ocean surface radar based on virtual tsunami observation and its application to Tsunami mitigation

研究代表者

日向 博文(Hinata, Hirifumi)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・教授

研究者番号：70272680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：仮想津波観測実験により、紀伊水道でのレーダの津波検知性能を統計的に評価し、津波検知性能が波浪や電離層の状態に応じて変化することを明らかにした。津波レーダによる津波漂流物リアルタイム予測のために、数値モデルへのレーダ観測データの同化方法について検討した。その結果、高周波流速成分を全層にナudgingした場合、比較的良好な結果が得られるものの、水位は期間を通じて低くなる等の結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

津波レーダの測定精度は計測環境の影響を受けるため、津波防災のための実用化には当該海域での津波検知性能の統計的評価が重要である。しかしながら、津波の発生頻度は低く、レーダによる津波の実測例は限られており、津波検知性能の統計的評価はこれまで困難であった。本研究において申請者らは、このデータ不足を仮想津波観測実験という方法により解決し、津波検知性能が波浪や電離層の状態に応じて変化することを明らかにし、さらに、紀伊水道での津波検知性能を統計的に評価することに成功した。近年、国内の原子力発電所に津波レーダが設置され、その津波検知性能が仮想津波観測実験に基づいて評価されるようになった。

研究成果の概要(英文)：We examined temporal variation of tsunami detection performance of HF radar based on virtual tsunami observation experiments using one-year radar observation data obtained at the west coast of Kii Peninsula and a tsunami simulation for a Mw 9.0 Nankai Trough earthquake. We concluded that the tsunami detection performance on the continental shelf slope depends on ionospheric conditions as well as sea surface state. We also examined how to assimilate tsunami currents observed by HF radars in three dimensional current modeling for the projection of tsunami debris in case the Nankai Trough Megathrust earthquake occurs. In order to assimilate the tsunami component of the surface currents with the consideration of a tsunami's momentum, high-frequency component is extracted from the observed surface velocities using discrete wavelet transform and assimilated to all vertical layers by nudging. This pragmatic approach better represents both currents and surface elevation.

研究分野：海岸工学

キーワード：海洋レーダ 仮想津波観測実験 津波シミュレーション 電離層 波浪 データ同化 津波漂流物

## 1. 研究開始当初の背景

津波警報の第1報は、地震波解析に基づいて発表されるため、巨大地震 ( $M>8$ ) では津波を過小予測する可能性が高い。このため現在、気象庁では地震発生後 15 分程度で GPS 波浪計や DONET 等の観測結果を使って第1報を更新することとしているが、実際の津波波高が予報区内で分布を持つこと、南海トラフ地震津波が日本南岸全域に及ぶことを考慮すると、第1報の定量的評価にはより広範囲・高密度の測器配備が望まれる。さらに、四国・近畿地方全体の人命・財産・経済活動への地震影響を最小限に抑えるためには、太平洋側のみならず瀬戸内海域の海上輸送システムが継続的に機能を発揮することが必要不可欠となる。海上輸送機能維持のためには、広範囲の津波起因漂流物の集積状況を把握・予測し、警報解除とともに戦略的・効率的な航路啓開作業を開始することが必要である。しかしながら、津波起因漂流物の広域拡散状況を把握し、その時間的予測を行うシステムは存在していない。

## 2. 研究の目的

南海トラフ地震津波発生時に懸念されているこれらの防災上の 2 つの課題 (過小な津波警報第1報による避難の中断・遅れの発生、津波起因漂流物による海上輸送機能の著しい低下) の解決に必要な技術の基礎となる研究を、海洋レーダと数値シミュレーションを用いて行う。この時、海洋レーダを用いた津波研究上の最大の課題である津波観測データの不足を「仮想津波観測実験」という新たな手法を開発することで解決する。そして、複数の観測条件 (SN 比) に対応した仮想津波観測実験を行い、海洋レーダ津波計測性能を統計的に整理するとともに、海洋レーダデータを漂流予測に活用するための同化技術について検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) 仮想津波観測実験

実際の受信波として、和歌山県美浜町に 2012年9月から2016年2月まで設置されていたレーダ (図1, 長野日本無線社製, 中心周波数: 24.515MHz, レンジ方向分解能: 1.5km, アジマス方向分解能: 7.5°) の2014年の受信波を用いた。本研究では、測定環境の検知性能への影響を調べるため、ほぼ真南を向いている第4ビームに絞って解析を行なった。(図-1)。

