

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24310132

研究課題名(和文)津波減衰予測モデルの確立

研究課題名(英文)Establishment of the tsunami decay forecasting model

研究代表者

林 豊 (Hayashi, Yutaka)

気象庁気象研究所・地震津波研究部・主任研究官

研究者番号：40370332

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)：津波観測データの解析、津波数値計算、常時波浪・潮汐の解析、理論的考察を組合せて、「津波はどのように減衰するのか？」の解明を進めた。観測データから推定される外洋での顕著な津波反射波が生じる場所、津波数値計算結果と常時波浪に見られる内湾・近海での津波挙動と周期の関係、外洋での散乱と津波の到達から最大波までの時間との関係に関する理論的考察などについて、新たな知見を得た。これらの成果は、「いつまで津波の警戒が必要な状態が続くのか？」をリアルタイムに予測できる手法の開発に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：Studies focusing on "How tsunamis decay?" have been carried out by combining the analysis of observation data, numerical experiments of tsunami, analysis of ordinary coastal waves, and theoretical considerations. The new findings of this project include: the distribution of tsunami reflection points as estimated by observed waveforms, the periodic characteristics of tsunamis in inner bays or coastal areas derived from numerical experiments and ordinary coastal wave observations, and the theoretical considerations in the relationship between the strength of scattering in the open sea and the delay time between the arrival of the initial tsunami and its maximum tsunami. These findings will contribute to the development of a methodology to forecast "How long does this tsunami hazard continue?" in real-time.

研究分野：海岸工学・地球物理学

キーワード：津波 コーダ波 水位観測 津波予測 伝達関数

### 1. 研究開始当初の背景

津波災害対応の現場では、警報の解除と災害対応業務の終了を同期させる運用がなされる。これは、警報を解除する技術を向上できれば、解除後の津波災害リスクの軽減し、また、解除の遅れで生じる対策経費と遺失利益を避けられることを意味する。しかし、津波警報を解除する明確で合理的・科学的な基準がない状態であった。実際に、注警報の解除後に最大の津波が観測されることも多かった(林, 2012)。

また、津波伝播の理論的な解明が進んだ現在でさえも、実用的な地形モデルに基づく数値計算で終息に至るまでの津波の後続波形を再現することは、一般に非常に困難だと考えられている。

一方、津波減衰過程の特徴を理解する上では、長時間の津波観測波形データの解析と、条件を管理した数値実験を通じて津波の特徴を抽出するアプローチが、有望だと考えられつつあった。例えば、振幅の移動自乗平均(MRMS 振幅)の時間変化を津波波源形成・伝播経路・観測点近傍の三段階の効果の畳み込み積分で表現するモデルが組み立てられていた(図1)。

しかし、津波の減衰特性を実際の観測データの裏付けがある方法で研究する試みがほとんどないなど、津波推移のリアルタイム予測と津波警報解除タイミングの予告情報を実現するための知見不足は明白であった。

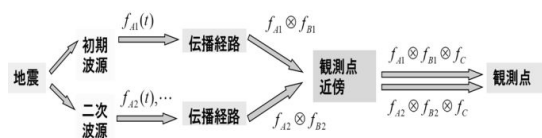


図1 津波減衰の簡単なモデル設定の例(林・他, 2011)

### 2. 研究の目的

「いつまで津波の警戒が必要な状態が続くのか?」をリアルタイムに予測できる手法の開発を目指すために、津波観測データの解析、津波数値計算、常時波浪・潮汐の解析、理論的考察を組合せて、「津波はどのように減衰するのか?」を解明し、平均津波振幅の時間変化モデルを改良することを目的とした。

### 3. 研究の方法

以下の方法で研究を進めた。

(1) 小型の可搬型水圧計を用いて常時波浪・潮汐を観測し、津波と同じ周期帯の沿岸波の挙動を推定する。また、沖合波浪計と検潮所の津波観測データの比較や、実地形データと試験信号を用いた津波数値実験を通じて、沿岸での津波挙動の特徴を調べる。

