

トンガ海底火山噴火とそれに伴う津波の予測と災害に関する総合調査 —科学研究費特別研究促進費による突発災害調査研究令和3年度報告—

佐竹 健治*・前野 深*・西田 究*・サッパシー アナワット**・関谷 直也***

* 東京大学地震研究所

** 東北大学災害科学国際研究所

*** 東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター

要 旨

2002年1月15日にフンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山で発生した噴火に伴い、世界各地で急激な大気圧変化が観測された。日本沿岸では、津波の到達予測時刻より2~3時間早く、大気波動とほぼ同じ頃に海面変動が観測され始め、気象庁によって津波警報および注意報が発表された。今回の噴火及びそれに伴う大気波動、津波について調査するため、科研費の特別促進研究が立案された。本研究では、火山噴火現象の解明、火山性大気波動などによる津波発生・伝播メカニズムの解明、津波による我が国沿岸域への影響調査、社会的影響・社会的側面の調査の4つのテーマについて総合的な研究を実施している。

1. はじめに

令和4(2022)年1月15日にトンガ諸島付近のフンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山で噴火が発生、近隣の島嶼地域では降灰、津波などによる被害が発生した。この噴火に伴い、世界各地で急激な大気圧変化が観測され、日本でも噴火の約7時間後に記録された。日本沿岸では、津波の到達予測時刻より2~3時間早く、大気波動とほぼ同じ頃に津波が観測され始め、鹿児島県や岩手県で1mを超えたため、気象庁によって津波警報および注意報が発表された。

今回の噴火は稀にみる規模であったこと、噴火による大気圧変動と潮位変化が世界中で記録されたことから、1月17日に地震・火山噴火予知研究協議会と自然災害研究協議会において科学研究費補助金・特別研究促進費(いわゆる突発災害)の申請の協議を開始した。1月19日までに、研究代表者(佐竹)及び4テーマを設定し、各テーマについて参加者を募集した。1月24日に「研究計画概要」と「交付の必要性」を、1月27日には「研究計画調書」を文部科学省へ提出した。噴火と津波からちょうど1か月の2月15日に採択が決定し、文部科学省から報道発表がなされた。

本研究は、4つのテーマからなり、12大学・6研究機関から、火山学、地震学、超高層物理学、津波工学、

災害情報学などの多岐にわたる分野の研究者23名が研究分担者として(表1)、さらに多くの研究協力者が参加している(表1)。4つのテーマの主な研究内容は以下の通りである。

テーマ1：火山噴火現象の解明

- ・多項目観測による浅海火山爆発過程の解明
- ・火山噴火による大気波動の励起メカニズムの解明
- ・噴火シミュレーション・規模推定

テーマ2：火山性大気波動などによる全球規模での津波発生・伝播メカニズムの解明

- ・国内外の微気圧観測データの解析による伝播特性の解明
- ・大気波動の海面の進行に伴う先行波の発達・増幅に関する解析
- ・噴火に伴う津波発生メカニズムの解明と火山性津波の予測手法の開発

テーマ3：トンガ噴火性津波による我が国沿岸域への影響調査

- ・沿岸域での被害実態および生態系への影響の把握
- ・観測された津波の外力と被害との関係解明(被害関数の提案)
- ・今後の課題や対応策の整理
- ・得られた情報・知見を海外、特に小島嶼開発途上国

(SIDS) などへの提言と支援

テーマ4：社会的影響・社会的側面の調査

- ・国内の津波警報と住民の対応の調査
- ・現地および周辺国における噴火被害の状況についての情報収集

本研究は、採択の決定と開始が年度末であったところから、令和3・4年度にわたるものとなった。本発表では、令和3年度及び4年度の前半までの進捗状況について報告する。

表1 4つのテーマの研究分担者

テーマ1	
前野 深	東京大学地震研究所
山本 真行	高知工科大学システム工学群
鈴木 雄治郎	東京大学地震研究所
テーマ2	
西田 究	東京大学地震研究所
綿田 辰吾	東京大学地震研究所
有川 太郎	中央大学理工学部
田中 健路	広島工業大学環境学部
藤井 雄士郎	建築研究所国際地震工学センター
近貞 直孝	防災科学技術研究所
山田 真澄	京都大学防災研究所
柿沼 太郎	鹿児島大学理工学域工学系
西村 裕一	北海道大学大学院理学研究院
対馬 弘晃	気象庁気象研究所
テーマ3	
サッパシー アナワット	東北大学災害科学国際研究所
朝位 孝二	山口大学大学院創成科学研究科
嶋原 良典	防衛大学校システム工学群
高川 智博	海上・港湾・航空技術研究所
佐々木 大輔	東北大学災害科学国際研究所
王 宇晨	海洋研究開発機構海域地震火山部門
テーマ4	
関谷 直也	東京大学情報学環
吉本 充宏	山梨県富士山科学研究所
秦 康範	山梨大学大学院総合研究部
佐藤 翔輔	東北大学災害国際科学研究科

2. 火山現象の解明 (テーマ1)

2.1 噴火の概要

1月15日に発生したフンガ・トンガ・フンガ・ハアパイ火山(フンガ火山)の爆発的噴火は、成層圏を貫く巨大な噴煙を形成し、大気・海洋・電離圏に全球規模の擾乱を引き起こした。この噴火により既存の島の大部分が消滅し、フンガ火山山頂部の地形は大きく変化した(図1a)。Tonga Geological Services (TGS) 等による調査により、地形変化量は6.5 km³に達すると推定されている。近隣の島々では降灰に加えて津波による甚大な被害も発生した。この津波は世界各地で観測された大気ラム波に起因する遠地津波とは別のメカニズムで発生したと考えられる。