南海トラフ地震津波断層モデルケース 3 により発生する津波の流速を、非線形項と海底摩擦項を考慮した鉛直積分型の方程式に基づく数値モデルを用いて計算した (図 1)。

各レンジでの津波流速を津波発生後 6 時間まで計算し、レーダ観測範囲内で空間内挿し第 4 ビーム上各レンジでの視線方向流速に変換し、ノイズや伝搬損失がないと仮定した場合のドップラー周波数を計算した。この理想状態でのドップラー周波数を使って、背景ノイズを含むレーダ観測受信波を変調させ、実際のノイズを考慮したケース 3 津波発生時の受信波を模擬した。ここでは、1つの津波シナリオを想定しているが、毎月1日の06:00から末日の17:00まで1時間毎に観測された受信波と津波によるドップラー周波数を合成することで、各月 600 程度以上の異なる SN 比での津波観測を仮想的に行なった。

津波伝搬に伴って上昇する視線方向流速の相互相関係数を、平常時の相関係数と比較することで津波検知を判定した。相関係数はレンジ方向に3.0km離れている2点の短周期成分を使って計算した。平常時の相互相関係数は、30分間の観測流短周期成分を使って計算する。これを各月1日の06:00から末日の17:00まで1分ずつずらして計算し、相関係数の頻度を求める。上位1%の相関係数の値を求め、津波判定に使う閾値とした。津波発生時の相互相関係数は、1分毎に直近30分間の合成流短周期成分を使って逐次計算していく。津波伝播に伴って相互相関係数が上昇し、レンジ方向に連続する3組で其々の閾値を超えた場合、レーダに最も近いレンジにおいて、その時刻に津波を検知したものと判断する。

2014 年の日本上空における電離層状態 (電離層に反射する電波の周波数、反射高度と相対的な反射強度) を、情報通信研究機構 (NICT) が全国 4 箇所 (北海道, 東京, 鹿児島, 沖縄) で行なっている電離層観測の 1 次観測データ (イオノグラム) に基づいて検討した。有義波高は和歌山南西沖の GPS 波浪計 (ナウファス) の観測データを使用した。

### (2) 大阪湾における海洋レーダデータの同化実験

観測される流速 (観測流速) は津波の他、潮汐や風、河川などの影響を受けている。同化するに当たり、観測流速は津波流速とその他の流速 (背景流速) の線形和として表すことが可能かについて数値シミュレーション上で検討した。津波の発生を 2012 年 7 月 12 日 0 時とし、津波のみを外力として与えた場合 (Case01)、潮汐・河川・風を外力として与えた場合 (Case02)、全てを与えた場合 (Case03) を、大阪湾を対象として、海洋モデル Regional Ocean Modeling System (ROMS) で計算を行い、Case03 を離散ウェーブレット分解により高周波と低周波の 2 成分に分解し、それぞれを Case01 と Case02 の計算結果と比較した。

本対象海域では 4 次元変分法によるレーダデータ同化を通常時流況に対し実現しているが、津波発生時は極めて大きな往復流が発生し、適用性が不透明であるため、本研究ではナ

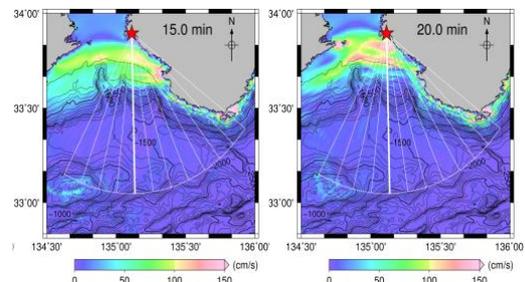


図 1 美浜局の観測範囲と発生 15~20 分後の津波伝播の様子

ッジングによる同化方法について検討する。計算結果を検討に反映させながら、各ケースの同化方法について検討を行った。Case02 を元ケースとして同化を行い、Case03 の結果と比較することで各ケースの同化方法の妥当性について検討した。特に、表層流速を表層のみ (Assm1-a) あるいは全層一律 (Assm1-b) に同化した場合、良好な結果を得られなかったために、高周波成分のみを同化させた場合 (全層に対し津波流速だけを同化させるイメージ, Assm2-a)、さらに高周波成分の大きさに応じナッジング係数を変化させた場合 (Assm2-b)、また、高周波成分のみを全層に付加した場合 (Assm3-a, b, c) について比較した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 津波検知性能の統計的評価

