

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3-4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

2022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た。

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(以下ではフンガ火山と呼ぶ)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、科学研究費補助金・特別研究促進費(いわゆる突発災害)が交付され、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が、12大学・6研究機関から研究分担者(表1)及び研究協力者として参加した。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ことから、令和3・4年度にわたるものとなった。昨年度の自然災害シンポジウムでは令和3年度の活動について報告したが、今回は両年度分について報告する。

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所

2. 火山現象の解明 (テーマ1)

2.1 噴出物と噴火過程

2022年1月15日に発生した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(前野, 2022)。この噴火により、フンガ火山山頂部では約6 km³の物質が失われ、深さ800 m以上のカルデラが形成された(Seabrook et al., 2023)。

今回の噴火を引き起こしたマグマの蓄積・上昇・噴出過程の理解を進めるために、噴出物の岩石学的特徴について検討した。フンガ火山から南南東約60 kmに位置するトンガタブ島では、噴煙からの降下堆積物(内陸)と、海面上を浮遊し海流や津波により運搬された堆積物(沿岸)の二種類の堆積物が存在する。TGS(トンガ地質調査局)およびJICAの協力を得て現地で噴出物調査を行うとともに、代表的噴出物の岩石記載およびXRFによる全岩化学組成分析、EPMAによる鉱物・ガラス化学組成分析を行った。

分析した噴出物は、降下堆積物を構成する灰色と黒色の礫サイズの軽石、および岩塊サイズの漂着軽石である。漂着軽石は黒色で、急冷を示唆するガラス質部分が認められる場合がある。漂着軽石は2021年12月以降、2022年1月14日までの先行フェーズの噴火に由来するものと考えられる。斑晶鉱物は共通し

て両輝石、斜長石、鉄チタン酸化物である。

全岩化学組成分析の結果、降下軽石は概ねSiO₂含有量57–59 wt.%の安山岩であり、2014–2015年噴火を含む過去のフンガ火山の噴出物が示す組成トレンド(Brenna et al., 2022)内に収まった(図1)。なお、降下軽石のうち灰色軽石の方がやや苦鉄質である。漂流軽石には降下軽石と同様の特徴を持つものに加えて、SiO₂含有量で66 wt.%に達するもの(デイサイト)が含まれることがわかった。それぞれの噴出物について両輝石の化学組成とPutirka(2008)の地質温度計を用いて、マグマの温度を推定したところ、降下軽石と漂流軽石それぞれに対して1030–1060°C、970–990°Cと見積もられた。灰色軽石の両輝石は黒色軽石のものよりもMg#に富むこともわかったが、温度推定では明瞭な差としては現れなかった。さらに、斜長石および石基・メルト包有物の化学組成と上記で推定された温度およびWaters and Lange(2015)による含水量計を用いて、降下軽石と漂流軽石のマグマの含水量はそれぞれ2.6 wt.% (1σ = 0.6)、3.2 wt.% (1σ = 0.2)と推定された。

