

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：16301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2020～2023

課題番号：20KK0093

研究課題名（和文）インドネシアにおける仮想津波観測実験 海洋レーダ津波防災活用技術の飛躍的発展

研究課題名（英文）Virtual Tsunami Observation Experiments in Indonesia - A Breakthrough in Ocean Radar Tsunami Disaster Prevention Application Technology

研究代表者

日向 博文（Hinata, Hirofumi）

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）：津波データ同化方法、特に観測点の選択方法と観測誤差のビーム角度依存性を考慮した方法を開発し、津波予測精度を向上させた。国内海洋レーダ局を用いて受信信号に混入するノイズおよび混信の状況を考慮したハードウェア、ソフトウェア上での信号処理法を検討した。伊勢湾の海洋レーダを用いて河川水流入に伴う塩分低下の波浪計測への影響、並びに波浪スペクトルを推定するための適切な品質基準について考察した。波浪スペクトルを推定するための新たな深層学習モデルについても検討した。ジャワ島南部沿岸域住民を対象とした津波避難に関する意識調査、2018年パル津波の被災住民を対象とした津波避難行動の実態調査と記録映像を分析した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：海洋レーダで計測された流速の誤差分布やその時間変動について、他測器によるデータとの比較（実施が非常に困難）ではなく、EOF解析とSelection Ruleを適用することで、把握できることを示せた。低塩分海域におけるレーダを用いた波浪計測方法について方向性を示せた。文化や行動規範の異なる2カ国で津波避難行動について検討することによって、津波避難のトリガーや今後の展開についてより深い理解が得られた。社会的意義：ここで得られた知見や技術は、現在、民間企業が日本沿岸全域に展開を試みている海洋レーダに適用可能であり、今後、よりきめ細かな津波や波浪情報の提供につながることを期待される。

研究成果の概要（英文）：A tsunami data assimilation method, particularly a method for selecting observation points and a method that accounts for the beam angle dependence of observation error, has been developed to enhance the tsunami prediction performance. Signal processing techniques on hardware and software have been studied in consideration of noise and interference conditions in received signals using domestic ocean radars. The effects of salinity reduction due to river water inflow on wave measurements and appropriate quality control criteria for estimating wave spectra have been discussed using ocean radars in Ise Bay. A novel deep learning model for estimating wave spectra has been also examined. A survey on tsunami evacuation awareness among residents in the southern coastal area of Java Island, and a survey and video recordings of tsunami evacuation behavior among the residents affected by the 2018 Palu tsunami have been analyzed.

研究分野：海岸工学，沿岸海洋学

キーワード：HFレーダー 津波 波浪 住民避難

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地震波解析に基づく津波警報第1報は、巨大地震津波などに対し過小になる可能性が高い。津波による人的被害を減らすには、沖合での津波計測が極めて重要である。海洋レーダは、陸棚縁から港湾域まで津波をシームレスに計測する能力を有する。津波計測性能は背景ノイズなど電波環境に依存するため、その統計的評価には1年程度の観測が必要であり、その評価については紀伊水道陸棚斜面部に限られていた。また、レーダの津波避難への応用は手付かずの状態であった。インドネシアは、海底地滑りや火山活動に伴う非地震性の津波を含む多様なタイプの津波が発生するなど、日本と多くの類似点を有している。一方で、電波環境や波浪条件、宗教・文化の影響を受けた災害観や防災の歴史の変遷という点では相違点も多い。本研究では、我々の知見や技術をインドネシアに適用することでそれらの課題を発見し、その解決を通じてレーダ津波防災技術の飛躍的な発展を目論んだ。

2. 研究の目的

日本政府はインドネシア政府と協力しつつ2019年12月にジャワ島南岸に2局のレーダを設置し観測を開始した。当初、研究者への観測データ提供について準備が進められていたものの、新型コロナウイルスの影響やインドネシアの国内事情により事業関係者間のスムーズなコミュニケーションが困難となり、また、同時にレーダの動作状況も不安定化していった。そこで、レーダに関する技術開発は、国内レーダの受信波を利用し、避難に関しては、ジャワ島沿岸部の住民に対するヒアリング等を実施することとした。国内レーダについては、実績のある紀伊水道に加え、新たに伊勢湾や遠州灘でのデータを活用した。具体的な目的を以下に示す。

(1) レーダ流速測定に固有の誤差、すなわち誤差のビーム交差角度依存性を明らかにし、依存性を考慮したデータ同化手法を開発し、津波予測精度の向上を図る。なお、既往の研究では交差角度依存性を考慮せず、空間的に一様に測定誤差(東西方向、南北方向)を与えている。