トンガタブ島では全域で1-2 cmの降灰や数cmの礫の堆積があったほか、沿岸域では軽石の漂着もあった。島西岸では地表状況をもとに津波遡上高が15 m以上に達したと推定されている(TGS)。ヌクアロファの潮位計では、4:27 UTCに第1波の30 cmの上げ波が到着した後、5分程度の周期でしだいに増幅し、4:42頃には最大振幅に達した。フンガ火山山頂を給源として津波数値計算を行うと、津波は約20分でヌクアロファに到着する(図1b)。したがって潮位計に記録された津波は、4時UTC過ぎから始まった噴火の初期段階に発生したイベントに起因した津波と考えられる。これらの津波について大きく3つのメカニズムが考えられる(前野, 2022)。(1) 急激かつ大きな地形変化。(2) マグマ水蒸気爆発。(3) 気圧変化。このうち(1)は、フンガ火山東麓に敷設された国内通信用海底ケーブルが4:30頃に断線したこと(Kentik)や、山体周辺の海底に厚い火砕物の堆積が確認されたこと(NIWA)から支持されるメカニズムである。そこで二層流モデルによる津波-土砂移動数値計算を行ったところ、東側に物質が供給される場合、6-10分程度で海底ケーブルに達することがわかった(図1)。

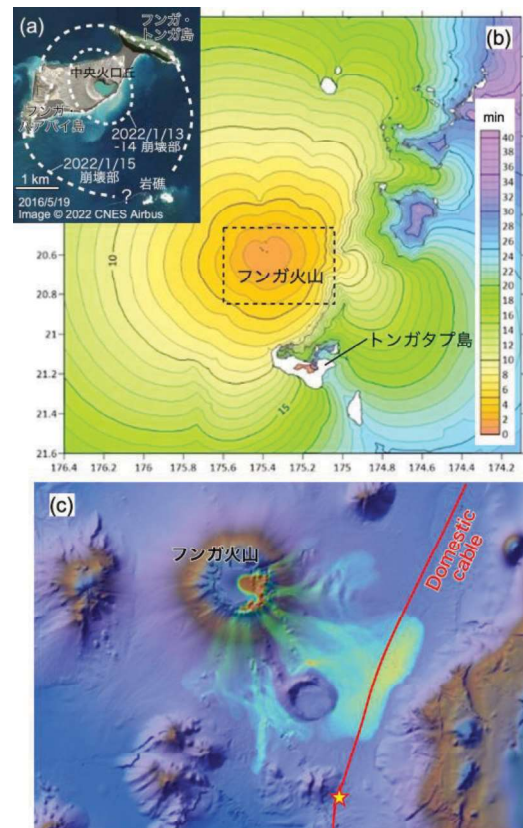


図-1 (a) 2016年のフンガ火山と2022年噴火による変化の概要。(b) 近傍域の津波シミュレーション結果(到達時間)と(c) 二層流モデルによる土砂移動計算結果。星印は推定ケーブル断線地点。

この時間スケールは、大量の火砕物が海に流入したタイミングを知る上での制約となる。ただしこのモデルでは断線地点まで物質が流動することは再現できていない。今後、噴火推移を考慮しつつ、他のメカニズムも含めたさらなる検討が必要である。

2.2 噴火推移

噴火ダイナミクス解明のための基本情報として、噴火発生時の現象の時系列の把握を進めている。噴火源から754 km離れたフィジーの観測点 (MSVF) に設置された地震計と気圧計のデータを解析した。大気波動に対する観測点の地動応答を評価し、地震計と気圧計の振動パワーと比較した結果、地震記録の大部分は大気波動によるものであるが、その中から顕著な地震波動成分を識別することができた。波源が噴火点であると仮定して地震波と空振それぞれの伝播時間を補正した結果、両者の立ち上がりは一致することが分かった。また、これらのデータと衛星可視画像 (Himawari-8) を比較した結果、主噴火の始まりは4:01 UTCであること、ラム波の正圧部分で噴煙は加速拡大していること、噴火に伴う地震・空振振動パワーは約30分の周期で連動して変動していることが分かった (図 2)。また、3:30 UTC頃から高周波の微動が開始している可能性のあることも分かった。今後、他の観測情報とも比較し、時系列の詳細を確認していく予定である。

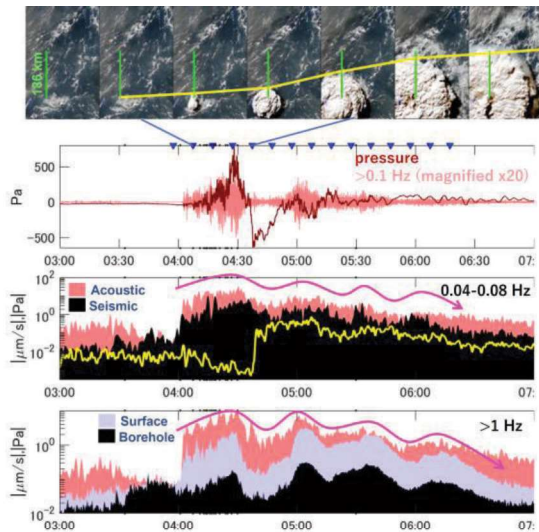


図-2 フィジーの地震計・気圧計データ (IRIS) と衛星画像 (Himawari-8) から得られた噴火推移。

2.3 波動の励起に関する研究

火山噴火現象と大気・海洋波動現象をつなげることを目的とし、テーマ1でも波動の励起に関する研究・議論を進めている。高知工科大学で運用する差

圧計を用いた微気圧観測網により、フンガ火山からのラム波、音波、内部重力波が明瞭に捉えられている (図 3)。これらのうちラム波の振幅からは、噴火のエネルギーが少なくともTNT火薬換算で数十Mtの規模に達することが推定される。また内部重力波は、外洋での津波の速度を含む多様な伝播速度で到達していることがわかった。圧縮性を考慮した高解像度の大气モデルと海洋の津波の方程式を結合させた数値実験によると、噴火がラム波、音波、内部重力波を励起し、特に、津波と共鳴する位相速度を持つ内部重力波が、たとえ気圧振幅は小さくとも長時間・広範囲にわたり共鳴関係を維持し続けたことで極めて大きい海面変動を引き起こすことが示唆されている (図 4)。