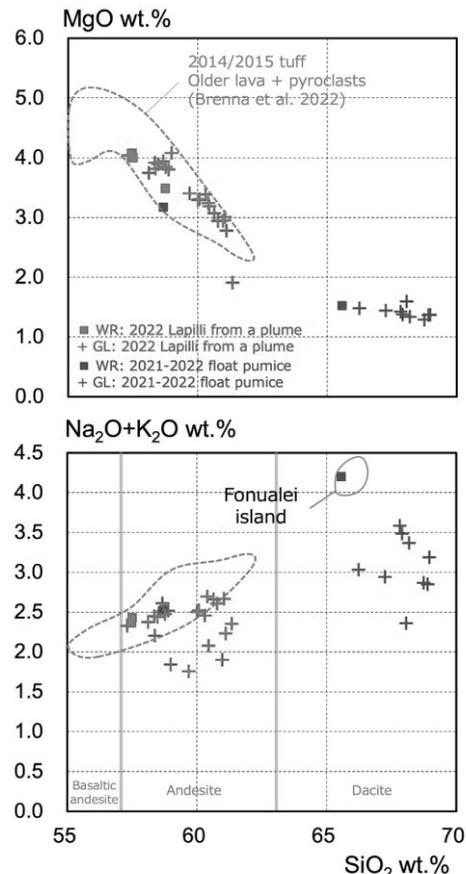


図-1 2021-2022年フンガ火山噴出物の全岩(WR)およびガラス(GL)化学組成と文献値との比較。

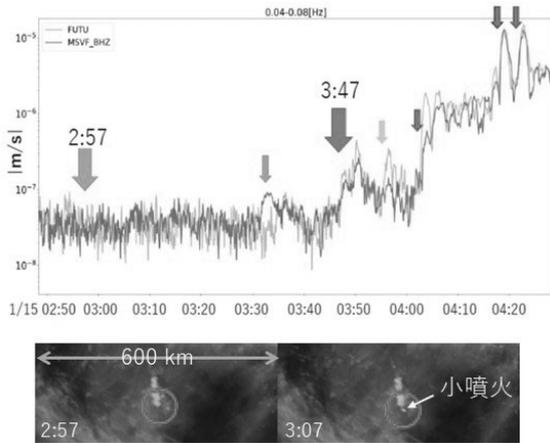


図-2 火口から約760 km 離れたフィジー (青) とウォリスフツナ (黄) の地震データ (IRIS, <https://service.iris.edu>) の振幅変化とひまわり8号赤外画像 (NICT) の画像処理結果。

以上の結果より、今回の噴火の最盛期では従来の活動によるマグマと類似の安山岩質マグマが噴出したと考えられる。島弧で一般的な珪長質マグマによるカルデラ形成噴火とは異なるタイプの噴火であったことは特筆すべき点と言える。また、噴火最盛期以前の活動の最中に、やや低温のデイサイトが噴出したことがわかった。このデイサイトと同様の岩石は、トンガ諸島ではフンガ火山の北北東約300 kmにあるフォヌアレイ火山で見出されているものの (図1)、これまでフンガ火山では報告がない。デイサイトが最盛期以前に噴出していたとすると、その起源や最盛期活動との関連は興味深く、今後さらなる検討が必要である。

2.2 噴火推移

すでに多様な観測データを用いて大噴火の開始過程について研究が進められており、2022年1月15日の大噴火の開始は 04:00UT ごろという結果に収束しつつある。一方、その前駆的な過程については、まだ十分に解明されていない。Borrero et al. (2023) は、現地の聞き取り調査をもとに噴火開始時間を3:47とし、Cronin et al. (IAVCEI2023) は、2:57に観測された小噴火を大規模噴火の始まりと考えた。

Ichihara et al. (JpGU2022) は、噴火口から約758 km 離れたフィジーMSVF観測点の地震計と気圧計のデータを統合解析し、大噴火前後の微細な変動を抽出してきた。堀内他 (JpGU2023) は、同程度 (752 km) の距離にあるウォリスフツナのFUTU観測点の地震計データを追加し、衛星画像のさらに詳細な観察を加えることで噴火とそれ以外の信号の切り分けを行った。その結果、二つの地震観測点で共通の振幅増

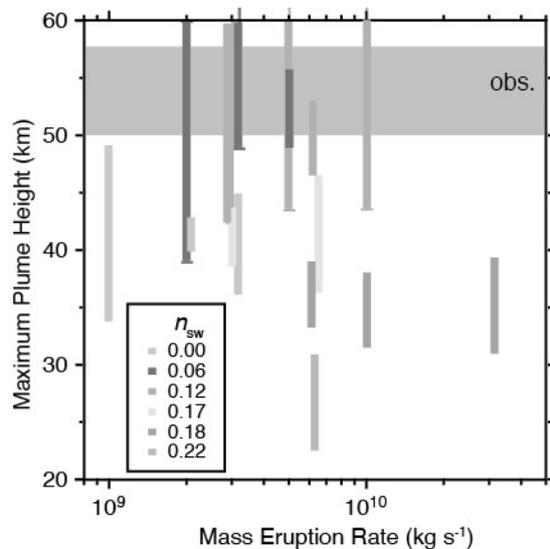


図-3 フンガ火山噴火の噴煙3次元シミュレーションから得られた噴煙最高高度。混合した海水の質量分率 n_{sw} を変え、噴出率に対する噴煙高度を表す。

加が3:47頃から始まっていることを見出し、その開始時間の同時性や、より遠方の観測点で見られないことから、フンガ火山起源である可能性のあることを示した (図2)。そうだとするとその開始時刻は3:44頃である。衛星画像には、対応する表面現象が確認できないことから、これは地下または海底で発生したもので、噴火の前駆過程であると考えられる。一方、上述の2:57の小噴火に対応する地震波は確認できず、また、衛星画像解析の結果からも、この小噴火は前日から間欠的に発生していた小噴火の最後の一つとするのが妥当である。本研究成果は、上述のBorrero et al. (2023) の報告をデータから裏付ける最初の証拠として重要なものである。

