

第 59 回自然災害科学総合シンポジウム
(2022 年度防災研究所 重点推進型共同研究)

講演論文集

2022 年 9 月 26 日 (月)

主催

京都大学防災研究所 自然災害研究協議会

第 59 回自然災害科学総合シンポジウム

主 催： 京都大学防災研究所自然災害研究協議会

日 程： 令和 4 年 9 月 26 日（月）13 時 00 分～17 時 20 分

場 所： ハイブリッド開催

オンライン： Zoom

現地会場： 京都大学防災研究所（宇治キャンパス）連携研究棟 大セミナー室(301)

プログラム

13 : 00

開会挨拶

自然災害研究協議会議長

奥村 誠(東北大学災害科学国際研究所)

所長挨拶

中北 英一(京都大学防災研究所)

13 : 10～13 : 50

【科学研究費補助金・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】

「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」

佐竹 健治(東京大学地震研究所)

13 : 50～14 : 20

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】

「トンガの噴火による非地震性津波に対する避難に関する調査」

有川 太郎(中央大学理工学部都市環境学科)

14 : 20～14 : 50

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】

「トンガの噴火により四国沿岸で発生した漁船被害等に関する調査」

田中 健路(広島工業大学環境学部地球環境学科)

14 : 50～15 : 10 休憩

15 : 10～15 : 40

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】

「2021 年 Cyclone Seroja による東ティモールの豪雨災害について」

朝位 孝二(山口大学大学院創成科学研究科)

15 : 40～16 : 10

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】

「3/16 福島県沖の地震で発生した地震動と建物被害の対応」

境 有紀(京都大学防災研究所)

16 : 10～16 : 40

【2021 年度災害調査報告】

「熱海市で発生した泥流の流動特性を考慮した土砂災害対策」

竹林 洋史(京都大学防災研究所)

16 : 40～17 : 10

【防災研究所共同研究・地域防災実践型共同研究】

「漸増型巨大災害リスクに対応する地域防災体制の構築」

生田 英輔(大阪公立大学 都市科学・防災研究センター)

17 : 10～17 : 20

閉会挨拶

澤田 純男(京都大学防災研究所)

目次

- 【科学研究費補助金・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】
- 「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」 …… 1
佐竹 健治（東京大学地震研究所）
- 【自然災害研究協議会突発災害調査報告】
- 「トンガの噴火による非地震性津波に対する避難に関する調査」 …… 11
有川 太郎（中央大学理工学部都市環境学科）
- 【自然災害研究協議会突発災害調査報告】
- 「トンガの噴火により四国沿岸で発生した漁船被害等に関する調査」 …… 60
田中 健路（広島工業大学環境学部地球環境学科）
- 【自然災害研究協議会突発災害調査報告】
- 「2021年 Cyclone Seroja による東ティモールの豪雨災害について」 …… 67
朝位 孝二（山口大学大学院創成科学研究科）
- 【自然災害研究協議会突発災害調査報告】
- 「3/16 福島県沖の地震で発生した地震動と建物被害の対応」 …… 76
境 有紀（京都大学防災研究所）
- 【2021年度災害調査報告】
- 「熱海市で発生した泥流の流動特性を考慮した土砂災害対策」 …… 83
竹林 洋史（京都大学防災研究所）
- 【防災研究所共同研究・地域防災実践型共同研究】
- 「漸増型巨大災害リスクに対応する地域防災体制の構築」 …… 89
生田 英輔（大阪公立大学 都市科学・防災研究センター）

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所

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)。

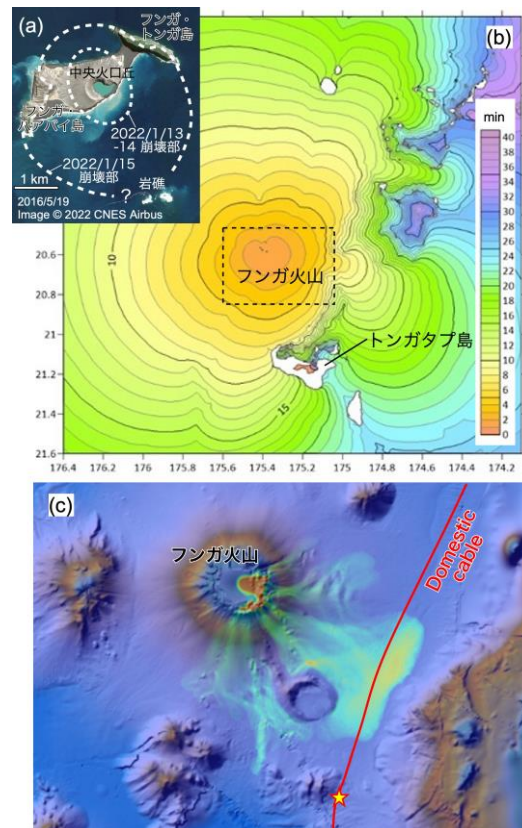


図-1 (a) 2016年のフンガ火山と2022年噴火による変化の概要。(b) 近傍域の津波シミュレーション結果(到達時間)と(c) 二層流モデルによる土砂移動計算結果。星印は推定ケーブル断線地点。

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。噴出源から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。

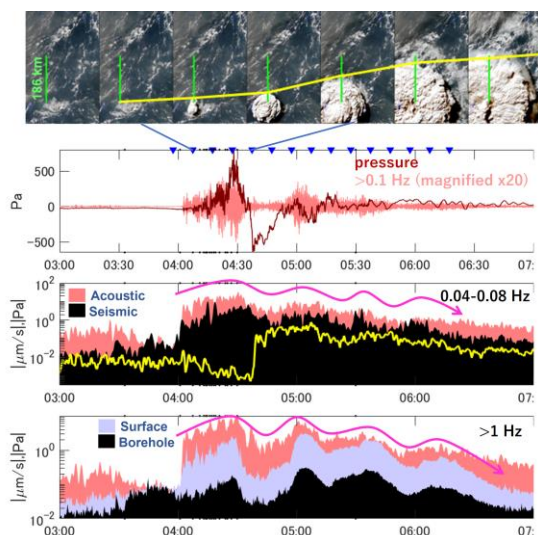


図-2 フィジーの地震計・気圧計データ (IRIS) と衛星画像 (Himawari-8) から得られた噴火推移。

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。

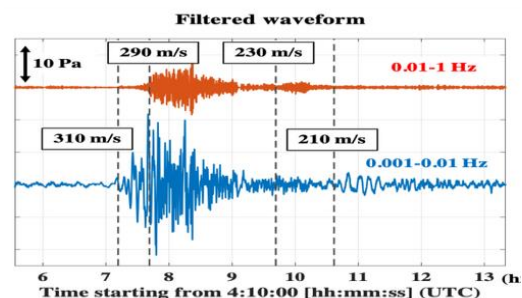


図-3 室戸観測点における気圧変動を周波数フィルターした時系列。0.001-0.01 Hzの成分 (下) の10:40 UTC以降に内部重力波が明瞭に見える (Nishikawa et al., 2022)。

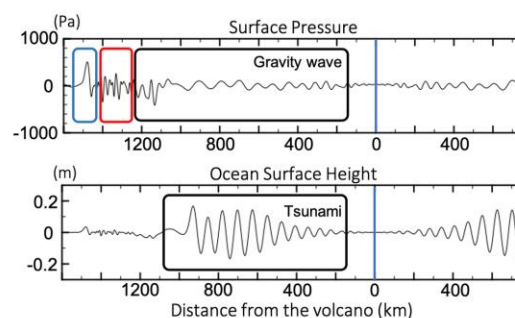


図-4 水平鉛直2次元の圧縮性大気方程式と津波の結合計算の結果 (高度40 kmに熱源を与えた4800秒後)。ラム波 (青枠)、音波 (赤枠)、内部重力波 (黒枠) が同時に励起され分散性のある幅広い速度範囲で伝播し (上)、重力波の波束が津波の後続波を共鳴的に大振幅で励起している (下)。 (Nishikawa et al., 2022)

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4400万トン、2000万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。