今後、津波や大気波動の観測データの更なる解析を進めるとともに、噴火源の波動励起メカニズムの同定を引き続き進める予定である。

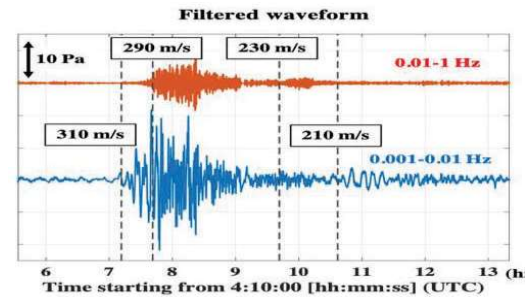


図-3 室戸観測点における気圧変動を周波数フィルターした時系列。0.001-0.01 Hzの成分 (下) の10:40 UTC以降に内部重力波が明瞭に見える (Nishikawa et al., 2022)。

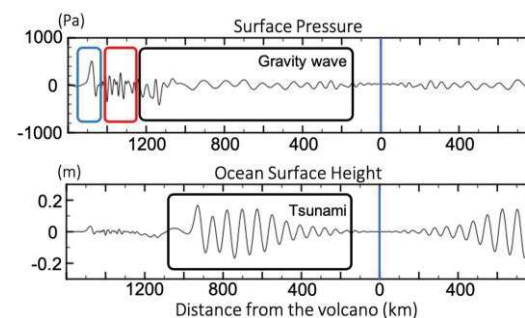


図-4 水平鉛直2次元の圧縮性大気方程式と津波の結合計算の結果 (高度40 kmに熱源を与えた4800秒後)。ラム波 (青枠)、音波 (赤枠)、内部重力波 (黒枠) が同時に励起され分散性のある幅広い速度範囲で伝播し (上)、重力波の波束が津波の後続波を共鳴的に大振幅で励起している (下)。 (Nishikawa et al., 2022)

2.4 数値計算にもとづく噴煙の特徴

フンガ火山噴火では、高度50 kmを超す噴煙柱と半径200 kmを超す同心円状に拡大する傘型噴煙が人工衛星によって観測された (Carr et al., 2022)。また、この噴煙によって揮発した多量の海水が大気へと放出されたと推定された (Millán et al., 2022)。多量の海水が関与する爆発的噴火がどのようにして大規模な噴煙を形成するかについて、噴煙ダイナミクスの観点から議論することは重要である。

フンガ火山の2022年1月15日4:00 UTC頃から始まった最も強い噴火について数値計算で再現し、この噴火の規模や強度、水の混合量を定量化することを目的とした。ピナツボ火山1991年噴火の噴煙スケールを正しくした3次元流体力学モデル (Suzuki and Koyaguchi, 2009) を用い、大規模シミュレーションを実施した。気象研究所より提供を受けた気象再解析データを用い、水平方向には一様な大気条件を初期条件として与えた。温度1233K・火山ガス質量分率0.04のマグマ物質と海水が混合したものを噴出物質とし、マッハ数1~2で火口から噴出する場合を想定した。マグマ物質・海水の混合比、噴出率、噴火継続時間を変えた計算を行い、噴煙最高高度・傘型噴煙高度・傘型噴煙半径の観測データと一致する条件を探索した。

数値計算の結果、噴煙高度50 km・傘型噴煙半径200 kmを超える大規模噴煙を再現した (図5)。噴煙と大気密度は高度30 km程度で釣り合い、密度中立点となった。上昇の勢いの強い噴煙は密度中立点を抜け、高度50~60 kmまで達し運動量を失った。傘型噴煙は密度中立点を中心に成層圏内で拡大した。パラメータスタディの結果、噴出率が 10^9 kg/sのオーダーで、噴火継続時間は~1000秒、噴煙に占める混合海水は~10%であることが推測された。今後、数値計算結果と観測データをより精緻に比較することで、噴火規模・強度・海水寄与率を定量化する予定である。

2.5 類事例との比較

フンガ噴火で大規模な噴煙が形成され地形が大きく変化した点や、大気・海洋波動によりグローバルな変動現象が発生した点は、インドネシアのクラカタウ火山1883年噴火やフィリピンのピナツボ火山1991年噴火と類似する。噴煙高度とマグマ噴出量はそれぞれクラカタウで40~43 kmと約 9 km^3 、ピナツボで35~40 kmと5~6 km^3 と推定されており、どちらも噴火規模はVEI 6である。ただし、マグマ組成はフンガ火山がやや苦鉄質であるのに対し、クラカタウやピナツボでは珪長質 (デイサイト質) という大きな違いがある。

大気中に放出された二酸化硫黄はフンガ噴火の40万トン程度 (NASA, 2022) に対し、クラカタウとピナツボではそれぞれおよそ440万トン、200万トンと推定されており (Harvey et al., 2020)、後者2ケースでは二酸化硫黄に起因する硫酸エアロゾルにより寒冷化が引き起こされた。フンガ火山噴火では2桁低い値であり、気候への影響は限定的と考えられる。

大規模噴火は一般に珪長質マグマによって引き起こされると考えられがちだが、フンガ噴火のように、浅海環境ではやや苦鉄質なマグマであっても珪長質マグマによる大規模噴火のような高高度の噴煙を生じる可能性があることは特筆すべきことであり、防災上も注意を払う必要がある。このような噴火が起こる条件は、他の沈み込み帯の活火山でも十分に整う可能性があるが、マグマと海水との接触・混合様式と噴煙の規模や爆発性との関係など多くの未解明の問題がある。フンガ火山噴火で出現した現象の解明は、日本列島を含め海域火山を多く有する島弧地域において重要な課題であり、今後さらに研究を進めていく必要がある。