平均有義波高の高い2月、最も低い月の一つの4月、そして8月の結果を図2に示す。いずれの月も津波発生6-8分後に22.5kmで検知確率は80%に到達する。津波発生10分後での検知確率を比較すると、全体的には2月が最も悪い。4月と8月を比較すると、陸棚上 (~30.0km) では4月が、陸棚斜面上 (37.5km) では8月が検知確率は高くなる。離岸距離別の各月の検知確率と1m以下の有義波高の出現確率との関係 (図3a-c) を見ると、22.5kmでは離岸距離が小さいため低波浪の出現確率に依らず高確率で検知可能である。30.0kmから沖合では両者の間には高い正の相関が認められることから、遠距離での検知には低波浪が好ましいことが分かる。一方、37.5kmでの検知確率と2m以下の有義波高との関係 (図3d) を見ると、4月は2m以下の比較的低波浪の出現確率が95%以上と極めて高いにもかかわらず、検知確率は8月に比べて10%低くなった。04ビーム沿いの受信信号のSN比を見たところ、4月は日中低く夜高くなる形の明確な日周変動が確認できた。4月の日中は、電離層によって当該周波数帯の外来ノイズが反射された結果SN比が低くなり、同じ波浪条件であっても8月より検知確率が低くなっていると考えられた。従って、波高が1-2m程度の場合、電離層による外来ノイズの影響を低減することが陸棚斜面上での検知確率を向上させるために必要となる。

##### (2) 海洋レーダデータ同化実験

3次元海洋モデルによるCase03 (津波+その他) 計算流速のうち、高周波成分はCase01 (津波のみ) の計算結果と低周波成分はCase02 (その他のみ) の計算結果とほぼ同じである。これにより、高周波成分を使えば、津波による表面流速を全層に同化するような過剰な同化をすることを避けることができることが分かった。

津波流速の同化方法について検証した。津波流速を表層にのみ同化した場合、水位変動が小さく、全層一律に同化した場合は津波の影響が小さくなる。180分後以降で水位および流速の再現性が低下した (図4)。高周波成分を全層にナッジングした場合、津波到達直後の修正量を大きくするAssm2-bで比較的良好な結果が得られるものの、水位は期間を通じて低くなる。一方、高周波成分をソースとして直接流速に付加した場合、反射時 (津波の逆流時) は付加しない操作を加えることなど (Assm3-c) により、Assm3-a, b1に比して、より良好な水位と流れの再現性を得ることができた。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計11件)

1) 尾方浩平, 小田切祐樹, 藤良太郎, 日向博文, 短波海洋レーダによる津波検知性能の季節変

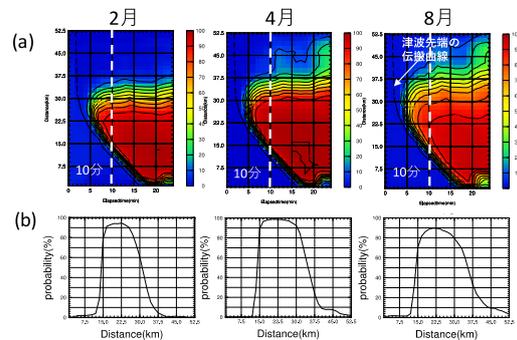


図2 (a) 04ビーム上での2月 (左), 4月 (中), 8月 (右) の津波検知確率. (b) 各月の津波発生10分後での津波検知確率の岸沖分布.

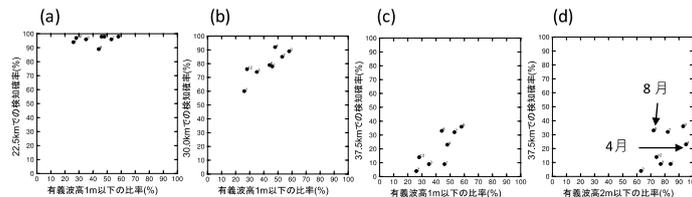


図3 有義波高1m以下の発生確率と各離岸距離における津波検知確率. (a) 22.5km, (b) 30.0km, (c) 37.5km. (d) 有義波高2m以下の発生確率と37.5km地点での津波検知確率. 津波検知確率はいずれも津波発生10分後の値.