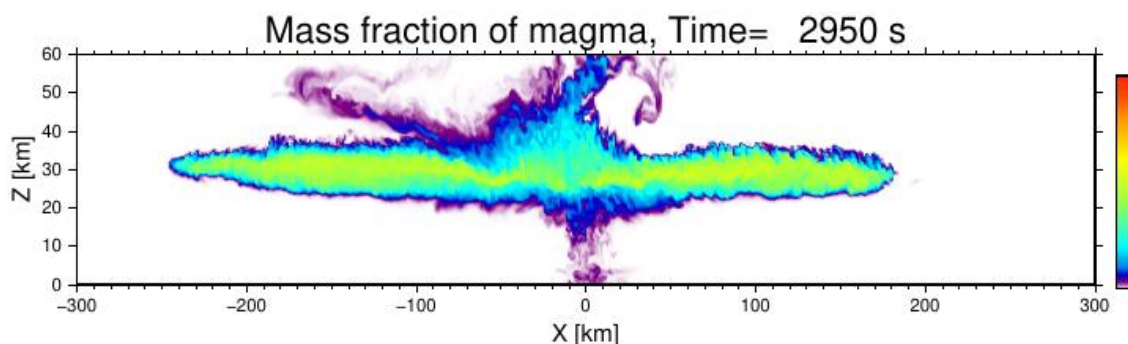


図-5 フンガ火山噴火の噴煙3次元シミュレーション。火口を含む東西断面における噴火開始後2950秒後の噴出物質質量分率の分布を示す。

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圧変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・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)。

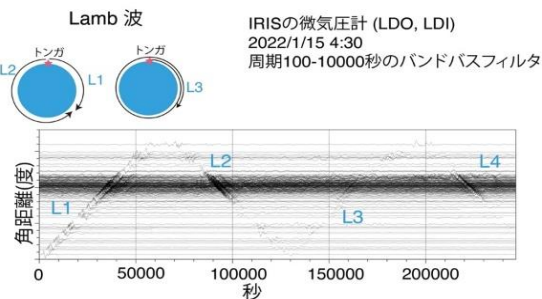


図-6 縦軸はフンガ火山からの距離(角度), 横軸は2022年1月15日 4:30 UTC からの経過時間(秒)。微気圧計記録に周期100秒から10000秒のバンドパスフィルタをかけた。Central and Eastern US Network, Caribbean USGS Network, Geoscope, IRIS IDA, IRIS

USGS のデータを使用した。

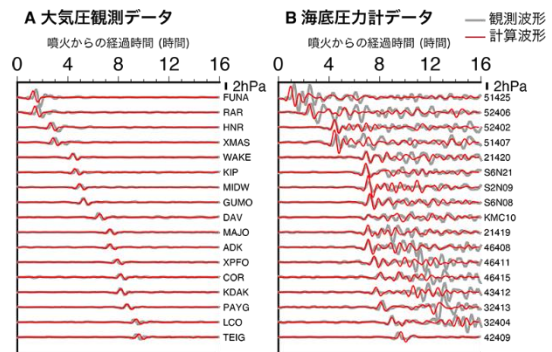


図-7 ラム波の伝播に伴う津波発生の数値計算波形と観測波形の比較。A は大気圧観測波形の時系列, B は海底圧力観測波形の時系列。灰色線は観測波形を, 赤線はシミュレーション結果による波形である。各波形の右横にあるアルファベット, 数字は観測点の名前を示している。Kubota et al. (2022) プレスリリースの図より引用。

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(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。

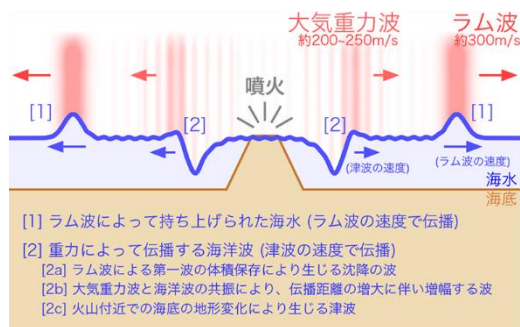


図-8 トンガ火山からの津波の発生と伝播の模式図。Kubota et al. (2022) プレスリリースの図より引用。

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)。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。津波が日本に来襲したのは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。

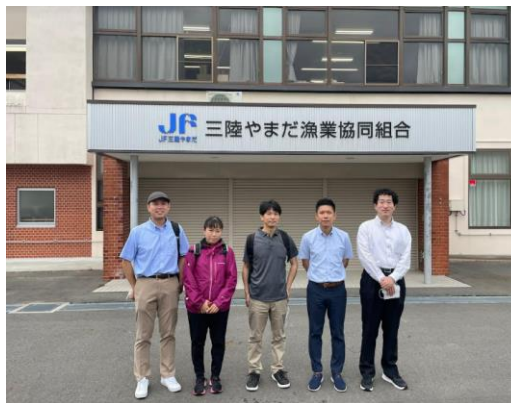


図-9 研究メンバー@三陸やまだ漁協



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)。

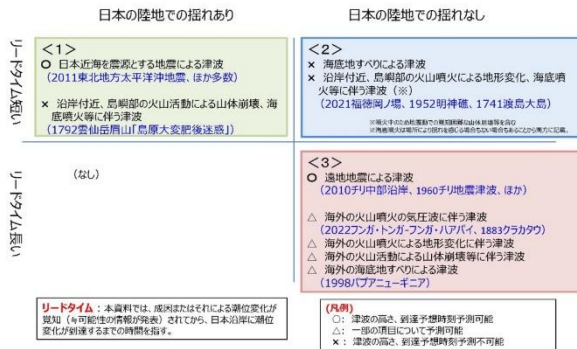


図-11 火山噴火や地震に起因する潮位変化に関する現象 (気象庁, 2022)

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。

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・トンガーフンガ・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。

5.3 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.

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】
「トンガの噴火による非地震性津波に対する避難
状況の確認の調査」

有川 太郎（中央大学理工学部都市環境学科）

どんな津波であったのか

参照した報告書（論文）

Tsunami Runup and Inundation in Tonga from the January 2022 eruption of Hunga Volcano

Submitted 8 September 2022

Authors: Jose C. Borrero^{1,2} (<https://orcid.org/0000-0003-4879-3890>), Shane J. Cronin³ (<https://orcid.org/0000-0001-7499-603X>), Folauhola Helina Latu'ila⁴, Pupunu Tukuafu⁴, Nikolasi Heni⁴, Ana Maea Tupou⁴, Taaniela Kula⁴, Ofa Fa'anunu⁵, Cyprien Bosserelle⁶ (<https://orcid.org/0000-0001-8756-5247>), Patrick Lynett² (<https://orcid.org/0000-0002-2856-9405>), Laura Kong⁷ (<https://orcid.org/0000-0002-2259-8141>)

¹ eCoast Marine Consulting and Research, Raglan 3225 New Zealand

² University of Southern California Tsunami Research Centre, Los Angeles, CA 90089-2531