(2) 短波帯周波数を利用する海洋レーダにおける電磁環境とそれが観測に及ぼす影響を明らかにし、流速や波浪の観測に対してノイズの影響低減を図る。インドネシア(16MHz)と近い周波数(13.5MHz)で運用されている国内レーダ(静岡県御前崎市設置)を用いて検討を進める。電離層や大気現象(特に雷)の状況は赤道直下とは異なるが、近い周波数であり近距離での伝搬特性が似ていること、ともに国際短波放送周波数帯に近いことなどを考慮した。

(3) レーダによる波浪計測は、海面での散乱強度に依存するが、塩分が低い汽水域では、電気伝導率の低下により受信強度が弱化する(Gurgel et al., 1999)。インドネシアの雨季にはこの現象が顕著になると予測される。ここでは、わが国の代表的な汽水域の一つである伊勢湾において、ベイズの定理に基づく波浪スペクトル逆推定法(BIM)の適用性を検証するとともに、精度向上に効果的な品質確保(Quality Control: QC)を導入した新たなアルゴリズムを開発する。

(4) 日本とは国民性の異なるインドネシアの人々の避難行動特性を明らかにし、両国間の避難行動の相違点を解明する。また、陸棚縁から港湾域まで津波を面的にシームレスに計測する能力を有する海洋レーダの津波検知技術の強みを最大化することを目指す。

3. 研究の方法

(1) ビーム方向誤差を一定とし、東西方向、南北方向流速の測定誤差のビーム角度依存性を最尤法に基づいて明らかにする。続いて、2014年4月1日の00:00-16:39に紀伊水道で計測されたデータに経験的直行関数 EOF を適用し、ノイズ成分を抽出し理論と比較することで、理論の正確性と EOF による誤差推定の可能性を検証する。角度依存性を考慮した誤差をデータ同化実験(最適内挿法)に応用し津波波形の再現を試みる。実験では、単純な地形(水深500m、直線海岸)と円形の津波波源(波高1mと5m)を用い、海岸に上の2局のレーダで津波を計測した。

(2) SDR (Software Defined Radio: ソフトウェア無線)を用いて、海洋レーダ使用周波数の周辺周波数帯における電磁環境を計測し、レーダにて受信されるノイズの時空間特性を把握する。続いて、表層流速や波浪計測へのノイズの影響とその抑制法を検討する。

(3) 国交省中部地方整備局が伊勢湾沿岸に設置した海洋レーダ3局(N局、T局、O局)で観測されているDSを用いて波浪計測手法を検討する。同時に湾内に設置された波浪計及び水質計のデータを用いて海洋レーダで計測された有義波高の検証、並びにその誤差要因の考察する。海域において2016年から2018年までの5つの出水イベントを解析期間として選定し、波浪計設置2箇所における有義波高 $H_{5\%}$ をBarrick式(Barrick, 1977)で計算した。

(4) ジャワ島南部沿岸域の住民を対象とした津波避難に関する意識調査、および2018年パル津波の被災住民を対象とした津波避難行動の実態調査と記録映像分析を実施する。現在のインドネシア社会では、直感に基づいて避難行動の有無を決定する人々が大多数を占めているが、将来的には日本社会と同様に、事前の避難計画や防災教育が充実し、避難開始の判断に論理性を有する人々が増加することが予想される。この点を踏まえ、「直感判断型住民」と「論理判断型住民」の関係性についても、東日本大震災における生存者の証言記録を用いた分析を行った。

4. 研究成果

(1) EOF によるノイズ成分の確率分布について理論と比較したところ、分布の主方向や分布形状に対する角度依存性について良い一致を見せた(図1)。そこで、誤差のビーム交差角度依存性を考慮した場合、既往の研究と同様に誤差を空間的に一様とした場合で、津波データ同化

実験を行い両者の比較を行った。その結果、依存性を考慮した方が、海岸での最大波高とその到達時刻を用いた評価で 29%程度正確性が向上することを確認した。依存性を考慮しない場合、観測誤差が大きい地点での観測値の重みを過大評価してしまうためである(Sahana et al., in revision)。

(2) SDR 受信機によるモニタの結果、レーダ受信部高周波段の BPF(Band Pass Filter)の通過帯域にも強力な放送波が存在することで、レーダ周波数帯域外であっても強力な放送波による混変調を起こし受信周波数帯に混入したり、広帯域な初段受信アンプが飽和する可能性を確認した(図 2)。特に短波帯では電離層の季節や日周期変動により伝搬状態が変化し、放送を含めて短波帯通信ではその変化に対応して使用する周波数や時間帯が変化する。御前崎市設置のレーダには、夕刻から早朝にかけてノイズレベルが約 20dB 上がり SN 比が劣化していた。