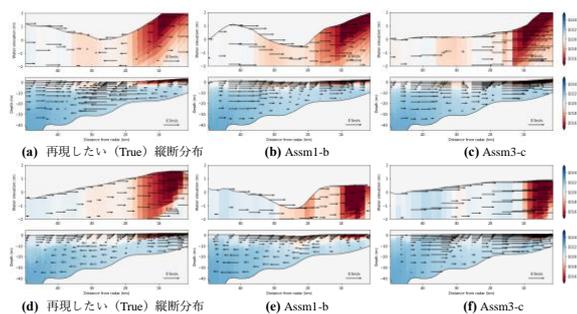


図4 計算開始120分後 ((a)~(c)) 300分後 ((d)~(f)) の湾口-湾奥方向の水位・流速・密度の縦断面分布 (下段), 及び湾奥表層部の拡大図 (上段)

の再現性が低下した (図4)。高周波成分を全層にナッジングした場合、津波到達直後の修正量を大きくするAssm2-bで比較的良好な結果が得られるものの、水位は期間を通じて低くなる。一方、高周波成分をソースとして直接流速に付加した場合、反射時 (津波の逆流時) は付加しない操作を加えることなど (Assm3-c) により、Assm3-a, b1に比して、より良好な水位と流れの再現性を得ることができた。

- 化, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) (受理)
- 2) 入江政安, 日下部包, 山西悟史, 日向博文, HF レーダーによる観測津波流速のデータ同化に関する基礎検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) (受理)
  - 3) 田中良仁, 上原史洋, 日向博文, 藤良太郎, 遠州灘における海洋レーダの津波観測性能評価-仮想津波観測実験を用いた検討-, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74(2), 2018, I\_523-I\_528.
  - 4) 門廻充侍, 高橋智幸, 日向博文, 藤良太郎, 今村文彦, 1 局の海洋レーダを用いた津波波峰推定法の検討とその適用例, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74(2), 2018, I\_511-I\_516.
  - 5) Ogata Kohei, Seto Shuji, Fuji Ryotaro, Takahashi Tomoyuki, Hinata Hirofumi, Real-Time Tsunami Detection with Oceanographic Radar Based on Virtual Tsunami Observation Experiments, Remote Sensing, 10(7), 1126, 2018.
  - 6) Toguchi Yu, Fujii Satoshi, Hinata Hirofumi, Tsunami waves and tsunami-induced natural oscillation determined by HF radar in Ise Bay, Japan, Journal of Geophysical Research: Oceans, 123 (4), 2018, 2965-2980.
  - 7) 岡本萌, 高橋智幸, 日向博文, 藤良太郎, チリ沿岸で発生する遠地津波を対象とした海洋レーダの観測性能に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 73(2), 2017, I\_433-I\_438.
  - 8) 尾方浩平, 藤良太郎, 日向博文, 仮想津波観測実験に基づく海洋レーダによるリアルタイム津波検知手法の開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 73(2), 2017, I\_1615-I\_1620.
  - 9) Ryotaro Fuji, Hirofumi Hinata, Temporal variability of tsunami arrival detection distance revealed by virtual tsunami observation experiments using numerical simulation and 1-month HF radar observation, Journal of Oceanography, 73(6), 2017, 725-741.
  - 10) 渡久地優, 藤井智史, 日向博文, 海洋レーダを用いた伊勢湾における津波の到来・副振動観測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 72(2), 2016, I\_1723-I\_1728.
  - 11) 日向博文, 陳敏坤, 片岡智哉, 紀南分岐流 (振り分け潮) の短周期変動に与える海上風影響について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 72(2), 2016, I\_462-I468.
- [学会発表] (計 17 件)
- 1) Tsunami detection technique using by HF radar, HINATA Hirofumi, SENSISTEK-2018, 2018.
  - 2) Tsunami wave-front detection with oceanographic radar based on virtual tsunami observation experiments, Kohei Ogata, Ryotaro Fuji and Hirofumi Hinata, The 4th Ocean Radar Conference for Asia-Pacific, 2018.
  - 3) Verification of Ocean Radar Tsunami Observation of the 2011 Tohoku Tsunami by Numerical Simulation in Ise Bay and Mikawa Bay, Japan, Yu Toguchi, Satoshi Fujii and Hirofumi Hinata, The 4th Ocean Radar Conference for Asia-Pacific, 2018.
  - 4) Examination for moment magnitude of the small tsunami observable by oceanographic radar installed in Wakayama prefecture, S. SETO, T. TAKAHASHI, H. HINATA, R. FUJI and F. IMAMURA, Asia Oceania Geoscience Society, 2018.
  - 5) 仮想津波観測実験に基づく海洋レーダによるリアルタイム津波検知性能の検討, 尾方浩平, 藤良太郎, 日向博文, 土木学会四国支部第 24 回技術研究発表会, 2018.
  - 6) 津波シミュレーションを用いた海洋レーダによる伊勢湾での津波観測の検証, 渡久地優, 藤井智史, 日向博文, 九州大学応用力学研究所研究集会「海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用」, 2017.
  - 7) A Study of Real-Time Detection Distance of Tsunami Arrival Based on Virtual Tsunami Observation Experiments using Numerical Simulation and HF Radar Observation, Ryotaro Fuji, Kohei Ogata, Hirofumi Hinata, International Radiowave Oceanography Workshop, 2017.
  - 8) Temporal Variability of Tsunami Arrival Detection Distance Revealed by Virtual Tsunami Observation Experiments using Numerical Simulation and One-Month HF Radar Observation, Ryotaro Fuji, Hirofumi Hinata, International Radiowave Oceanography Workshop, 2017.
  - 9) A study of real-time detection distance of tsunami arrival based on virtual tsunami observation experiments using numerical simulation and HF radar observation, Ryotaro Fuji, Hirofumi Hinata, International Tsunami Symposium, 2017.
  - 10) Temporal variability of tsunami arrival detection distance revealed by virtual tsunami observation experiments using numerical simulation and one-month HF radar observation, Ryotaro Fuji, Hirofumi Hinata, International Tsunami Symposium, 2017.
  - 11) Characteristics of Tsunami- Induced Waves and Harbor Oscillations in Ise Bay by Using Oceanographic Radar, International Tsunami Symposium, Yu Toguchi, Satoshi Fujii and Hirofumi Hinata, 2017.
  - 12) 仮想津波観測実験に基づく海洋レーダによるリアルタイム津波検知手法の開発, 尾形浩平, 藤良太郎, 日向博文, 土木学会四国支部第 23 回技術研究発表会, 2017.
  - 13) 海洋レーダを用いた伊勢湾・三河湾における連結副振動の観測, 渡久地優, 藤井智史, 日向博文, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017.
  - 14) Temporal variability of tsunami detection distance revealed by virtual tsunami observation experiments using HF radar, Ryotaro Fuji and Hirofumi Hinata, JpGU-AGU Joint Meeting 201, 2017.
  - 15) 海洋レーダ観測による津波到来時の伊勢湾の固有振動モードに関する考察, 渡久地優, 藤井智史, 日向博文, 九州大学応用力学研究所研究集会「海洋レーダを用いた海況監視システム