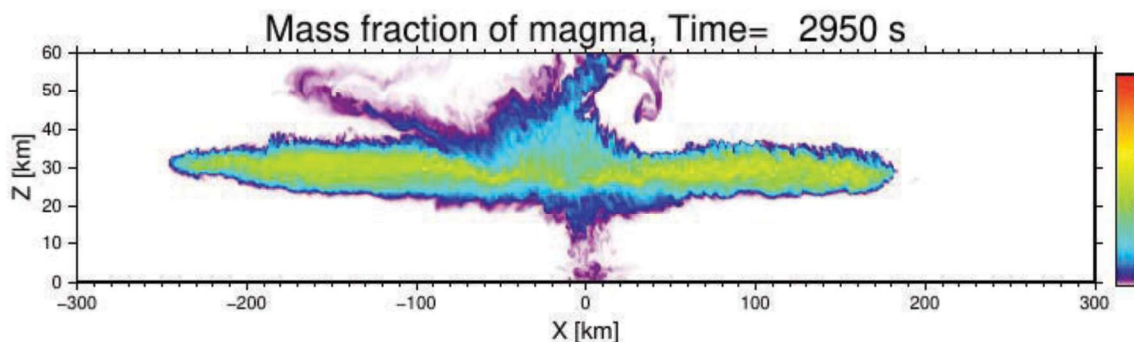


図-5 フンガ火山噴火の噴煙3次元シミュレーション。火口を含む東西断面における噴火開始後2950秒後の噴出物質質量分率の分布を示す。

3. 火山性大気波動による全球規模での津波発生・伝播メカニズムの解明（テーマ2）

フンガ火山噴火後に顕著な津波が観測された（Imamura et al., 2022; 石峯, 2022; Kakinuma, 2022; 柿沼, 2022; Kubo et al., 2022; 田中ら, 2022; 田中・石丸, 2022; 徳田ら, 2022; Wang et al., 2022b; Yamada et al., 2022; 山田, 2022a,b; 綿田, 2022a）。その到達時刻は通常の津波より早く、最大波高が第一波から遅れて（日本付近では3-5時間後）到達し、継続時間が通常の津波よりも長く、海域経由では到達できない地中海や大西洋で観測された、等の特徴があった。そのため、防災上も大きな問題を投げかけた。過去の類似の事例としては、1883年のクラカタウ火山噴火時に、大気圧変動が津波を引き起こしたことが知られている。19世紀ではあったが、噴火時に顕著な大気波動が世界各地で観測されたことから、大気重力波と海面の共振で発生した可能性が指摘されていた（Press and Harkrider, 1966; 綿田, 2022b）。今回の大気圧変動や津波は、世界中のGNSS、微気圧計や潮位計・海底圧力計で記録されている。テーマ2では、これらのデータを収集して解析し、火山噴火による大気圏の挙動と津波の励起・伝播メカニズムを解明する。津波の励起・伝播メカニズムの解明は、今後同様の現象が発生した場合にどの程度の津波が発生するのかを即時的に把握するためにも重要である。

2022年1月15日、フンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山の噴火に伴い、世界に展開された大気圧観測網が顕著な気圧の増加を観測した（e.g., Matoza et al., 2022; 西田, 2022）。これは、大気ラム波と呼ばれる大気境界波の一種である。この波は火山噴火時に励起され、約300 m/sの速度で全球規模に伝播し、その後数日に渡って地球を周回した（図6）。さらに、世界の海底に展開された水圧観測網が、地球規模で伝播する津波を明瞭に観測した（図7）。

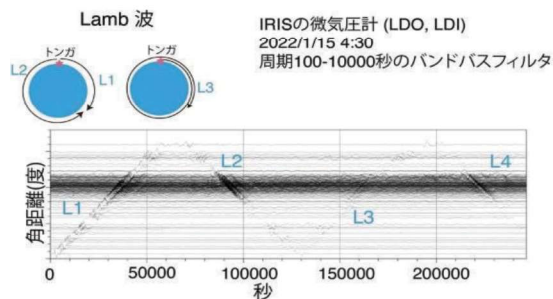


図-6 縦軸はフンガ火山からの距離(角度)、横軸は2022年1月15日 4:30 UTC からの経過時間(秒)。微気圧計記録に周期100秒から10000秒のバンドパスフィルタをかけた。Central and Eastern US Network, Caribbean USGS Network, Geoscope, IRIS IDA, IRIS

USGS のデータを使用した。

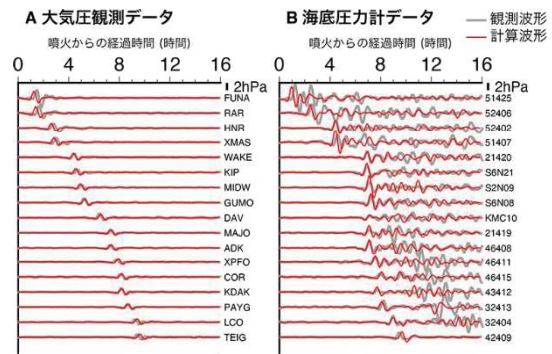


図-7 ラム波の伝播に伴う津波発生の数値計算波形と観測波形の比較。A は大気圧観測波形の時系列、B は海底圧力観測波形の時系列。灰色線は観測波形を、赤線はシミュレーション結果による波形である。各波形の右横にあるアルファベット、数字は観測点の名前を示している。Kubota et al. (2022) プレスリリースの図より引用。

今回の噴火による津波には2つの大きな特徴があった（Kubota et al., 2022）。1つ目は、第一波が、火山を波源として予想される津波到達時刻よりも数時間ほど早く到達した点である。この津波の第一波は、観測された大気ラム波とともに伝播しており、太平洋における平均的な津波の伝播速度（200~220 m/s）より有意に速く伝播した。2つ目は、津波の継続時間が数日と、通常の地震に比べて非常に長い点である。これらの特徴を理解するために、数値シミュレーションを実施した（Kubota et al., 2022）。

シミュレーションでは、まず世界各地で観測された大気圧データを基に、ラム波が火山から300 m/sで伝播すると仮定してラム波の伝播シミュレーションを実施し、大気圧変化を計算した（図7A）。続いて、気圧変化による津波の発生・伝播シミュレーションを実施し、津波による海底における水圧変化を計算した（図7B）。

世界の海底水圧観測網について、シミュレーションにより計算された波形を実際の観測記録と比較したところ、計算波形はラム波の速度（300m/s）で伝播する第一波部分をよく再現した（図7B）。移動する気圧の波と津波の伝播速度が近い値となる時、伝播距離の増大に伴って海面変動の振幅が大きくなる「共振現象」（「プライドマン効果」とも呼ばれる）が起こることが知られている。第一波は伝播と共に増大していないことから典型的な共振現象とはいえず、むしろ大気ラム波による海面の強制振動として引き起こされたことを示唆している。