ノイズ影響軽減の方策として、受信機内でのフィルタの狭帯域化と受信ゲート信号の整形を行うことにより、必要な距離範囲内の情報を含む信号強度が増し SN 比を改善できることを確認した。また、アレイアンテナ処理において、適応ビームフォーミングである MVDR を用いることでドップラスpektrルの SN 比が改善できること、到来方向推定法の MUSIC を用いることで、特にボアサイトから離れた方位で従前方法に対して同じ SN 比でも精度が高いことを確認した。

(3) 波浪計が設置されている湾内 2 箇所において有義波高の精度検証を行った。観測点近傍の格子点において各時刻に計算された H_{Sr} (最大数: 24) をみると、その最小値 $H_{Sr,min}$ (図 3(b)及び(c)の太実線)が有義波高の観測値 H_{So} とよく一致していた。一方、流量ピーク後(図中矢印)、 H_{Sr} の計測精度の著しい低下が確認され、特に河口近くに位置する Stn. A で顕著であった(図 3(b))。これは淡水化に伴う電気伝導率の低下(図 3(a))により SN 比が減少したためである。

DS の 2 次散乱に外的ノイズが混入すると、SN 比の増加をもたらし、結果として H_{Sr} は過大評価される。これが SNR を QC 基準として用いることが難しい理由であると推察される。そこで、DS から波浪スペクトルを推定するための QC 基準として Barrick 式の活用を検討した。ここでは、 H_{Sr} 、SNR のそれぞれを QC 基準として用いて BIM を適用することで、有義波高を計算し、これらと比較することで、 H_{Sr} の QC 基準として用いることの有効性を検証した。結果として、 H_{Sr} の QC 基準としての活用は、波浪スペクトル推定に有用な DS を選択し、有義波高の精度向上に寄与することがわかった。

(4) インドネシア人の津波避難行動のトリガー分析: インドネシア人の避難行動を調査した先行研究をレビューした結果、津波災害時に避難した理由(避難トリガー)は、頻度の高い順に、行政からのメッセージ、避難者の目撃、揺れ、津波の目撃、海からの異音、他者の声であることが明らかになった。これらの情報発信源は、インドネシアにおいて地域に切迫感を醸成する典型的なものである。

2018 年インドネシア・パル津波における情報発信源と切迫感の関係: 2018 年パル津波で記録された CCTV カメラの映像を分析し、同定できた 53 名の情報発信源の暴露状況を時系列で整理した結果、68%の人々が津波来襲前に避難を開始していたが、揺れを感じてすぐには避難を開始していなかった。避難者の目撃は揺れに次いで生成される情報発信源であるが、津波来襲前に生成された避難者の目撃の影響度は来襲後に比べて小さく、継続的に作用することで徐々に地域の切迫感を醸成する性質があることがわかった。さらに、別の場所で記録されたスマートフォンの映像を分析し、同定できた 278 名に対して同様の分析を行った結果、少なくとも 5 名が大声で避