- の開発と応用」, 2016.
- 16) Observation of the 2011 tohoku tsunami by using HF radar in ise bay, Yu Toguchi, Satoshi Fujii, Hirofumi Hinata, ISAP 2016 - International Symposium on Antennas and Propagation, 2016.
- 17) The observation of propagating tsunami wave and response characteristics in IseBay by HF radar, Toguchi, Y., Fujii, S., Hinata, H., The 3rd ocean radar conference for Asia-Pacific, 2016.

〔産業財産権〕

○取得状況（計1件）

名称：海洋レーダによる津波検知装置，海洋レーダに掘る津波検知プログラム，及び海洋レーダの性能検証方法

発明者：藤良太郎，永松宏，小笠原勇，日向博文

権利者：愛媛大学，国際航業株式会社

種類：特許

番号：6260877

取得年：2017年

国内外の別：国内

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：高橋智幸

ローマ字氏名：(TAKAHASHI, tomoyuki)

所属研究機関名：関西大学

部局名：社会安全学部

職名：教授

研究者番号（8桁）：40261599

研究分担者

研究分担者氏名：入江政安

ローマ字氏名：(IRIE, masayasu)

所属研究機関名：大阪大学

部局名：工学研究科地球総合工学専攻

職名：准教授

研究者番号（8桁）：00379116

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：片岡智哉

ローマ字氏名：KATAOKA, tomoya

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。