励起メカニズムについて模式図を図8に示す。大気中では、約300 m/sの速度でラム波が伝播する。海面では、ラム波が海水を強制的に押し出すことにより、ラム波と同じ速度で海面の隆起の波が伝播する（図

8中[1]の波)。続いて、津波の速度(約200~220 m/s)で伝播する波が到来する(図中[2]の波)。噴火に伴うカルデラの陥没の空間スケールは半径2km程度と小さく、単独で長波長の津波を効率的には励起する事は難しい。そのために、後続波の励起には大きく分けて3つの要因が考えられる。1つめとしては第一波として伝わる隆起の波の体積を保存するために生じる沈降の波、2つめは大気重力波(約200-250m/s)と津波の共振(ブラウドマン効果)によって生じる波、3つめは噴火に伴う火山付近での海底地形変化により生じる津波である(Kubota et al., 2022)。今回観測された津波の全貌を理解するためには、これらの要因を今後詳細に検討することが重要である。

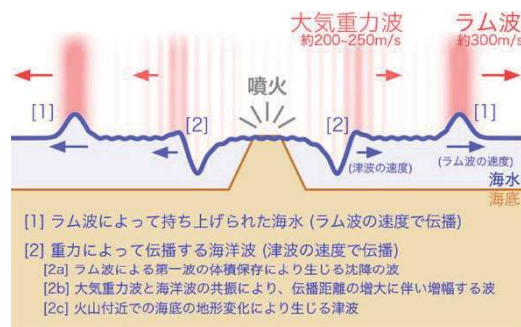


図-8 トンガ火山からの津波の発生と伝播の模式図。Kubota et al. (2022) プレスリリースの図より引用。

今回観測された津波の継続時間が数日と長かった特徴を理解するためには、大気-海洋のカップリングを考えることが重要となる。図6で示したように、大気ラム波は数日程度の継続時間を持つ。定性的には、大気側から継続的に津波へエネルギーを運んでいることが、長い津波の継続時間の要因だと考えられる。防災上も津波の継続時間は重要な情報であるため、今後詳細な検討が必要である。

日本付近の海底水圧計データを詳細に解析したところ、この津波の振幅は この津波は、水深が浅いほど大気ラム波と津波の結合が弱くなるため、海岸に近づくると振幅が小さくなるということがわかった(Kubo et al., 2022; Yamada et al., 2022)。津波の第一波は日本に近づき大陸棚斜面を伝播する際に分裂し、伝播速度の遅い海洋重力波の速度で伝播した。そのため、海岸で観測される津波の第一波は、ラム波が通過してから数千秒遅れて到来することとなった。

今回のフンガ・トンガフンガ・ハアパイ火山の噴火では、地球規模で伝播する津波が発生した。このような大気波動起源の津波は、始めて現代のデジタル記録システムで観測され、多くの知見をもたらした。防災上も、今後津波警報システムにおいて考慮されるべきものであると考えられる(近貞, 2022)。より具体的には、火山から遠く離れた場所の津波の

最大振幅を即時的に予測するためには、大気圧観測データなどを利用して大気重力波の励起量を高い精度で即時的に見積もることが重要となろう。

4. 水産被害 (テーマ3)

今回の津波が発生した1月はカキ、ホタテ、ホヤ、早ワカメ等の収穫の時期であった。津波が日本に來襲したのは15日の夜間(日本時間)であったが、被害の実態が把握できたのは16日であり、報道機関が記事として取り上げることができたのは17日以降であった。漁船の被災の有無は海上から容易に判断できるものの、養殖施設はその大部分が海中に沈んでいるため迅速な被害把握は困難である。また、漁師が作業を始めることが可能になったのは津波注意報が解除された後であったことが、被害の把握に時間がかかった理由である。国内の水産被害としては、高知県をはじめとする5つの県で沿岸漁業の漁船の転覆・沈没等37隻の被害があり、徳島県をはじめ7つの県で漁具・養殖施設等の被害が報告された(Imamura et al., 2022)。これまで、津波による水産被害は1960年チリ津波、2010年チリ津波、2011年東北地方太平洋沖地震津波などで報告されているが、これらは地震によって発生した長周期の津波によるものである。これらの被害分析から、漁船では高さ1mまたは流速1 m/s以上になると被害が出始め(Suppasri et al., 2014)、養殖施設では流速1 m/s以上になると、最高水位に関係なく被害が出始めることが分かっている(Suppasri et al., 2018)。しかしながら、今回のような火山噴火による非地震性でかつ地震性津波に比べて短周期の津波によって漁業施設が被災した事例はこれまでなかった。このように、従来とは異なる特長の津波がもたらす水産被害を明らかにするため、ヒアリング調査、アンケート調査、数値解析を行い、今後の適切な対策を検討することが本テーマの目的である。

4.1 ヒアリング調査

被災した地域での養殖施設の方式や、水産被害に関する詳しい情報を収集するため、2022年7月20-22日の間に漁協、漁師に対してのヒアリング調査を行った。調査のスケジュールは20日に宮古漁協と三陸やまだ漁協、21日に大船渡漁協末崎支所、22日に松島湾での漁師と牡鹿半島での漁師を訪問した。そして、いかだ式、延縄式の養殖施設の構造や寸法、施設を係留するためのロープやアンカー等の設置方法について情報を得た。三陸地方では平常時または高波・高潮のときでも養殖施設が耐えられる必要があり、重いアンカーで移動されないように工夫している。

2010年チリ津波の際は漂流・移動した養殖施設があったが、今回は、係留位置がずれたり、養殖物をぶら下げているロープが絡まったり、水産物同士が衝突する被害がほとんどであることがわかった。これは、津波の周期の違いによるものではないかと思われる。特に被害が多かった山田湾と大船渡湾は湾の入口に被害が集中しており、狭い場所で流速が大きくなったことにより被害が出たことが考えられる。一方、松島湾では三陸地方に比べて緩やかな波かつ水深が浅いため簡単な杭で固定している。そのため、一つの杭が倒れると連鎖的に被害が発生した。なお、今回ヒアリング調査に協力頂いた漁協では、今般の漁業被害に係る共済金の受け取りはなかったとのことである。漁業共済制度に関しては、東日本大震災後の制度改正を受けて、共済金の支払要件が厳しくなっており、必ずしも十分な補償を受けることができない場合もあり得るとの指摘があった。今後、制度設計の更なる精査が必要になるものと考えられる。