2.3 噴煙の数値シミュレーション

フンガ火山噴火で観察された高度50 kmを超す噴煙 (Carr et al., 2022) は、観測史上もっとも高い噴煙のひとつとなった。非常に強い噴火であるピナツボ火山1991年噴火の噴煙高度は40 km程度であり (Holasek et al., 1996)、フンガ火山噴火では多量の海水が関与したことが噴煙高度に影響を与えたと考えられる。海域での火山噴火現象を理解する上で、マグマ物質と海水の混合比と噴煙ダイナミクスの関係を議論することは重要である。

フンガ火山は4:00-4:30頃に最も強い噴火フェーズがあったと観察されている。この噴火フェーズに関して数値シミュレーションを実施した。計算にはSuzuki and Koyaguchi (2009) が開発した3次元流体力学モデルを用いた。滑り条件を与えた平坦な海水面に円形の火口を仮定し、そこからマグマ物質と海水

の混合物を高速で噴出させた。計算領域内は気象再解析で得られた温度・密度・圧力・風速の大気条件を与えた。単純のために、大気条件は水平方向には一様とした。マグマと海水の温度を固定し、その混合比を変えることで噴出混合物の温度・密度が異なるシミュレーションを行った。また、それぞれの混合比に対し、噴出率を変えた計算を行った。

数値計算の結果、マグマ物質と海水の混合比によって噴煙高度は大きく異なることが分かった。海水混合量が多い場合、噴出混合物の温度は低く、密度は大きい。そのため、噴出後に取り込んだ大気を効率よく膨張させることができず、噴煙は重い状態で火砕流を形成した。その結果、噴煙は火砕流を形成し、噴煙高度は低くなった。一方、海水混合量が少ない場合はマグマ噴火として振る舞い、噴煙高度は40 km程度となった。混合物中における海水の質量分率が0.06–0.12程度の時、噴煙の最高高度は50 kmを超し、フンガ火山噴火の観測データを説明することができた。これらの結果より、10 wt%程度の水が加わることでマグマ噴火よりも高い噴煙を形成することが明らかになった。

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., 2022a,b; 綿田, 2022a; Yamada et al., 2022; 山田, 2022a,b)。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事から、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4)。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5)。

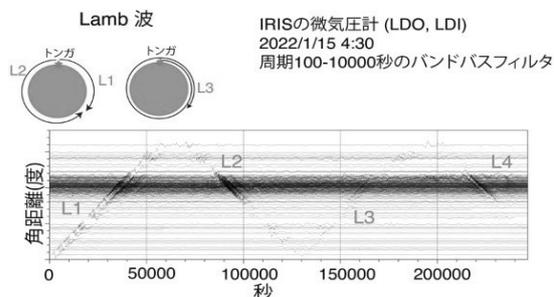


図-4 縦軸はフンガ火山からの距離 (角度), 横軸は2022年1月15日 4:30 UTC からの経過時間 (秒)。微気圧計記録に周期100秒から10000秒のバンドパスフィルタをかけた。Central and Eastern US Network, Caribbean USGS Network, Geoscope, IRIS IDA, IRIS USGS のデータを使用した。

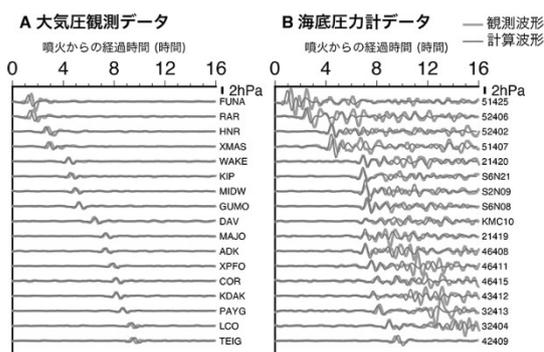


図-5 ラム波の伝播に伴う津波発生の数値計算波形と観測波形の比較。A は大気圧観測波形の時系列, B は海底圧力観測波形の時系列。灰色線は観測波形を、赤線はシミュレーション結果による波形である。各波形の右横にあるアルファベット、数字は観測点の名前を示している。Kubota et al. (2022) プレスリリースの図より引用。

ラム波の日本通過時に注目しアメダスの観測記録を解析したところ、個々の観測点においては、対応する気温・風速を記録していなかった。しかし、気圧パルスの到着時刻にあわせて気温・風速記録を足し合わせたところ、ラム波の伝播と整合した気圧・風速変化の存在が明らかとなった。ラム波により輸送された全波動エネルギーは $4.2 \times 10^{16} \text{J}$ であった (Watada et al., 2023)。