得られた結果を用いて、観測点近傍の効果を決めるため、沿岸での津波挙動を定量化・関数化を目指す。すなわち、「沿岸の津波挙動(増幅・周期・減衰等)は、どの空間規模(港・湾・陸棚等)の海底地形に支配さ

れているのか?」の解明を進める。

(2) アナログで観測記録が収録されていた時期を含めて過去の国内津波波形記録を分析し、津波の振幅の減衰率、スペクトルの時間変化を定量的に測定する。また、地震コダ波の散乱理論も参考に、津波減衰機構を理論的に考察する。

これによって、MRMS 振幅の時間変化モデルに、沿岸部での増幅と時間経過に伴う減衰過程の周期依存性を組み込めるようにし、また、様々な波源域・観測点の組合せに対するモデルパラメータ決定ができるようにする。すなわち、「津波の発生海域・観測地域・周期によって、津波の減衰パターンはどう異なるのか?」の解明を進める。

(1),(2)に関する新たな知見を得て、津波の推移のリアルタイム予測と津波警報解除タイミングの予告情報を実現に近づくことを目指した。

### 4. 研究成果

#### (1) 定常な海面変化の観測

小型で現地収録方式の可搬型水圧計を組み込んだ水圧観測装置を製作し、これを用いた常時波浪・潮汐の観測を仙台湾、土佐湾、土佐清水港で実施した。

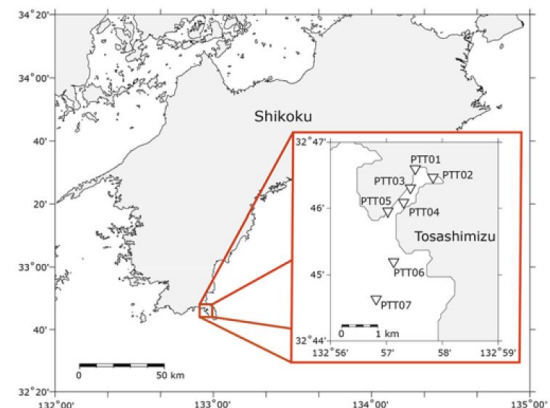


図2 土佐清水港での水圧観測点の配置(田野邊・他, 2016: 学会発表)

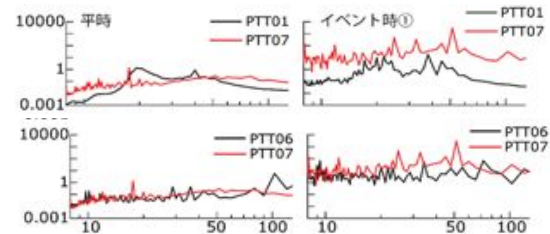


図3 平時と気象擾乱イベント時に分けた各観測点のスペクトルの比較例。横軸: 周期(分)、縦軸: スペクトル強度。(田野邊・他, 2016: 学会発表)

ここでは、土佐清水港(図2)での観測・解析例を示す。観測値に含まれる津波と同様の周期帯の信号に着目して、平時および気象擾乱の影響がある時のそれぞれについて、ス

ペクトル解析(図3)、相互相関関数の決定などを行った。

解析の結果から、湾内外を伝播する津波について、周期による特性の違いが明らかになった。例えば土佐清水港では、観測された波の卓越周期が湾内部では20分程度であり、これが湾の固有周期にあたるので、湾の地形条件が湾内部の波の伝播特性を支配していると言える。一方、気象擾乱時に湾外で卓越した周期50分程度の波は、土佐清水港の外部に励起源があると推定できる。土佐清水港での津波挙動を支配する波の発生源が周期帯によって異なることを、このように、観測データの根拠をもって示すことができた。