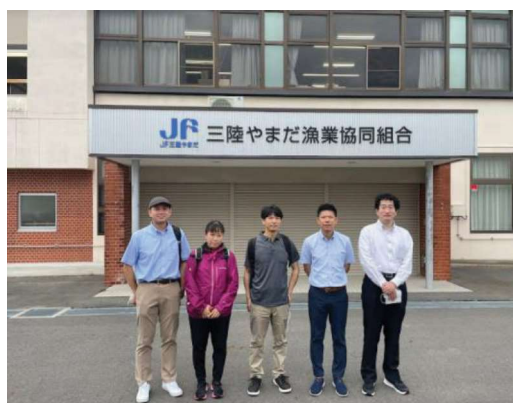


図-9 研究メンバー@三陸やまだ漁協



図-10 山田湾でのいかだ式の養殖施設

4.2 アンケート調査

インターネットによるアンケート調査では、定量的アプローチによる仮説の検証を行った。調査票は、被害の状況、リスク認識、緊急対応、復旧、津波による漁業被害のリスクが高い開発途上国への国際協力

等に関する21問（本調査時）から構成されており、対象者は、調査会社に登録されたモニターの中から業種を「漁業関連」「水産加工・サービス業関連」に限定して抽出し、サンプルサイズは200とした。

4.3 今後の予定

アンケート調査及びヒアリング調査によって得られた結果を用いてリスク認識、事前準備、緊急対応、復旧を中心に定量的及び定性的に詳しく分析していく。これらと平行してデータ同化 (Wang et al., 2022a) あるいはair-waterカプリングモデルを用いて、津波を再現し、水産被害データと照らし合わせて、津波外力と被害の特徴を調べる。また、短周期の津波による水産被害のメカニズムの詳細を明らかにするために、ヒアリング調査より得られた養殖施設の構造や係留方法を再現した漂流物モデルを用いて解析する予定である。

5. 社会的影響・社会的側面の調査（テーマ4）

本節では、気象庁等でまとめられた議論を踏まえつつトンガ諸島の火山噴火による潮位変化以降の情報に関する議論と避難に関するポイント、奄美大島における事例調査、今後の予定について論じる。

5.1 トンガ諸島の火山噴火による潮位変化以降の情報に関する改善

2022年1月15日トンガ諸島の火山噴火による潮位変化に際しては、太平洋沿岸の広い範囲に津波警報や津波注意報が発表された。この潮位変化は、地震に伴い発生する通常の津波とは異なるが、防災上の観点から津波警報の仕組みを使って防災対応が呼びかけられた。2022年5月、気象庁では「火山噴火等による潮位変化に関する情報のあり方検討会」が設置され、噴煙高度約15,000m以上の大規模噴火が観測された場合に「津波発生の可能性」を発表すること、火山噴火による地形変化や気圧波に伴う津波や潮位変化など海外の潮位観測点で警報・注意報の発表基準を超えた場合に地震による津波と同様に「津波警報・注意報」の枠組みで情報を出していくこと、また適宜「遠地地震に関する情報」を活用した情報発信を行うことが確認された（気象庁, 2022）。

なお、気象庁の同検討会では、今回の潮位変化を教訓として、次のパターンが検討された（図11）。

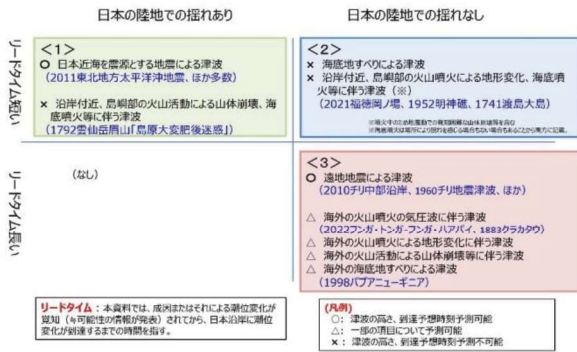


図-11 火山噴火や地震に起因する潮位変化に関する現象 (気象庁, 2022)

これは現象面から、従来の近地地震、遠地地震に加えて、火山性津波（海底地すべり、島嶼部の火山活動による山体崩壊、海底噴火など）を加味し、<1>リードタイムが短く、日本陸地での揺れがある現象、<2>リードタイムが短く、日本陸地での揺れない現象、<3>リードタイムが長く、日本陸地での揺れない現象という3パターンに分類された。

今回の潮位変化を踏まえれば、上記で検討はなされなかったが避難行動に関し、二つポイントがある。

第一に揺れない地震、夜間の地震という避難率が低くとどまった要因である。①遠地津波ならではの問題として揺れないので避難しない人が多かったこと、②深夜の津波情報で避難しなければならなかったこと、などが避難に与えた要因として課題であった。これは揺れが比較的小さいアウトサイズに伴う津波と共通する課題である。

第二に「津波注意報」をどう伝えるかという課題である。大津波警報の発表時には「最大クラスの津波により浸水が想定される地域を対象とする」、津波警報の発表時には「海岸堤防等が無い又は海岸堤防等が低いため、高さ3mの津波によって浸水が想定される地域を対象とする」とされている。一方、津波注意報の発表時には「漁業従事者、沿岸の港湾施設等で仕事に従事する者、海水浴客等を念頭に、海岸堤防等より海側の地域を対象とする」となっており、基本的に堤外にいる人によびかけることとなっている。だが東北地方太平洋沖地震の余震での津波注意報や2019年6月の山形県沖地震での津波注意報などでも、どの地域の人まで逃げればよいか住民や自治体に理解されておらず、混乱を生んでいる。

そのため消防庁の調査によれば（内閣府・消防庁, 2022）、警報が発表された自治体（25自治体）では、警報を伝達したのは100%（25自治体）、避難指示を發したのは84.0%（21自治体）である。一方、津波注意報が発表された自治体（353自治体）では、注意報を伝達したのは89.5%（316自治体）、避難指示を發したのは15.9%（56自治体）にとどまっている。注意