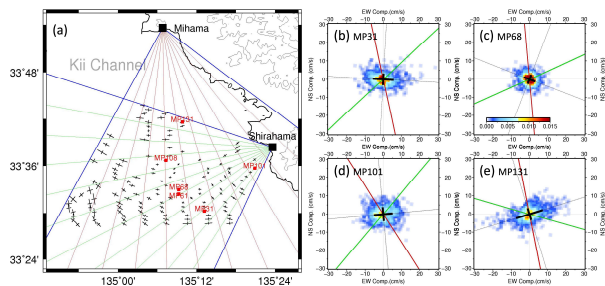


図 1 (a)計測誤差分布. (b)-(e)代表点でのノイズ流速成分確率分布とレーダビーム(緑線, 赤線)交差角度の関係。

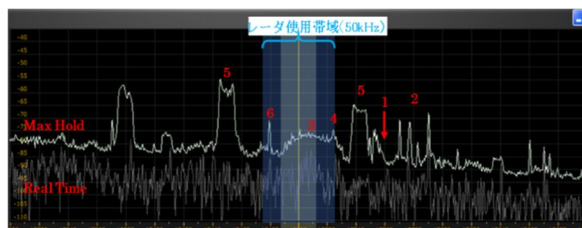


図 2 レーダ使用周波数帯の近隣周波数のスペクトル例。1~5 は、放送局を含む他の無線局の信号と推定される。

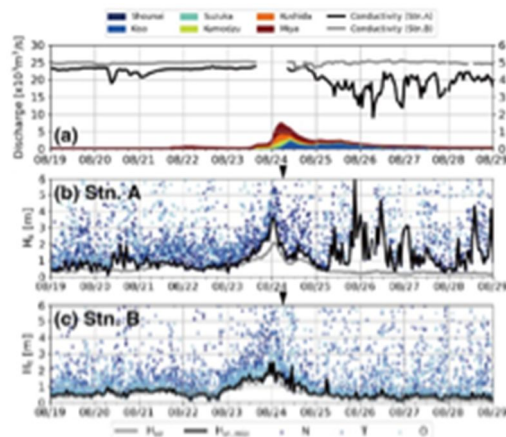


図 3 2018 年 8 月 19 日~8 月 29 日における流量・電気伝導率(a)、計測された有義波高(b) Stn. A, (c) Stn. B) の時系列

難を呼びかけており、「他者の声」としての情報発信源となっていた。その情報発信源の影響範囲には 30%の人々が含まれており、呼びかけの言葉が聞き取れる距離でなければ影響度は小さいことが判明した。

避難行動シミュレーションと住民の判断タイプ：パル湾東海岸の住宅エリアを対象に避難行動シミュレーションを実施した結果、揺れによって醸成される切迫感のみで避難を開始する住民の割合を 28%とする必要があることが明らかになった。また、地域に醸成される切迫感を高める要因として、これまでは行政や住民による呼びかけなどの情報発信源に限定してその特徴が分析されてきたが、地震発生からの時間経過など住民を取り巻く状況の変化も地域に醸成される切迫感に大きな影響を与えていることが明らかになった。避難開始判断における論理性の有無によって住民は「論理判断型」と「直感判断型」に分類される。東日本大震災の証言記録を分析した結果、全体として、論理判断型と直感判断型の住民の比が 2 対 8 であることが、災害経験の有無や防災教育によって潜在的な論理判断型住民の割合が増減し、災害時に彼らの判断条件がどの程度満たされるかによって地域差が生じることが明らかになった。

引用文献

- 1) Barrick, D.E.: The ocean wave height nondirectional spectrum from inversion of the HF sea-echo Doppler spectrum. Remote Sensing of Environment, Vol. 6, pp. 201-227, 1977.
- 2) Gurgel, K.W., Essen, H.H. and Kingsley, S.P.: High-frequency radars: physical limitations and recent developments. Coastal Engineering, Vol. 37, pp. 201-218, 1999
- 3) Sahana, M. I., Fuji, R., Takahashi, T., Hinata, H.: Tsunami Data Assimilation using High-Frequency Radar-Derived Surface Currents by Considering Beam Angle-Dependent Measurement Error Distributions. Earth and Space Science (in revision).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Sujatmiko Karina Aprilia, Ichii Koji, Murata Soichiro, Mulia Iyan Eka	4. 巻 18
2. 論文標題 Application of Stress Parameter from Liquefaction Analysis on the Landslide Induced Tsunami Simulation: A Case Study of the 2018 Palu Tsunami	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 199 ~ 208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jdr.2023.p0199	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Karina Aprilia Sujatmiko, Yoshihiro Okumura	4. 巻 925
2. 論文標題 Numerical Analysis of Evacuation Start in Pangandaran	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.	6. 最初と最後の頁 12044
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1755-1315/925/1/012044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kataoka Tomoya, Fujiki Takashi	4. 巻 0
2. 論文標題 Applicability of ocean wave measurements based on high-frequency radar systems in an estuary region	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 1~16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21664250.2023.2275469	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 0件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 長江 要, 藤井 智史
2. 発表標題 アレイアンテナを用いた流速計測における到来方向推定法の適用
3. 学会等名 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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Muhammad Irham Sahana, Ryotaro Fuji, Tomoyuki Takahashi, Hirofumi Hinata
2. 発表標題 Tsunami Data Assimilation of High-Frequency Radar-Derived Surface Currents: Accounting for Measurement Error Distribution
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2024(国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藤 良太郎 (Fuji Ryotaro) (00856883)	愛媛大学・防災情報研究センター・特定研究員 (16301)	
研究分担者	藤井 智史 (Fujii Satoshi) (30359004)	琉球大学・工学部・教授 (18001)	
研究分担者	片岡 智哉 (Kataoka Tomoya) (70553767)	愛媛大学・理工学研究科(工学系)・准教授 (16301)	
研究分担者	奥村 与志弘 (Okumura Yoshihiro) (80514124)	関西大学・社会安全学部・准教授 (34416)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------