## (2) 数値実験による沿岸の津波挙動の解明

デジタル海底地形データを作成し、模擬津波を用いた数値実験を行った。

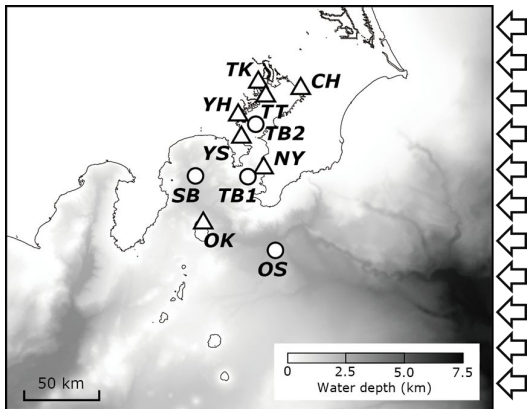


図4 東京湾周辺での数値実験領域。○は実観測点、△は仮想観測点、矢印は模擬津波の入射方向。(今井・他,2014:雑誌論文)

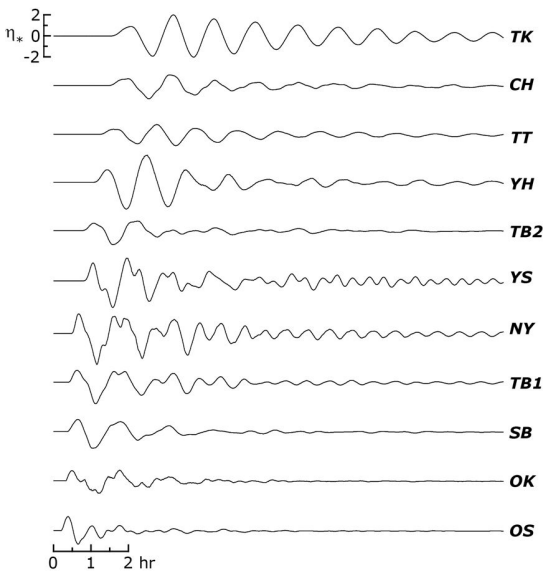


図5 東京湾周辺で周期30分の津波を入射した場合の計算津波波形(今井・他,2014:雑誌論文)

ここでは、津波伝播特性を調べるために、太平洋を西進して関東地方に到来する津波

を模した数値実験例(図4)を示す。計算領域の東側から正弦波を入力し、観測点と仮想観測点での津波波形を計算する方法で行った。

周期30分以上の波を入力すると、東京湾に隣接する相模湾内で周期70分程度の湾内振動が励起される。この振動は、東京湾口から東京湾奥へと進行し、その過程で第二波が最大になる変形を生じる(図5)。入力波の周期が短ければ、相模湾での大規模な湾内振動は励起されない。この例では、東京湾で観測される70分程度の周期の津波は、津波によって相模湾で励起される湾内振動に起源があること、東京湾には湾奥で第二波が最大波になりやすい仕組みがあること、などが分かった。

## (3) 津波観測データを用いた減衰過程の解析

観測された津波波形について、MRMS振幅での検相、減衰率決定、津波走時解析からの反射波の特定、などの処理を行って、津波エネルギーの減衰過程や後続波の要因を検討した。

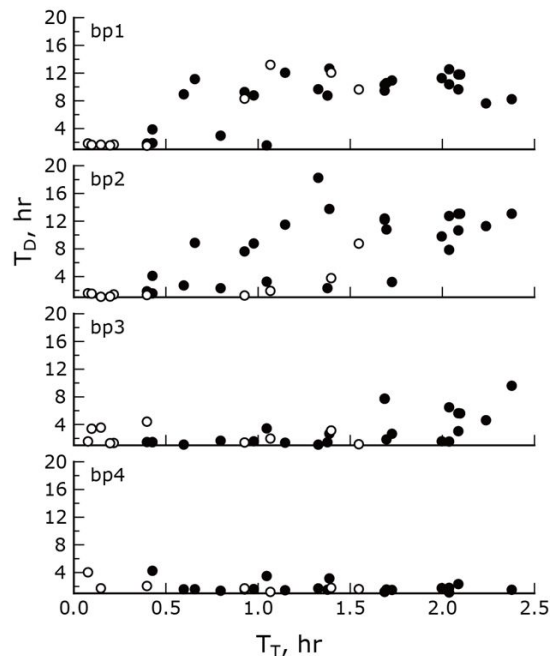


図6  $T_T$ (地震発生から津波到達までの時間)と $T_D$ (振幅増幅時間;津波到達からMRMS振幅が最大になるまでの時間)の関係。bp1~bp4:2~16分、16~32分、32~64分、64~128分の各周期帯、○:沖合のGPS波浪計、●:検潮所。(今井・他,2014:雑誌論文)