報ほど、情報の発出は低調であり、各市町村で判断が分かれた。

これは上述の通り、「注意報」ならではの課題ともいえ、今後調査を基に検討する予定である。

5.2 事例調査—奄美市、大和村の事例

2022年1月15日13時頃にフンガ・トンガフンガ・ハアパイ火山で発生した噴火によって、同日23時55分に鹿児島県奄美市にある奄美市名瀬小湊で1.2mの潮位変化が観測され、翌16日0時15分には気象庁から津波警報が岩手県沿岸部ならびに奄美群島、トカラ列島に発表され、北海道から鹿児島県の太平洋沿岸や沖縄県などに津波注意報が発表された。それにともない、各沿岸部の自治体は避難情報を発表した。我々は、事例調査として、避難指示が發せられた奄美市総務課、大和村総務課に対して3月24日にヒアリング調査を行った。以下はその要旨である。

(1) 噴火直後

奄美市ならびに大和村のいずれも、噴火のことは担当者がニュースで認識したが、その後、特に情報収集は行っていない。鹿児島県から若干の海面変動に関する津波予報の発表を確認した程度であった。そのため、津波警報発表までの間、危機対応は行われていない。

(2) 津波警報発表後

気象庁からの津波警報は、Jアラートの自動放送で発表が覚知された。奄美市においては、16日0時18分に災害対策本部が設置され、市内全域に避難指示が発表、エリアメールなどを通じて高台への避難が呼びかけられた。その後も繰り返し、防災行政無線から高台への避難の広報がなされた（0時40分、2時40分、3時5分）。一方の大和村においても0時25分に災害対策本部が設置され、消防団員によって避難の呼びかけがなされた。その後、村内全域を対象とした避難指示が発表、避難の継続の呼びかけが防災行政無線を通じて複数回（2時30分、3時27分、5時7分）、行われた。

なお、この間に气象台などから自治体への情報提供はなく、テレビニュースが自治体の主たる情報手段であった。一方で、報道機関からの取材依頼は非常に多く、電話が鳴りやまない状況であった。

夜が明け、7時30分に津波警報から津波注意報へと引き下げられると、奄美市、大和村いずれも避難指示を解除した。大和村においては、全消防団員に対しても解除の連絡が行われた。ただし、この解除についてはいずれの自治体も判断に迷いがあったことが明らかとなった。津波注意報に引き下げられたことで、避難指示を解除しても良いのか、安全になったと捉えられかねないとの懸念である。奄美市では、

「海に入らないように」と注意するように心がけたという。その後、14時には津波注意報も解除された。

奄美市、大和村はいずれも津波警報をトリガーとして全域に対して避難指示が発表され、その解除のタイミングに関しては迷いが生じていた。

(3) 住民の反応

では、実際の住民の反応がどうであったか。

特筆すべきは大和村である。各集落の消防団や自主防災組織を通じて避難状況の確認が行われたが、960名の避難が確認されたという（1月15日時点での人口は1,429名）。指定されていない避難場所への避難者もいたとの話であるが、深夜にもかかわらず、多くの避難が行われた。その要因として、村では、普段から年1回の避難訓練を行うなど、地域ぐるみで防災意識の向上を企図してきたことが大きいという。奄美大島は台風の常襲地帯であることから、村内集落ごとに指定避難場所を設置し、ほとんどの集落で自主防災組織がある。これらが有効に働き、多くの人が避難場所や高台へと避難したとされる。

一方、奄美市では車の渋滞が多くニュースにおいて取り上げられたように、高台を目指して、多くの人が車で避難を行った。高台として、奄美市大浜海浜公園／ループ橋（高齢者施設・奄美佳南園）／あかさき公園／春日団地／東ヶ丘団地／陸上自衛隊奄美駐屯地があり、これらに向かう車で渋滞した一方で、少し高い所にあった大島支庁には60人程度しか避難していなかった。とにかく、高い所へ、少しでも速く避難を企図した結果であろうと考えられる。

なお総じて、住民の避難行動のきっかけとしては、近所の人の声かけ、自治会や消防・警察の呼びかけ、また、防災行政無線が繰り返し流れたこと、東日本大震災時の津波の映像を思い出したこと、奄美がテレビにずっと映り、テレビニュースで「高台へ逃げろ」とでていたこと、1.2mの津波がすでに奄美市名瀬小湊に到達していたことなどがあげられた。また、これらの避難について、夜間で家族が一緒にいたために即座に避難を決断できたこと、人手があったから高台において、避難誘導ができたという声も聞かれた（奄美市東ヶ丘団地）。

(4) 課題

今後の課題として、高齢者の避難、避難先でのトイレ、住民がハザードマップを確認していないこと（奄美市は2021年に全戸配布を行った）などの防災意識の向上、職員による避難誘導の方法、呼びかけの対象地域や範囲（大和村は「全域」にだすと決めていた）、観光客向けの情報提供などがあげられた。

5.3 今後の予定

テーマ4は、①国内の津波警報と住民の対応の調

査と、②現地および周辺国における噴火被害の状況についての情報収集の二つをテーマとしている。

後者は、新型コロナウイルス感染症拡大の関係で、現地調査の実施を見極めている段階にある。この現地調査実施の可否が見極められたのちに、沿岸自治体への調査票調査、住民調査の規模・対象を確定させ、調査を実施する予定である。

謝 辞

本稿は、科学研究費特別研究促進費「トンガ海底火山噴火とそれに伴う津波の予測と災害に関する総合調査」（21K21353）による支援をうけた。表1に示した研究分担者以外にも、大湊隆雄氏（東大地震研）はテーマ1の取りまとめを、市原美恵氏（東大地震研）、中島健介氏（九州大学）、久保田達也・齊藤竜彦氏（防災科学技術研究所）は、研究成果を提供して下さった。