³ University of Auckland, Department of Geology and Earth Science

⁴ Tonga Geological Services

⁵ Tonga Meteorological Service

⁶ NIWA, Christchurch

⁷ UNESCO/IOC International Tsunami Information Centre

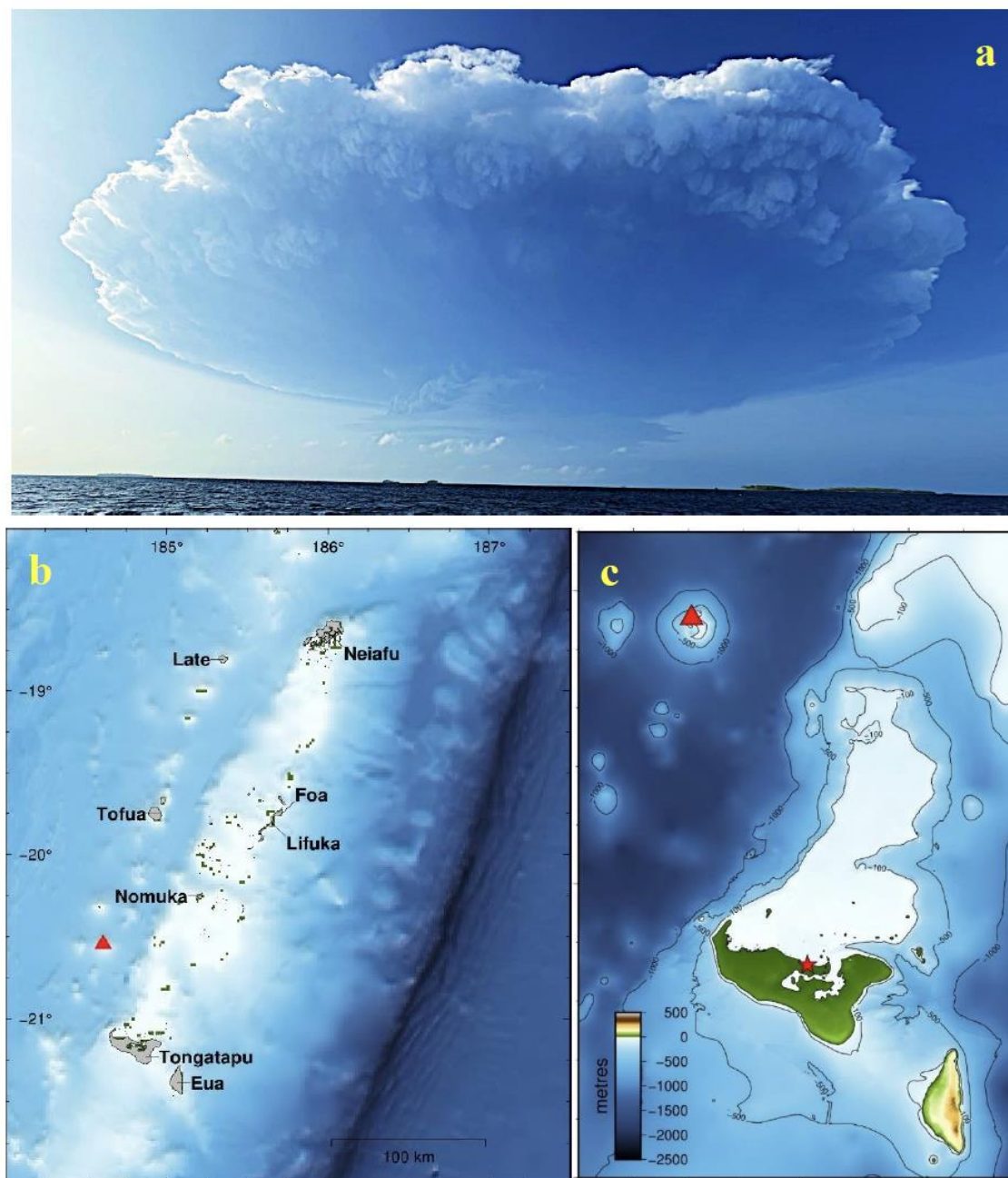
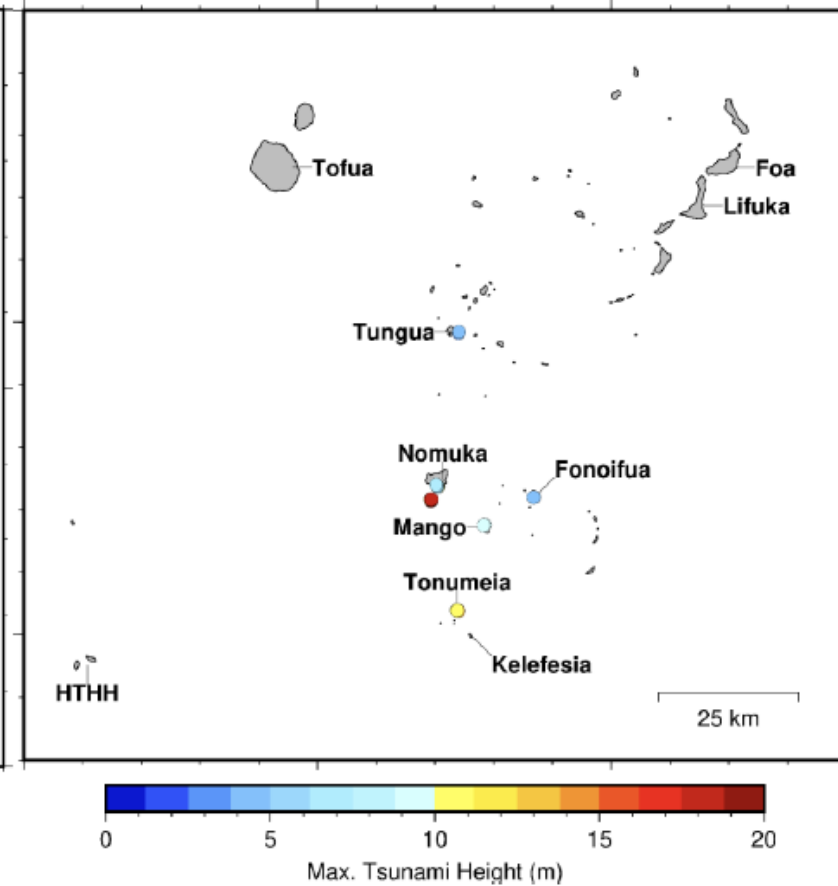
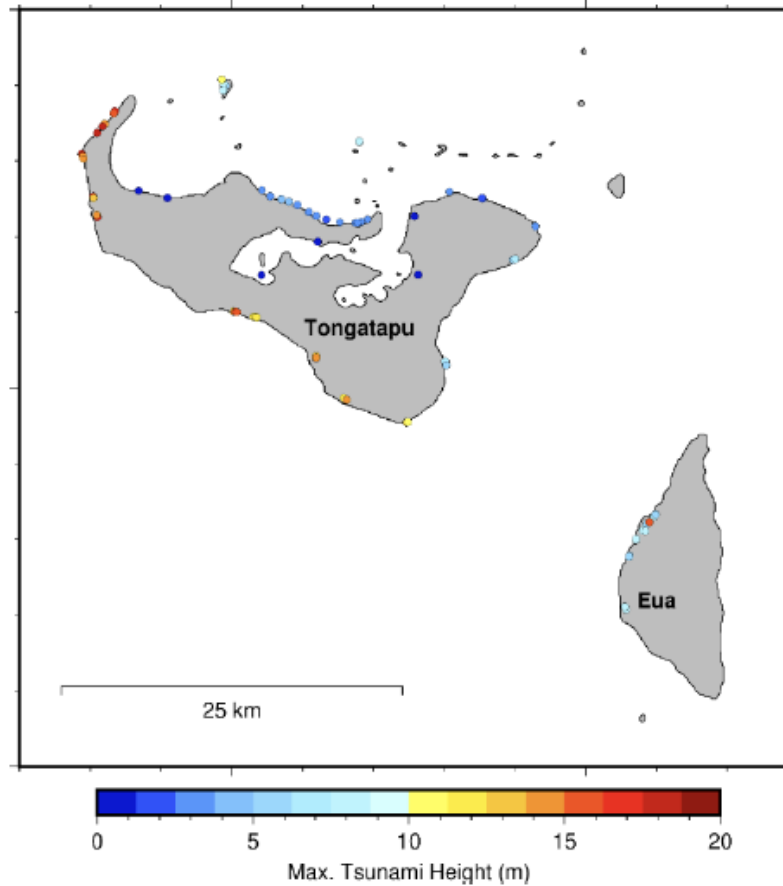
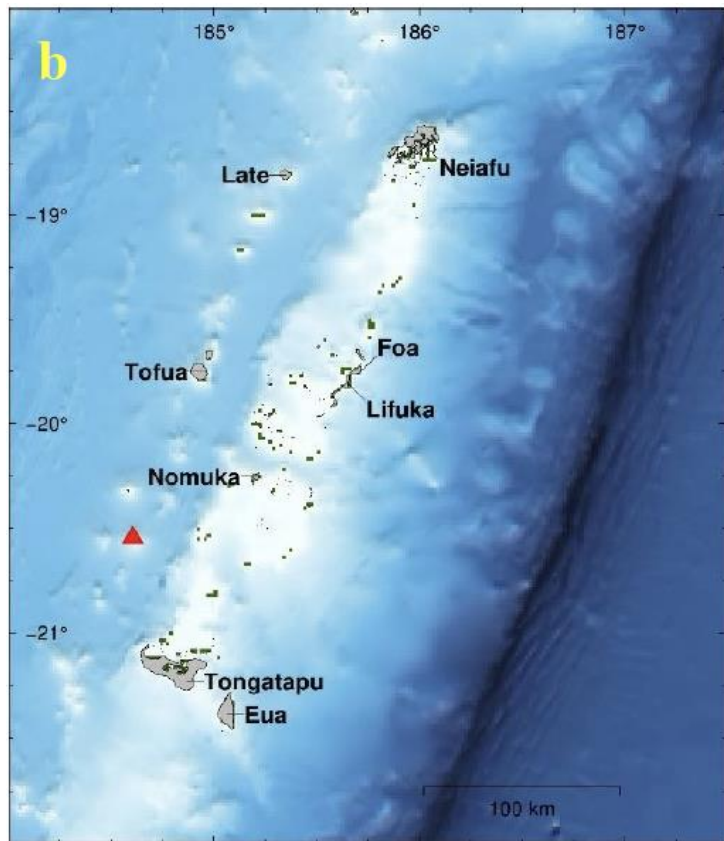