ここでは、2011年東北地方太平洋沖地震による津波の解析例を示す。この津波では、周期帯毎、観測点の区分(海岸か沖合)毎に、津波の後続波の到来タイミング(図6)と減衰率などを解析した。

津波到達時間が1.5時間以上の場合、32~64分の周期帯で4時間以上の振幅増幅時間が、

津波到達時間が1時間以上では、32分以下の短い周期帯で8~12時間の振幅増幅時間となることがある(図6)。このように、波源から津波到達までの時間(距離)が長くなると、津波伝播経路に含まれる海底構造・地形の影響を受けて、津波の第一波到達から数時間以上かけた振幅の増幅が起こりやすくなると考えられる。振幅増幅時間の観測点による違いが大きいのは、津波の後続波に沿岸地形や湾構造など観測点固有の影響がある程度大きいことを示唆している。また、沖合のGPS波浪計の場所に比べて海岸の検潮所のある場所での津波の方が、減衰に要する時間が10~30時間程度長いことも分かった。

#### (4) 沿岸海域での津波高の増幅特性

海岸からの離岸距離が数~20km程度の沖合に設置されているGPS波浪計や沿岸波浪計での津波観測値と、その対になる海岸にある検潮所で観測される津波の高さを比較し、沿岸海域での津波高の経験的な増幅率の式を求めた。

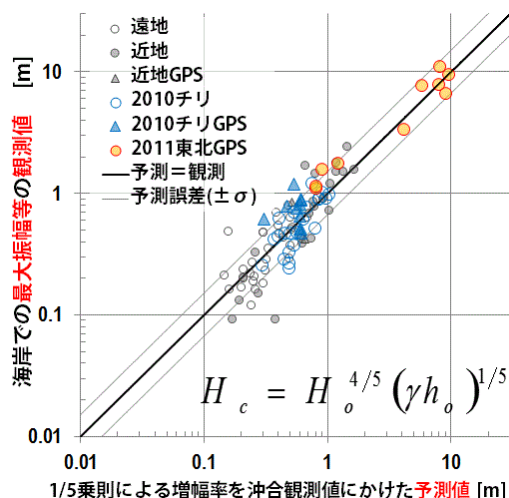


図7 沿岸海域から海岸への津波の高さの増幅率を説明する1/5乗則(林, 2016: 学会発表)

従来は、沖合から海岸への津波の高さの増幅率は、観測点の水深比の1/4乗に比例する経験式(Hayashi, 2010)が導かれていた。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震による津波観測値にこの1/4乗則の式を適用すると、海岸で3m以上になる大津波では、増幅率を2倍近く過大評価してしまう。

観測値を適切に説明するには、波高水深比が一定値に達すると津波高の増幅が頭打ちになるという考えに基づいて、1/5乗則(図7)を用いればよいことが分かった。

#### (5) まとめ

本研究課題では、「沿岸の津波挙動(増幅・周期・減衰等)は、どの空間規模(港、湾、陸棚等)の海底地形に支配されているのか?」、「津波の発生海域・観測地域・周期に

よって、津波の減衰パターンはどう異なるのか?」の解明を進めることを目的とした。

二つの質問に対する系統的で一般的な解答を得るには至らないが、いくつかの津波事例や実験フィールドについて、知見を得ることに成功した。また、これによって、上の二つの質問に対して答えを出すための研究方法を確認することができたといえる。

例えば一つ目の質問に対しては、模擬津波を用いた津波数値実験や、可搬型水圧計を用いた常時波浪の観測・解析が有効だと分かった。例えば、東京湾の津波は、数値実験と過去の観測値から、隣接する相模湾で励起される湾水振動に支配され、東京湾内では70分程度の周期の津波が卓越し、湾内の津波伝播過程において、第二波が最大化されやすいことを見出した。