参考文献

- Carr, J. L., Horváth, Á., Wu, D. L., and Friberg, M. D. (2022): Stereo plume height and motion retrievals for the record-setting Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption of 15 January 2022. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 49, e2022GL098131.
- 近貞直孝(2022): 非地震性津波に備える, 月刊地球, 44巻, 10号.
- Harvey, P.J., Grab, S.W., Malherbe, J. (2020): Major volcanic eruptions and their impacts on southern Hemisphere temperatures during the late 19th and 20th centuries, s simulated by CMIP5 models. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 47, e2020GL087792.
- Imamura, F., Suppasri, A., Arikawa, T., Koshimura, S., Satake, K., Tanioka, Y. (2022): Preliminary observations and impact in Japan of the tsunami caused by the Tonga volcanic eruption on January 15, 2022, *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 179, pp. 1549-1560.
- 石峯康浩(2022): フンガトンガ・フンガハアパイ火山の2022年噴火とそれに伴う津波の概要(速報), 国際津波防災学会誌, Vol.3, pp. 36-44.
- Kakinuma, T. (2022): Tsunamis generated and amplified by atmospheric pressure waves due to an eruption over seabed topography, *Geosciences*, Vol. 12 No. 6, p. 232, <https://doi.org/10.3390/geosciences12060232>.
- 柿沼太郎(2022). 噴火に伴う複数の気圧波によって地形上で生成・増幅される津波. 津波工学研究報告, 第39号, pp. 91-100.

- 気象庁 火山噴火等による潮位変化に関する情報のあり方検討会 (2022) : 火山噴火等による潮位変化に関する情報のあり方 (報告書)
- Kubo, H., Kubota, T., Suzuki, W., Aoi, S., Sandanbata, O., Chikasada, N., Ueda, H. (2022): Ocean-Wave phenomenon around Japan due to the 2022 Tonga eruption observed by the wide and dense ocean-bottom pressure gauge networks, *Earth, Planets and Space*, Vol. 74, 104. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01663-w>.
- Kubota, T., Saito, T., Nishida, K. (2022): Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption, *Science*, Vol. 377 No. 6601, pp. 91-94, <https://doi.org/10.1126/science.abo4364>.
- 前野 深 (2022) : 地球を震わせたフンガ火山の爆発的噴火, *科学*, 92巻, 6号, pp.559-565.
- Matoza, R.S., D. Fee, J.D. Assink, A. M. Iezzi, D.N. Green, K. Kim, L. Toney, ..., Nishida, K., ..., Watada, S., Ichihara, M. et al. (2022): Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga, *Science*, Vol. 377, No. 6601, pp. 95-100. <https://doi.org/10.1126/science.abo7063>.
- Millán, L., Santee, M. L., Lambert, A., Livesey, N. J., Werner, F., Schwartz, M. J., et al. (2022): The Hunga Tonga-Hunga Ha'apai hydration of the stratosphere. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 49, e2022GL099381.
- 内閣府・消防庁 (2022) : 津波における避難指示発令等について (府政防第651号/消防災第60号)
- NASA Atmospheric Chemistry and Dynamics Laboratory (2022):https://so2.gsfc.nasa.gov/omps_2012_now.html.
- 西田 究 (2022) : トンガ火山の噴火で励起された大気波動と海面変動, *Japan Geoscience Letters*, Vol.18 (2).
- Nishikawa Y, Yamamoto M.-Y., Nakajima K, Hamama I, Saito H, Kakinami Y (2022): What excited tsunami from Tonga 2022 eruption? Observation and theory. *Research Square*, <https://www.researchsquare.com/article/rs-1513574/v1>.
- Suzuki, Y.J. and Koyaguchi, T. (2009): A three-dimensional numerical simulation of spreading umbrella clouds. *J. Geophys. Res.*, Vol. 114, B0320.
- Suppasri, A., Muhari, A., Futami, T., Imamura, F. and Shuto, N. (2014): Loss functions of small marine vessels based on surveyed data and numerical simulation of the 2011 Great East Japan tsunami, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering-ASCE*, Vol. 140, No. 5, 04014018.
- Suppasri, A., Fukui, K., Yamashita, K., Leelawat, N., Hiroyuki, O. and Imamura, F. (2018): Developing fragility functions for aquaculture rafts and eelgrass in the case of the 2011 Great East Japan tsunami, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol.18, pp. 145-155.
- 田中健路, 石丸克弥, 鈴木悠太, 村上太一: 火山噴火に伴う気象津波の風況依存性に関する数値解析 (2022): 土木学会論文集B2 (海岸工学), 78巻, P0159.
- 田中健路・石丸克弥 (2022) : フンガ・トンガ火山噴火に伴う空気振動に誘発された津波について, *自然災害研究協議会研究論文集*, 第8号, pp. 35-38.
- 徳田達彦・有川太郎・高川智博・千田優・Anawat SUPPASRI・近貞直孝・森信人・今村文彦: 2022年フンガ・トンガ火山噴火による津波伝播に関する考察 (2022): 土木学会論文集B2 (海岸工学), 78巻, No.2, 印刷中
- Wang, Y., Imai, K., Kusumoto, S., and Takahashi, N. (2022a): Tsunami early warning of the Hunga Volcanic Eruption Using an ocean floor observation network off the Japanese Islands. *Seismological Research Letters*. <https://doi.org/10.1785/0220220098>
- Wang, Y., Wang, P., Kong, H., and Wong, C.-S. Wong (2022b): Tsunamis in Lingding Bay, China, caused by the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophysical Journal International*. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac291>
- Yamada, M., T. Ho, J. Mori, Y. Nishikawa, and M. Yamamoto (2022): Tsunami triggered by the Lamb Wave from the 2022 Tonga Volcanic eruption and transition in the offshore Japan region. *Geophys. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1029/2022gl098752>.
- 山田真澄 (2022a) : トンガ火山の噴火による「津波」の謎, *なみふる*, 130, 4-5.
- 山田真澄 (2022b) トンガ火山の噴火で観測された「津波」の謎, *DPRI Newsletter*, No.10.
- 綿田辰吾 (2022a) : 遅れてやってきた2022年フンガ火山噴火起源の最大波高津波, *科学*, 92巻, 6号, pp. 565-570.
- 綿田辰吾 (2022b) : Press and Harkrider (1962) Propagation of acoustic-gravity waves in the atmosphere と Harkrider (1964), Theoretical and observed acoustic-gravity waves from explosive source in the atmosphere の修正点, *月刊地球*, 44巻10号.