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; 久保田ら, 2023) 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5A）。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5B）。

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5B）。移動する気圧の波と津波の伝播速度が近い値となるとき、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」（「プラウドマン効果」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6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6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（プラウドマン効果）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。

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4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。

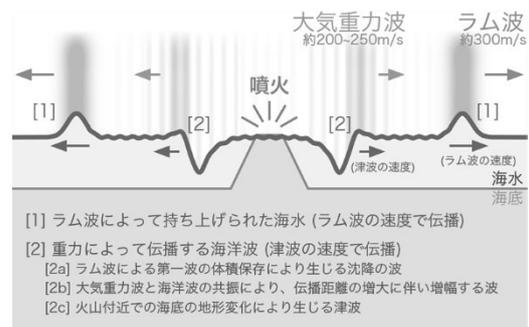


図-6 トンガ火山からの津波の発生と伝播の模式図。Kubota et al. (2022) プレスリリースの図より引用。

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、海岸に近づくとも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, Ho et al., 2023）。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。また西南日本沿岸では、南北方向に伝播する顕著な短周期成分に富む後続波を検出した（Ogiso and Tsushima, 2023）。

今回のトンガ火山の噴火では、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。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をもたらす水産被害を明らかにするため、ヒアリング調査、数値解析、アンケート調査を行い、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

宮古漁協と三陸やまだ漁協、大船渡漁協末崎支所、松島湾での漁師と牡鹿半島での漁師を訪問した。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(図7, 8)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。

4.2 数値解析

トンガ津波のような非地震性津波による養殖施設被害の事例は少なく、被害に関する知見は少ない。そのため、トンガ津波の特徴である短周期成分が養殖施設に与えた影響の検討や非地震性津波による養殖施設の被害メカニズムを明らかにすることは、津波対策を行う上で重要である。そこで、津波数値計算と漂流計算を行った。津波数値計算では、始めにラム波モデルによって噴火によって生じた気圧のシミュレーションを行った。その後、得られた気圧をCoupling Air and Water waveモデルの気圧項に入力することによって、津波のシミュレーションを行った。また、漂流計算では津波数値計算で得られた水位と流速を用いて養殖施設に作用する流体力を計算し、剛体モデルに逐一入力することで養殖施設の並進運動(x,y)と回転運動(z)の運動方程式をRunge-Kutta法により解いていき、養殖施設の位置と角度の数値解を求めた。

主な解析結果として、湾奥に向かうに従って水位が大きくなっていること、湾口と局所的に浅海となっている場所で流速が速くなっていること、流速が一定値を超えると水位に関係なく養殖施設被害が発生

すること、殆どの施設は南北方向の変位より東西方向の変位の方が大きく、東西方向で隣接している養殖施設の衝突によって被害が生じたことを示した。

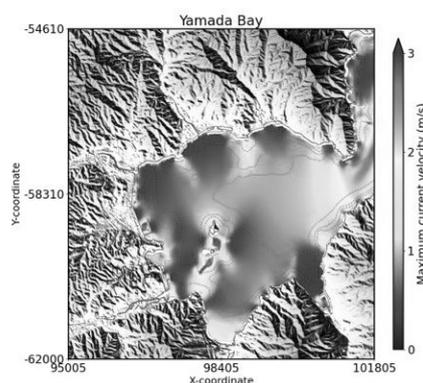


図-7 山田湾の最高水位

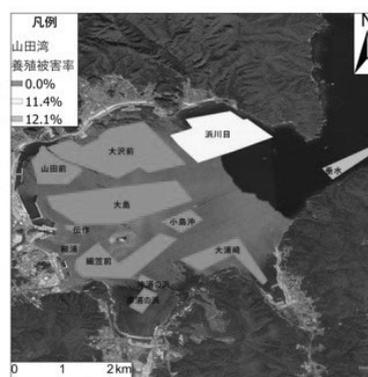


図-8 山田湾での養殖施設被害図

4.3 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。主な調査結果については以下の通りである。

「これまで、国外で発生した地震・噴火等に伴う津波により、日本において漁業被害が発生する可能性がある」と認識していましたか。」との質問に対し、「非常に認識していた」「認識していた」「やや認識していた」と回答した人の割合は、それぞれ2.5%、19.0%、32.0%であった。また、「今後10年以内に、国外で発生した地震・噴火等に伴う津波により、日本において漁業被害が発生する可能性がある」と思いますか。」との質問に対し、「非常にそう思う」「そ