Fig. 1 (a) The eruption rising to its climax at 5.24 pm (0424 UTC) January 15th from ~10 km north of Tongatapu (Photo: Branko Sugar); the upper plume is already >100 km wide. (b) The location of major islands in the Kingdom of Tonga, with Hunga volcano indicated with a red triangle. (c) The bathymetry around Tongatapu and 'Eua islands

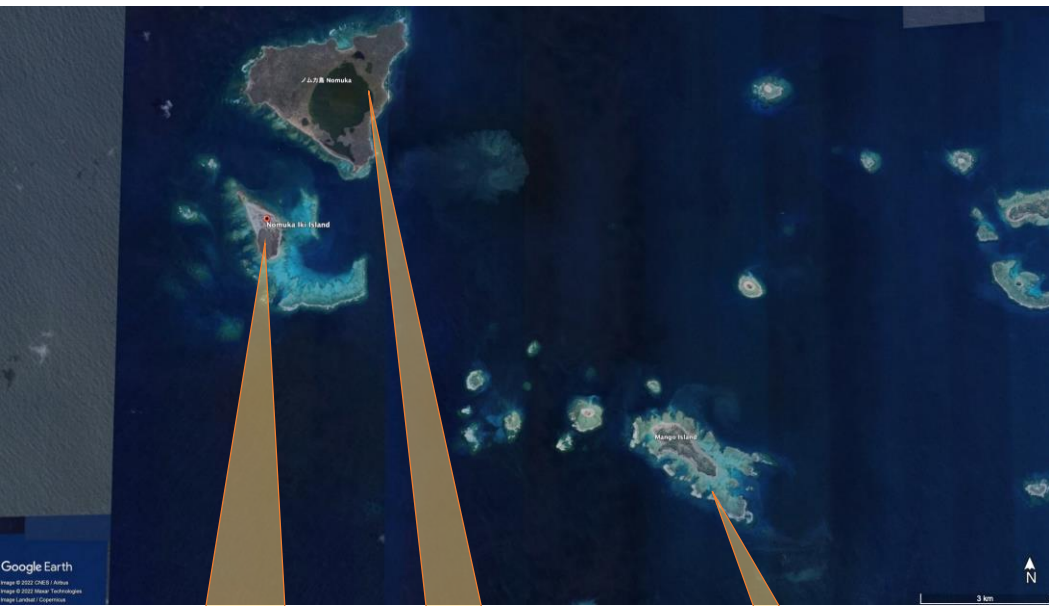
On January 15th, 2022, at approximately **4:47 pm local time** (0347 UTC), several weeks of heightened activity at Hunga volcano culminated in an **11-hour long violent eruption**, 65 km northwest of the main populated island of Tongatapu in the Kingdom of Tonga (Fig. 1). Hunga is often referred to by the names of two small islands Hunga-Tonga and Hunga Ha'apai that are located on the submarine caldera's northern rim (Cronin et al., 2017), **During the first 45 minutes of this eruption**, a massive atmospheric pressure wave and a series of tsunamis were generated and observed around the world (Carvajal et al., 2022, Lynett et al., 2022).

2022年1月15日、現地時間午後4時47分（0347 UTC）頃、フンガ火山の数週間にもわたる活発な活動は、トンガ王国の主要人口島トンガタプの北西65kmで11時間にもわたる激しい噴火に至った（図1）。フンガは、海底カルデラの北縁に位置する2つの小島フンガ・トンガとフンガ・ハアパイの名前で呼ばれることが多く（Cronin et al., 2017）、この噴火の最初の45分間は、大規模な大気圧波と一連の津波が発生し世界中で観測された（Carvajal et al, 2022, Lynett et al, 2022）。（DeepLによる翻訳）

Summary data plots of maximum tsunami height for Tongatapu and 'Eua (left) and Ha'apai islands (right). HTHH = Hunga Tonga – Hunga Ha'apai Volcano



Nomuka iki island



Nomuka iki island

around 12.6- 20.0m on cliff

Runup height

Nomuka island

around 5.4 -10.0 m

Mango island

around 7.5m

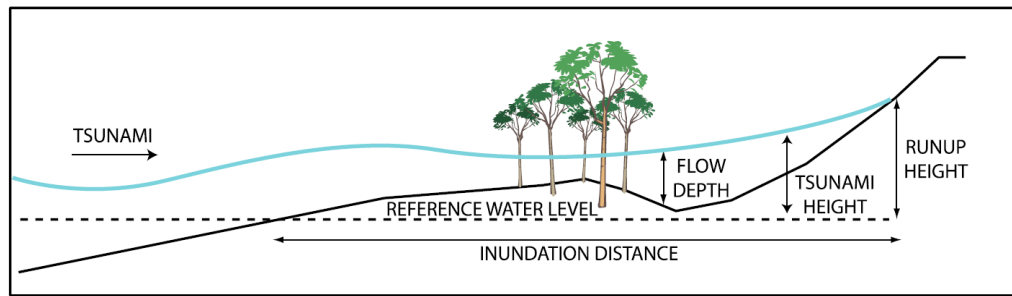


Figure 1.4 Definition sketch for tsunami flow terms.



video taken by TGS, 2022.01.19

Tongatapu island

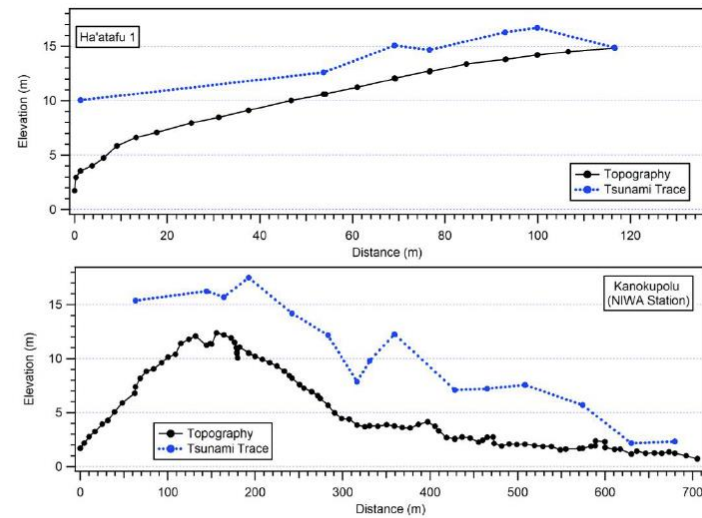
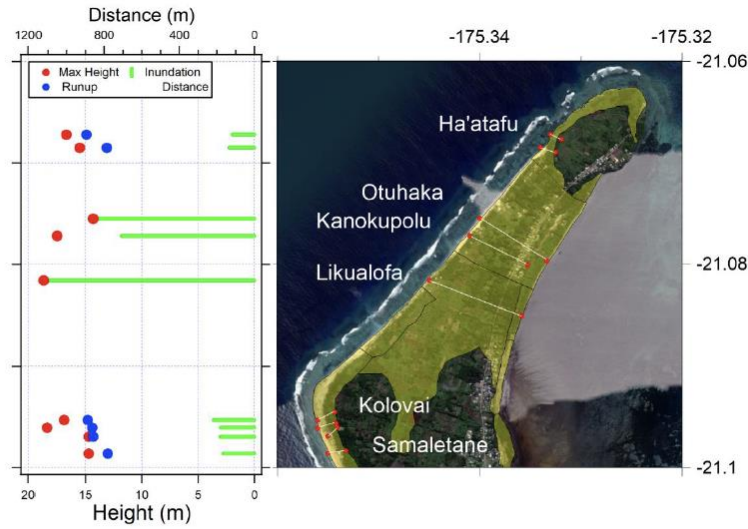
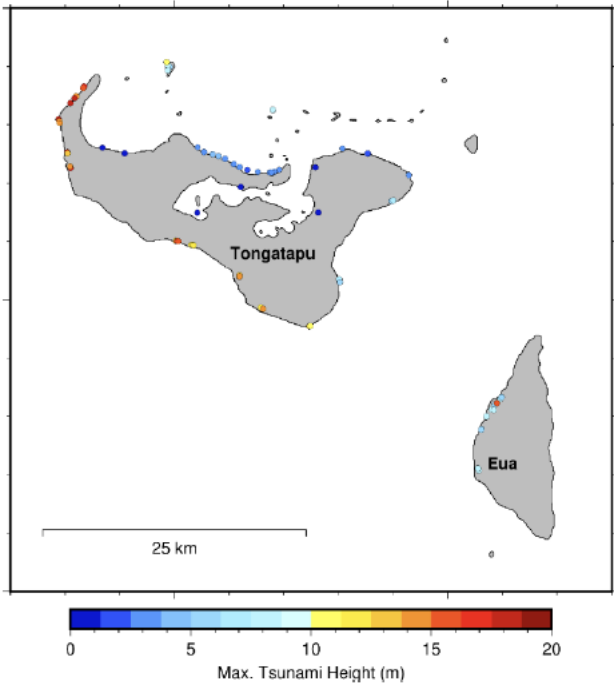