二つ目の質問に対しては、周期帯毎に着目した津波観測波形の解析が有効であることが分かった。2011年東北地方太平洋沖地震の例では、波源近傍以外では、津波伝播経路内で特定の周期帯の波が励起され、当該周期帯では長時間の津波振幅増幅後に減衰が始まると考えられる。

また、MRMS振幅の時間変化を津波波源形成・伝播経路・観測点近傍の効果に分けて表現するモデルには、補正を加えるべき点があることも分かった。本研究では、観測点近傍の効果さをさらに陸棚・湾内・港内のように二~三段階に分割してモデル化することが適切な観測点があることや、沿岸海域から海岸への振幅増幅率を修正すべきことを示唆する成果がそれぞれ得られているためである。

MRMS振幅の時間変化モデルにおいて、伝播経路や観測点近傍での津波振幅の減衰や増幅の効果推定することは、本研究における上述の二つの質問に対する答えを得ることそのものなので、これらの推定方法は確率でできたと言える。しかしながら、系統的にモデルパラメータや関数群の決定をして、完全なモデルを構築するには、規模を拡大して適用例を増やした研究を継続して、さらなる知見の蓄積が必要である。

#### 参考文献

- 林 豊、津波警報を解除するタイミングに関する研究の現状と展望、駿震時報、75巻、2012、13-24
- 林 豊、越村俊一、今村文彦、遠地地震津波の減衰予測のためのMRMS振幅の時間減衰モデル、土木学会論文集 B2(海岸工学)、B2-67巻、2011、I216\_I220
- Hayashi, Y., Empirical relationship of tsunami height between offshore and coastal stations, Earth Planets Space, Vol.62, 2010, 269-275.
- 雑誌論文・学会発表番号を併記して引用した文献は、次節のリストに示す。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

今井 健太郎、田野邊 睦、林 豊、今村文彦、2011年東北地方太平洋沖地震津波における日本列島太平洋沿岸の津波減衰過程、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、B2-70 巻、2014、I\_276-I\_280  
DOI:10.2208/kaigan.70.I\_276

今井 健太郎、都司 嘉宣、林 豊、東京湾における津波伝播特性の励起源 観測と数値実験による検証、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、B2-70 巻、2014、I\_211-I\_215  
DOI:10.2208/kaigan.70.I\_211

Hoshiya, M. and T. Ozaki, Earthquake early warning and tsunami warning of the Japan Meteorological Agency, and their performance in the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0). Early Warning for Geological Disasters - Scientific Methods and Current Practice, ed. Friedemann Wenzel and Jochen Zschau, Springer, 査読有, 2014, 1-28  
DOI:10.1007/978-3-642-12233-0\_1

今井 健太郎、原田 賢治、菅原 大助、2011年東北地方太平洋沖地震津波による青森県沿岸の津波痕跡高と津波の挙動、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、B2-68 巻、2012、1376-1380  
DOI:10.2208/kaigan.70.I\_276

[学会発表](計23件)

阿部 邦昭、太平洋で観測される津波後続波での反射波の特定 2011年東北津波、日本地球惑星科学連合 2016年大会、2016.5.25、幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

林 豊、沖合と海岸の観測点での津波高の経験的關係の更新、日本地球惑星科学連合 2016年大会、2016.5.25、幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

田野邊 睦、土佐清水港の湾水振動特性に関する現地観測と予測手法に関する基礎的検討、平成 27 年度土木学会東北支部技術研究発表会、2016.3.5、岩手大学上田キャンパス(岩手県盛岡市)

阿部 邦昭、2011年東北津波において観測されたミッドウェイ本州2回反射波、日本地震学会 2015年度秋季大会、2015.10.28、神戸国際会議場(兵庫県神戸市)

Imai, K., The origin of predominant long-period tsunami in Tokyo Bay, 26th General Assembly of the International

Union of Geodesy and Geophysics (IUGG2015), 2015.6.29~30, プラハ(チェコ)

田野邊 睦、実測に基づいた土佐清水港内外の海面変動に関する一考察、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015.5.27、幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