う思う」「ややそう思う」と回答した人の割合は、それぞれ12.5%、25.5%、43.0%であった。さらに、「今後、津波による漁業被害のリスクが高い開発途上国に対して、日本は積極的に漁業関連の国際協力・貢献を行うべきであると思いますか。」との質問に対しては、「非常にそう思う」「そう思う」「ややそう思う」と回答した人の割合は、それぞれ4.0%、24.5%、44.0%であった。

このように、「漁業関連」「水産加工・サービス業関連」に携わる人の多くが、今後10年以内に日本において国外で発生した地震・噴火等に伴う津波による漁業被害が発生する可能性について認識しているとともに、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についても、概ね肯定的に捉えていることがわかった。

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、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ラ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場合、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。これらは「注意報」ならではの課題ともいえる。

これに関し、①自治体郵送調査、②国内現地調査、③住民郵送調査を行った。以下①、②を報告する。

5.2 自治体郵送調査

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）、避難指示を発したのは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）、避難指示を発したのは15.9%（56自治体）に留まっている。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。

これをより詳細に確認するために、津波警報・注意報が発表された沿岸の市町村を対象に調査を実施の上、ヒアリングを実施した（三宅ら、2023）。調査は沿岸の352市町村を対象に、2022年12月2日～2023年1月27日の期間、郵送配布・郵送回収方式で行った（回収率:51.4%）。自治体における住民への津波注意報の伝達の有無、津波注意報発表を受けた避難指示の発出の有無や避難指示の対象地域、津波注意報の伝達や、避難指示の発出をしなかった場合には、その理由について問うている。以下に調査結果の要旨を述べる。

(1) 避難指示の対象地域を巡る混乱

調査結果（表2）によると、注意報が発表された164市町村のうち、71%（116市町村）が津波注意報を住民に伝達し、18%（30市町村）が避難指示を発出し

た。避難指示の対象地域は、「海岸堤防より海側」が36.7%（11 市町村）と最多だったものの、「市町村全域」が3.3%（1 村）「沿岸部（特に定めなかった）」が23.3%（7 市町）あった。「市町村全域」に発出したのは、沖縄県伊平屋村の1 村。「沿岸部（特にさだめなかった）」に発出したのは、青森県八戸市、宮城県七ヶ浜町、宮城県塩竈市、宮城県女川町、千葉県一宮町、千葉県大網白里市、静岡県伊東市の7 市町であった。電話での追加調査によると、4 市町村は、担当者が注意報の避難行動に関するガイドラインを把握していないと回答し、その他の4 市町は、ガイドラインを把握した上であえて沿岸部全体に呼び掛けていた。呼びかける手段として、防災無線を使用せざるを得ず、堤外の対象地域や対象者に対して、ピンポイントに避難を呼びかけることが難しいという声もあった。いずれにしても、ガイドラインにおける「沿岸の」「海岸堤防等より海側」などの表現のわかりにくさ、「漁業関係者」「港湾施設等で仕事に従事する者」などの対象者の不明確さが、自治体の避難指示発出を巡る対応に、混乱を生じさせていると考えられる。

(2) 自治体による未知の現象に対する異例の対応

本事象では、気象庁が「若干の海面変動が予想されるが、被害の心配はない」と発表した後に、最大波として1.2mに達する潮位変動を観測し、気象庁は防災上の観点から津波警報・注意報を臨時的に適用して深夜に避難を呼びかけた。気象庁側の対応が二転三転し、深夜の津波情報で避難しなければならなかったことで、自治体の対応が分かれたと考えられる。

自治体の今回における理想的な対応とは「津波注意報が発表されたことを対象者に十分に周知し、注意報の対象地域（海岸堤防より海側のエリア）に対して避難指示を発出する」であったと考えるが、実態はそうではない。津波注意報を伝達せず、避難指示も発出しなかった自治体は、29.6%（49 市町村）ある。注意報の伝達や避難指示の発出を巡る対応が自治体によって大きく分かれたことも、混乱があったことの証左である。

本事象を受け、気象庁は火山噴火による潮位変化で、地震津波と同様に「津波警報・注意報」の枠組みで情報を出すことになった。今後、自治体においては、本事象を想定した避難指示の発令基準を設定するなど、事前の準備が求められる。