Fig. 7 Locations surveyed along the western coast of Tongatapu. The start and endpoints of each transect are indicated with the red dot. Green triangle indicates the location of the NIWA weather station. Yellow shaded area indicated extents of inundation. Left plot shows maximum tsunami trace height and maximum runup height along each transect, right plot shows maximum inundation distance.

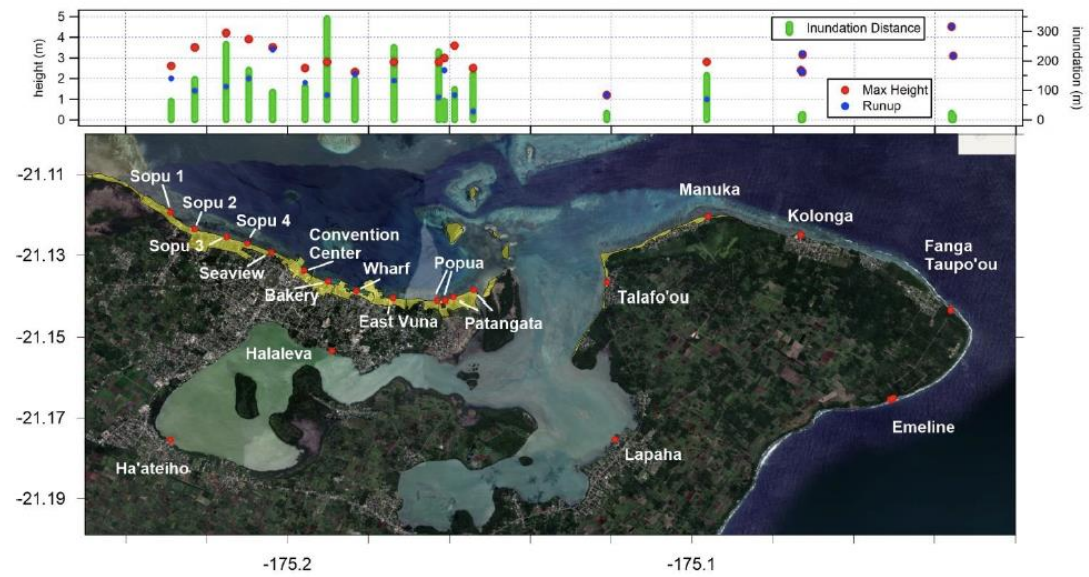


Fig. 9 Maximum tsunami trace elevation (red) and run up height (blue) along the north coast of Tongatapu.



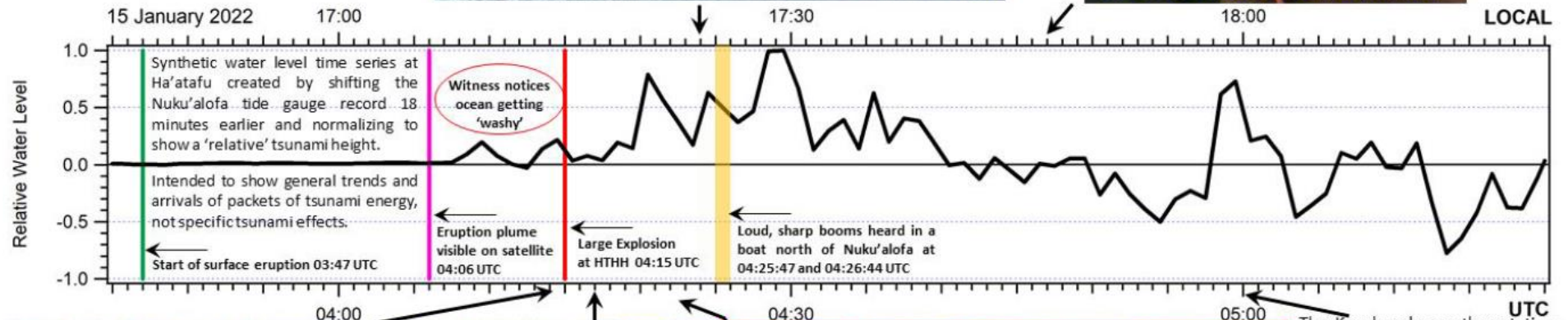
Fig. 10 Scenes from Nuku'alofa (a) tsunami surge coming on the grounds of the Royal Palace at 17:47 local time (b, c) some smaller vessels were floated on to the wharf decks (d) inundation at the Tanoa Hotel along the waterfront.

Eruption, 2022.01.14

video taken by TGS, 2022.01.14



Tsunami arrival situation at Tongatapu



Photos from a guest at the Ha'atafu Beach Resort of the first small surges. The 16:41 photo is prior to the onset of tsunami activity. The 17:14 photos show a surge (red arrows) propagating towards shore and hitting the beach. The 17:17 photo shows another surge. These surges prompted the guest to return to her room and start packing to leave and likely prompted the men in the sequence at right to evacuate the beach.



Video 1 (red), shows men evacuating the beach after the first surges. They filmed as a wave hits, then continue filming from a car as a larger surge comes ashore. Video 2 (green) shot from further inland shows the back of the car (circled in red) and the departing car of the Ha'atafu beach resort guest who took the photos shown to the left

The Kanokupolu weather station, situated at an elevation of ~+13 m ASL, transmitted data until 18:00 (05:00 UTC). This corresponds to the arrival of the second large surge.