阿部 邦昭、2011年太平洋沖東北津波の検潮観測により明らかにされたチリ、ハワイ諸島からの反射波の最大水位分布、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015.5.27、アパホテル&リゾート東京ベイ幕張(千葉県千葉市)

田野邊 睦、観測データに基づいた日本列島太平洋沿岸の津波減衰過程に関する一考察、平成 26 年度土木学会東北支部研究発表会、2015.3.7、東北学院大学工学部多賀城キャンパス(宮城県多賀城市)

田野邊 睦、日本列島沿岸部における津波減衰の周期依存性 2010年チリ中部沖地震津波と2011年東北太平洋沖地震津波、日本地震学会 2014 年度秋季大会、2014.11.24、朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター(新潟県新潟市)

阿部 邦昭、津波波形の平均化による繰り返し間隔(周期)の検出、日本地震学会 2014 年度秋季大会、2014.11.24、朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター(新潟県新潟市)

今井 健太郎、2011年東北地方太平洋沖地震津波における日本列島太平洋沿岸の津波減衰過程、第 61 回海岸工学講演会、2014.11.14、名古屋市産業労働センター

今井 健太郎、東京湾における津波伝播特性の励起源 観測と数値実験による検証、第 61 回海岸工学講演会、2014.11.14、名古屋市産業労働センター

田野邊 睦、観測に基づいたエネルギー減衰の周期依存性 2011年東北地方太平洋沖地震の事例、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014.5.1、パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

岡田 正実、チリで反射して日本で観測された津波 2011年東北地方太平洋沖地震津波、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014.5.1、パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

阿部 邦昭、最大波の遅れ時間の空間分布からみえる反射波の到達 1993年北海道南西沖津波の場合、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014.5.1、パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

田野邊 睦、観測に基づいたエネルギー減衰の周期依存性 2011年東北地方太平洋沖地震の事例、平成 25 年度土木学会東北支部研究発表会、2014.3.8、八戸工業大学(青森県八戸市)

阿部 邦昭、バンドパスフィルターを通してみた津波遠方反射波、日本地震学会 2013 年度秋季大会、2013.10.7、神奈川県民ホ

ール・産業貿易センター(神奈川県横浜市)  
阿部 邦昭、西南日本太平洋岸で観測された津波に見られるハワイ諸島からの反射波の性質、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、2013.5.20、幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

今井 健太郎、2011 年東北地方太平洋沖地震津波による青森県沿岸の津波痕跡高と津波の挙動、第 59 回海岸工学講演会、2012.11.15、広島国際会議場(広島県広島市)

阿部 邦昭、検潮記録の読み取りによる 8 津波の減衰率、日本地震学会 2012 年度秋季大会、2012.10.17、函館市民会館(北海道函館市)

②岡田 正実、検潮記録にみる閉鎖性内湾の津波の伝播と波高分布、日本地震学会 2012 年度秋季大会、2012.10.17、函館市民会館(北海道函館市)

② Hoshiba, M., Expectation of ground motion in Earthquake Early Warning using real time monitoring of wavefield- a method without information of hypocenter and magnitude -. The 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE), 2012.9.25, リスボン(ポルトガル)

② Hayashi, Y., Research for improvement of tsunami warning of Japan after the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. Joint Assembly of the Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) and the American Geophysical Union (AGU) Western Pacific Geophysics Meeting (WPGM), 2012.8.16, シンガポール(シンガポール)

[図書](計 1 件)

岡田正実、海洋気象学会、瀬戸内海の気象と海象、2013、132-144

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

林 豊 (HAYASHI, Yutaka)

気象研究所・地震津波研究部・主任研究官  
(平成 25 年度まで 地震火山研究部)

研究者番号：40370332

### (2) 研究分担者

今井 健太郎 (IMAI, Kentaro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター・研究員(平成 26 年度まで 東北大学・災害科学国際研究所・助教)

研究者番号：20554497

干場 充之 (HOSHIBA, Mitsuyuki)

気象研究所・地震津波研究部・室長(平成 25 年度まで 地震火山研究部)

研究者番号：60510196

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

阿部 邦昭 (ABE, Kuniaki)

岡田 正実 (OKADA, Masami)