なお、潮位変化というよりは、津波注意報における呼びかけに関して、現在のガイドラインは、自治体に十分に理解されておらず、自治体の避難情報の運用実態とも乖離している。実態を踏まえたより良いガイドラインの在り方を検討する必要がある。

表-2 フンガ火山噴火による潮位変動における情報発出

		避難指示		計
		発出した	発出しなかった	
津波注意報	伝達した	30 自治体	86 自治体	116 自治体
	伝達しなかった	0 自治体	49 自治体	49 自治体
	計	30 自治体	135 自治体	165 自治体

5.3 事例調査—奄美市、大和村の事例

2022年1月15日13時（日本時間）頃にフンガ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、避難指示が発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。

5.4 残された課題

なお、テーマ4では、ほかにも現地および周辺国における噴火被害の状況についての調査を実施済みであり、追って報告する予定である。

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）、三宅真太郎（東大学際情報学府）は、研究成果を提供して下さいました。

参考文献

- Borrero, J.C., Cronin, S.J., Latu'ila, F.H., Tukuafu, P. et al. (2023): Tsunami Runup and Inundation in Tonga from the January 2022 Eruption of Hunga Volcano. *Pure and Applied Geophysics*, Vol.180, 1-22.
- Brenna, M. et al. (2022): Post-caldera volcanism reveals shallow priming of an intra-ocean arc andesitic caldera: Hunga volcano, Tonga, SW Pacific. *Lithos*, 412-413, 106614.
- 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.
- Ho, T.-C., Mori, N., Yamada, M. (2023): Ocean gravity waves generated by the meteotsunami at the Japan Trench following the 2022 Tonga volcanic eruption. *Earth, Planets and Space*, Vol.75, 25. <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01775-x>.
- Holasek, R. E., Self, S., and Woods, A. W. (1996): Satellite observations and interpretation of the 1991 Mount Pinatubo eruption plumes. *J. Geophys. Res.*, Vol. 101, No. B12, pp. 27635–27655.
- 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>.
- 久保田達矢, 齊藤竜彦, 西田究 (2023): 2022年1月15日のトンガの火山噴火に伴う全球規模の津波発生と伝播, *海洋調査技術*, 35, 23-26.
- 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>.
- 三宅真太郎・関谷直也・安本真也・佐藤翔輔・吉本充宏・石峯康浩・秦康範 (2023) : トンガ海底火山の噴火に伴う潮位変化に対する自治体対応—津波注意報を巡る情報発信の課題—, 第42回日本自然災害学会学術講演会, 2023年9月17日, 金沢大学角間キャンパス
- 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)
- 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).
- Ogiso, M., Tsushima, H. (2023): Ocean-Wave Gradiometry: Visualizing and Extracting Propagation Features of the 15 January 2022 Tsunami Wavefield with Dense Ocean-Bottom Pressure Gauge Arrays. *Seismological Research Letters*, Vol. 94(2A), 626-636. <https://doi.org/10.1785/0220220151>.
- Press F. and Harkrider D. (1966): Air-sea waves from the explosion of Krakatoa. *Science*, Vol. 54(3754):1325-7.
- Putirka, K. D. (2008): Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Rev. Mineralogy Geochem.*, Vol. 69, 61-120.
- Seabrook, S. et al. (2023): Pyroclastic density currents explain far-reaching and diverse seafloor impacts of the 2022 Hunga Tonga Hunga Ha'apai eruption. *Research Square*, doi:10.21203/rs.3.rs-2395332/v1.
- 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.
- Suzuki, Y.J. and Koyaguchi, T. (2009): A three-dimensional numerical simulation of spreading umbrella clouds. *J. Geophys. Res.*, Vol. 114, B0320.
- 田中健路, 石丸克弥, 鈴木悠太, 村上太一(2022) : 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: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・トンガフンガ・ハアパイ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): 2022年フンガ・トンガ＝フンガ・ハアパイ噴火による津波伝播に関する考察土木学会論文集B2(海岸工学), 78巻, 2号, p. I_145-I_150, https://doi.org/10.2208/kaigan.78.2_I_145.
- 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>
- 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.
- Watada, S., Imanishi Y., Tanaka K. (2023): Detection of Air Temperature and Wind Changes Synchronized with the Lamb Wave from the 2022 Tonga Volcanic Eruption. *Geophys. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1029/2022GL100884>.
- Waters, L. E. and Lange, R. A. (2015) An updated calibration of the plagioclase-liquid hygrometer-thermometer applicable to basalts through rhyolites. *Am. Mineral.*, Vol. 100, 2172–2184.
- 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*, Vol. 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.