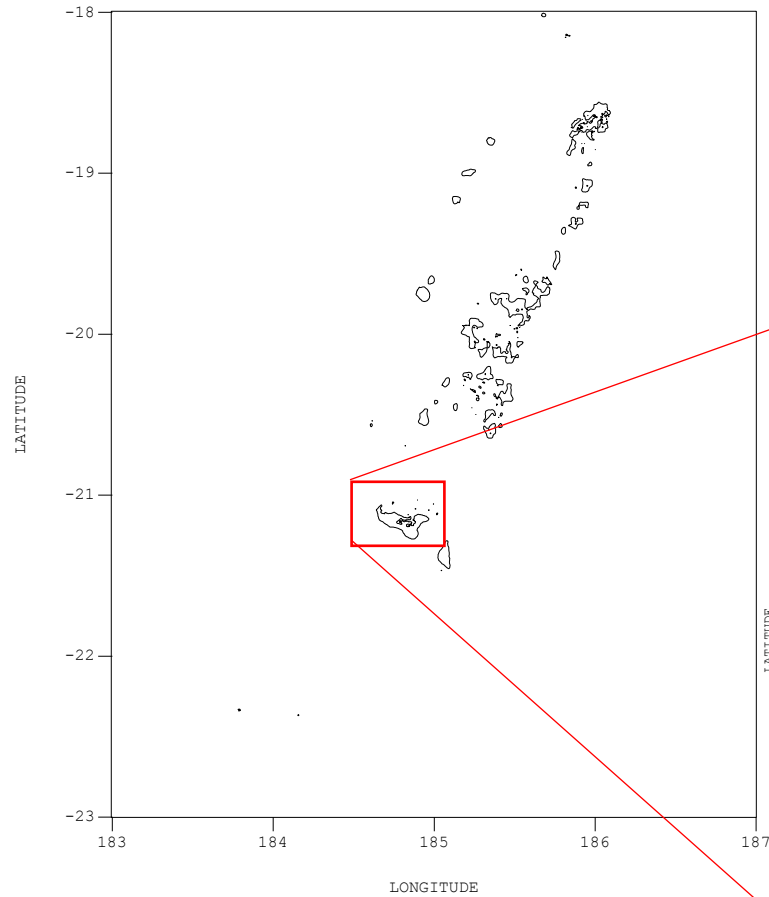


A boom can be heard at the end of the second video, likely corresponding to the booms recorded from the boat.

数値シミュレーションではど
うか

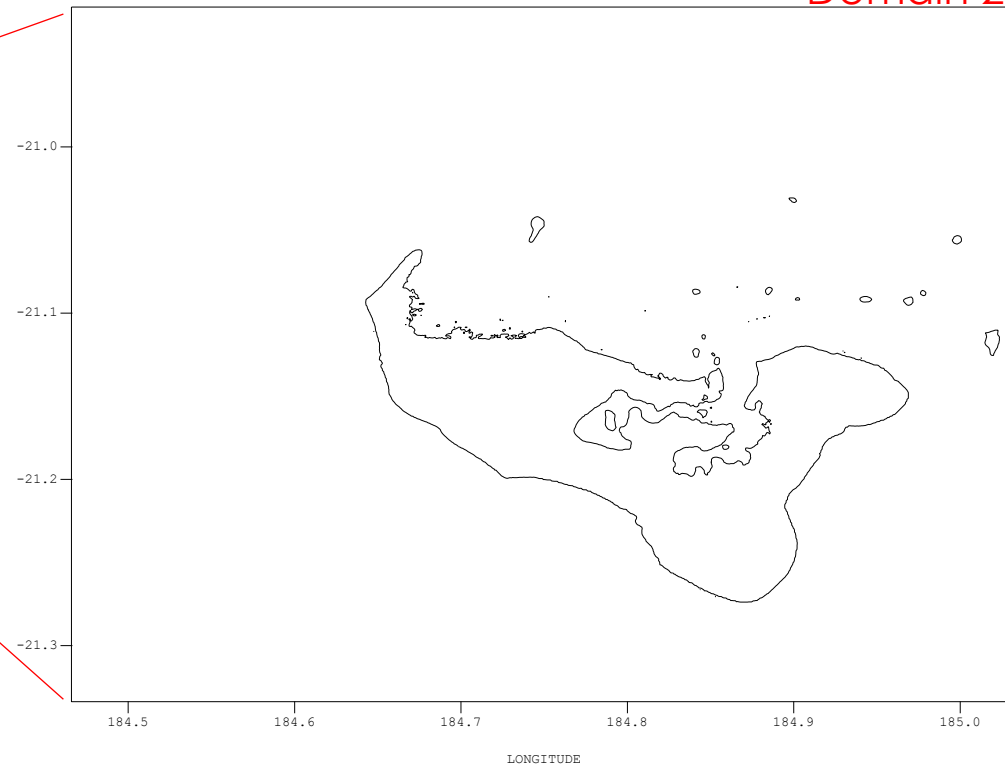
Calculation conditions

Domain 1



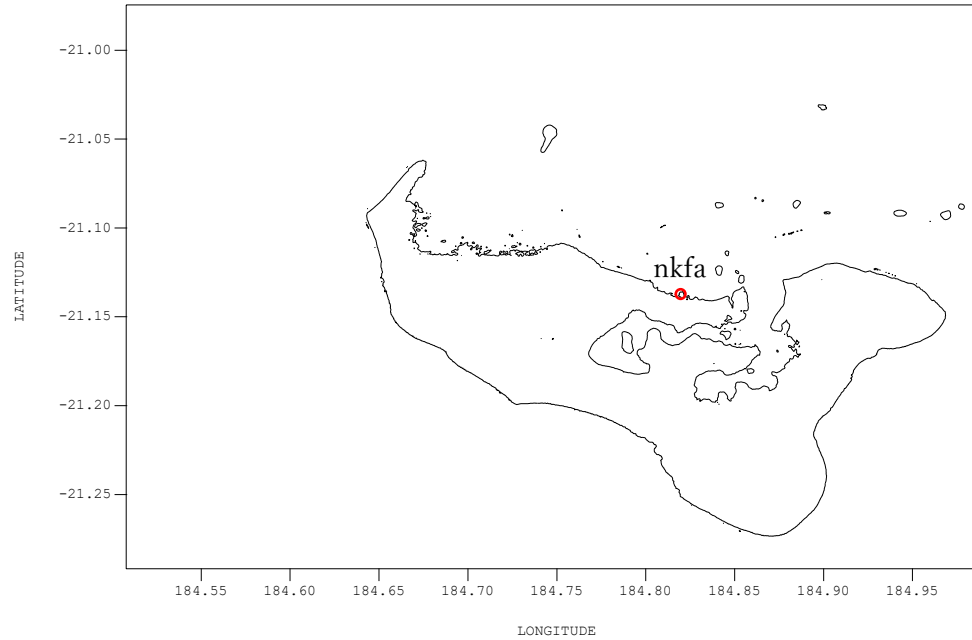
	Size Width x Height	Grid size [m]
Domain 1	960 x 1200	450
Domain 2	680 x 500	90
Domain 3	1740 x 1140	30

Domain 2

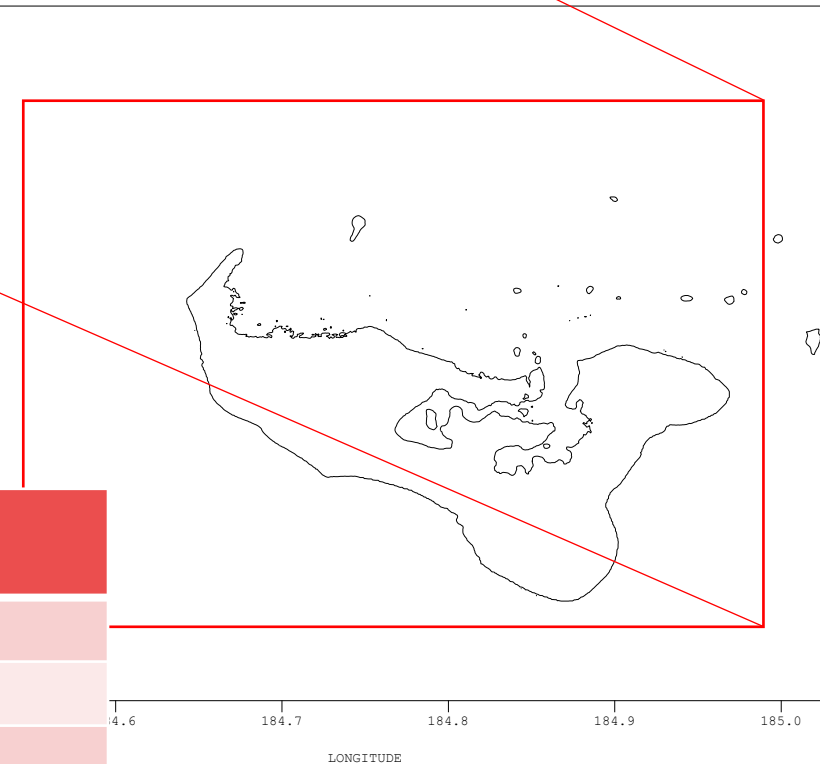


Calculation conditions

Domain 3



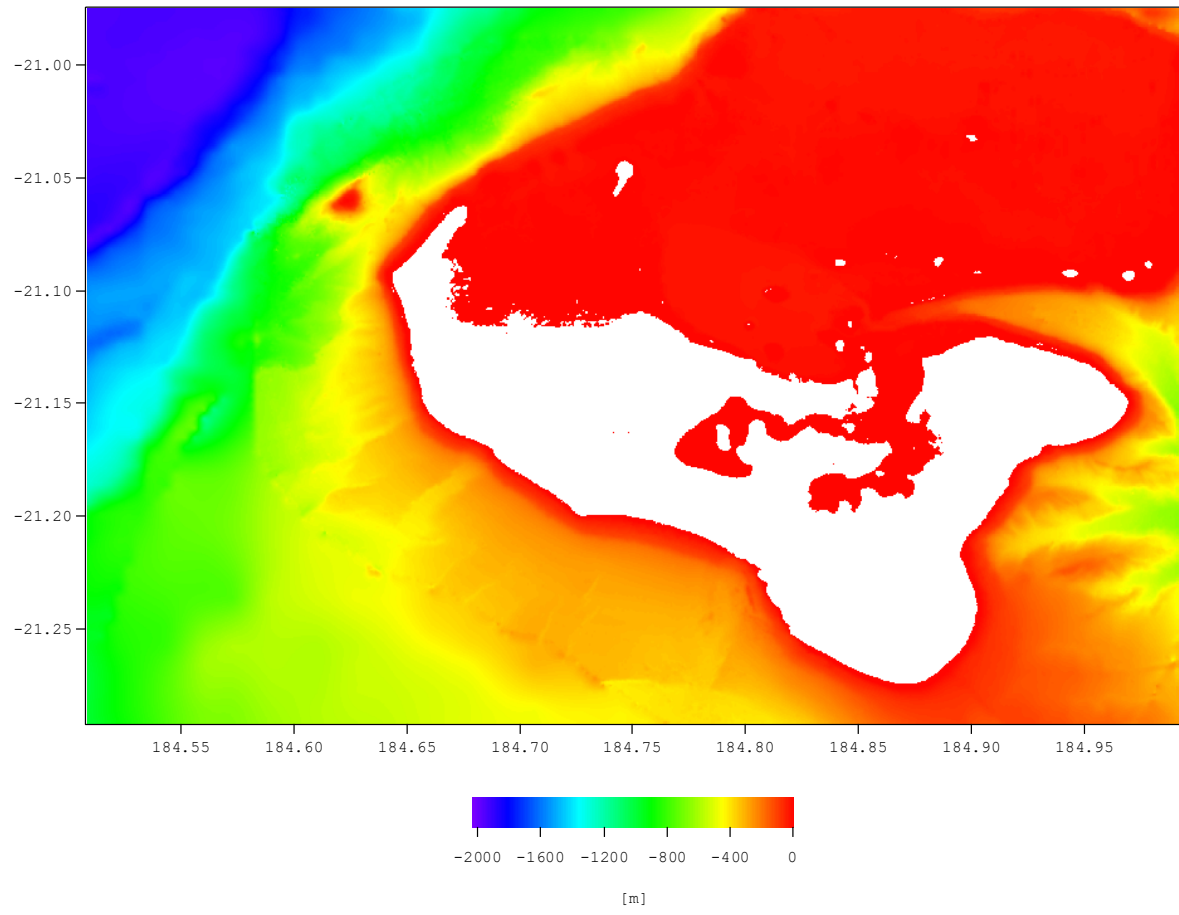
Domain 2



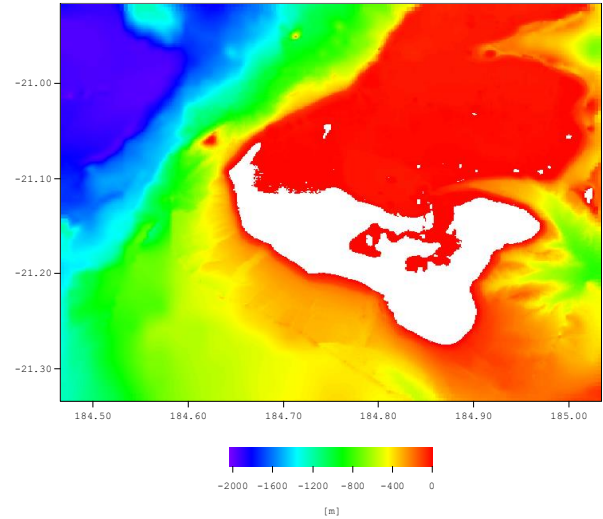
	Size Width x Height	Grid size [m]
Domain 1	960 x 1200	450
Domain 2	680 x 500	90
Domain 3	1740 x 1140	30

Topography

Domain 2

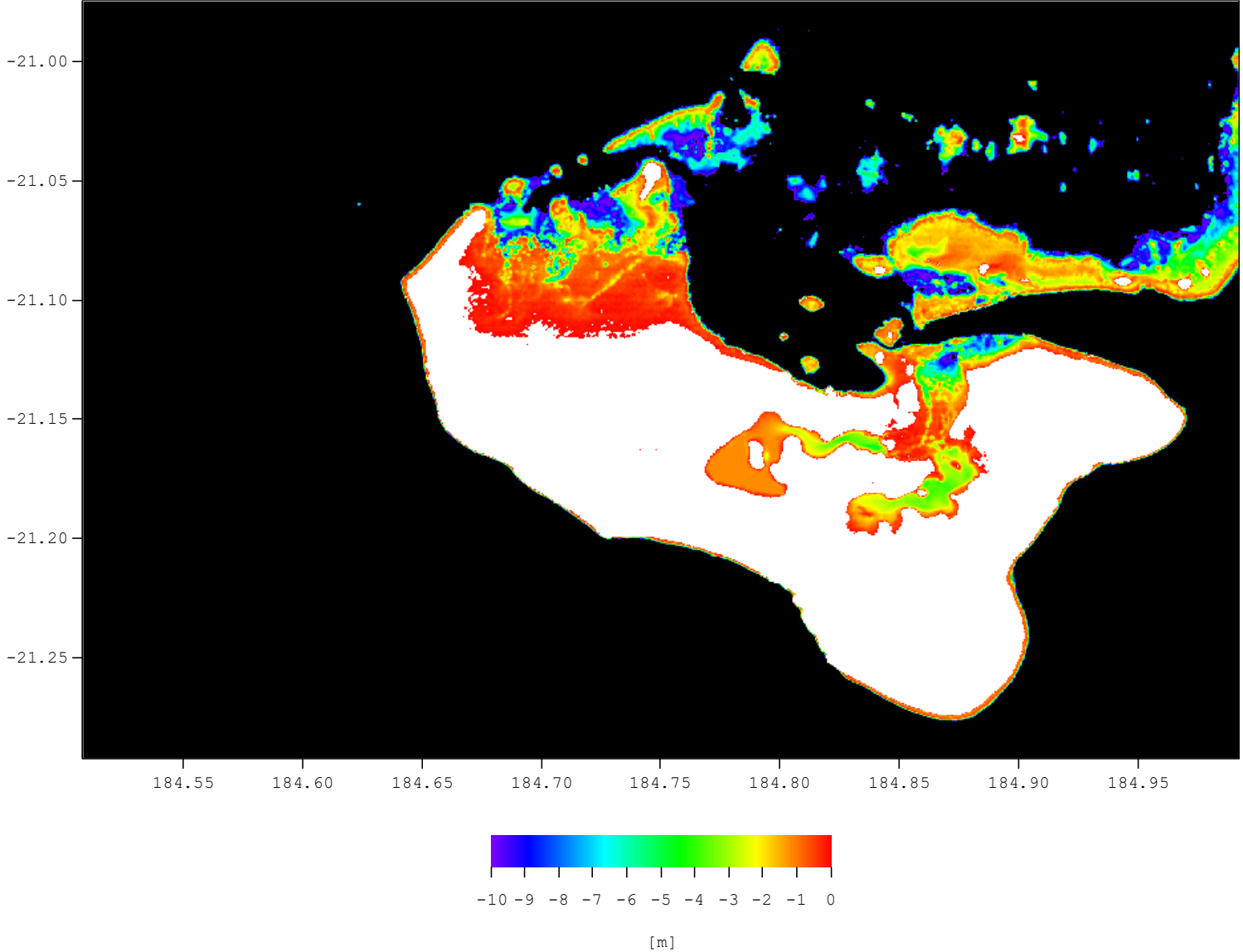


Domain 3



Topography

Domain 3

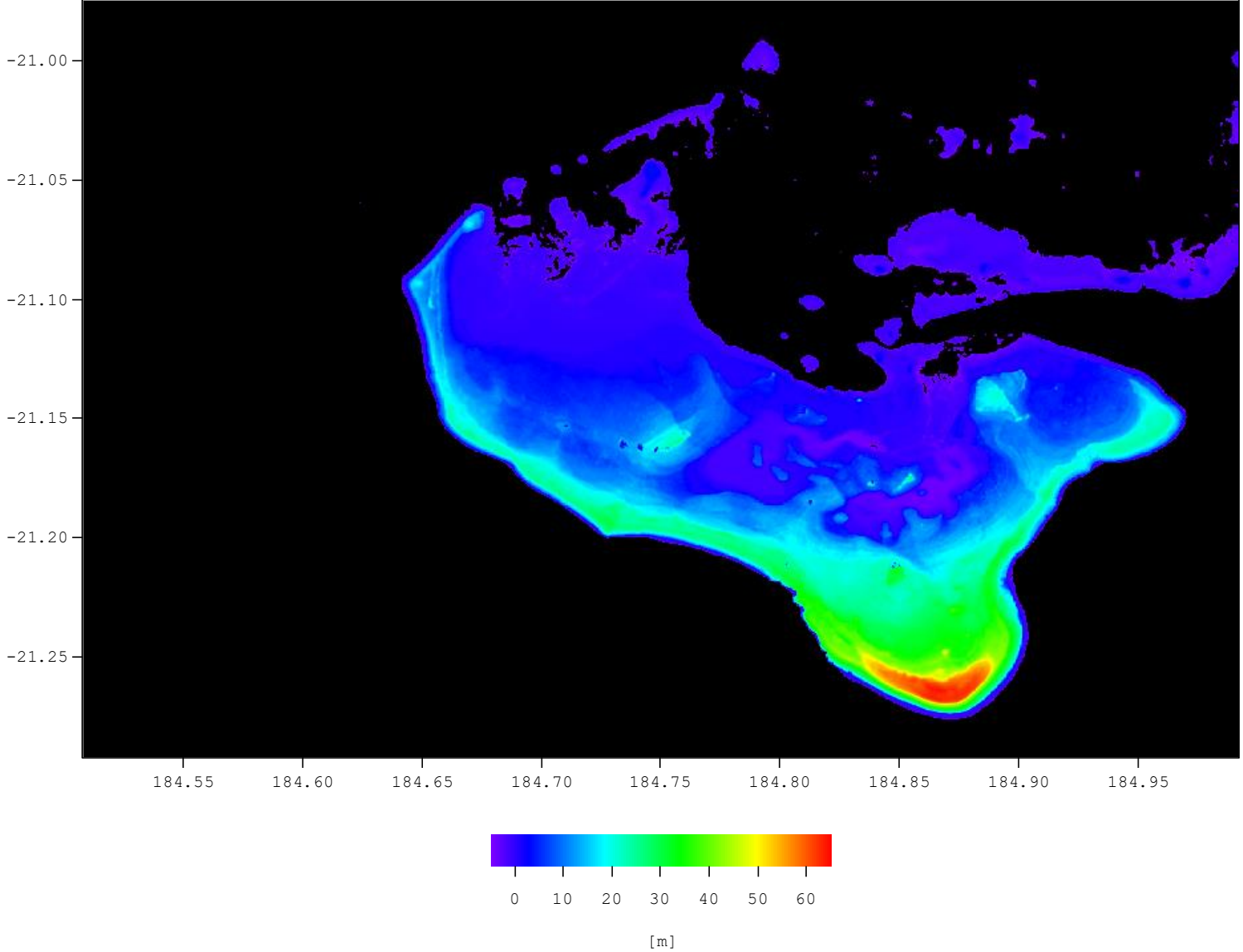




2022年8月13日 撮影

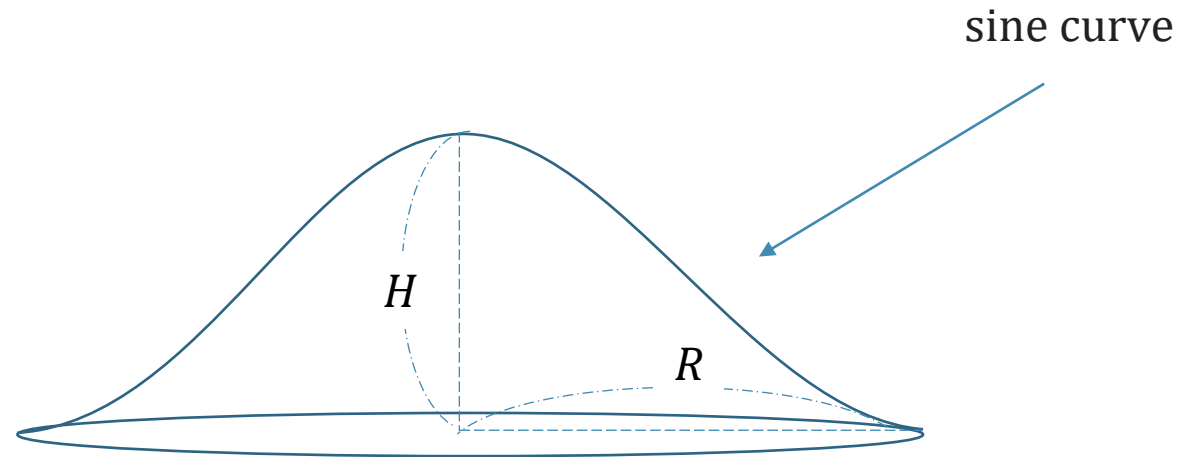
Topography

Domain 3



Calculation conditions

- Sea-level rise



R : distance from the burst center [m]

H : Maximum rise [m]

$$R = 5000\text{m}, H = 45\text{m}$$

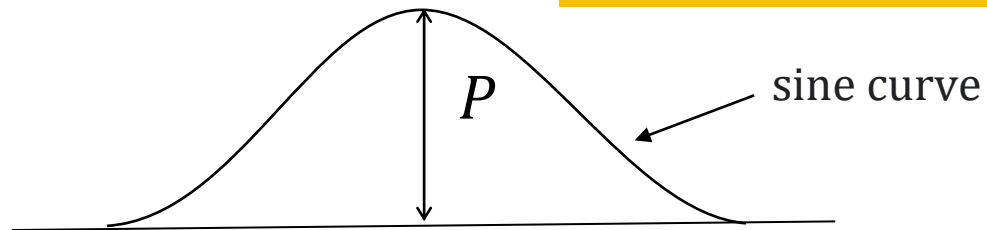
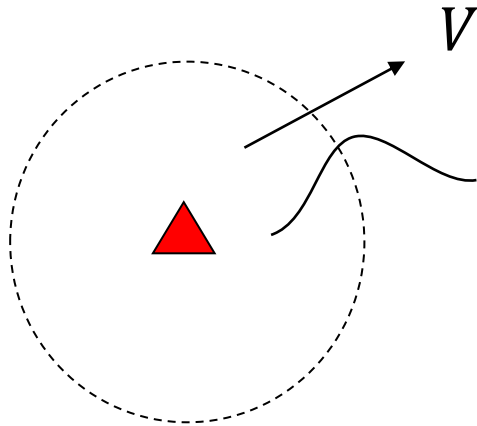
Calculation conditions

- Atmospheric pressure fluctuations

$$L = \begin{cases} \frac{L_1 - L_0}{P_1 - P_0} (\Delta P - P_0) + L_0, & L \leq L_1 \\ L_1, & L > L_1 \end{cases}$$

$$L_0 = 2R \Big|_{\Delta P = P_0}, L_1 = VT$$

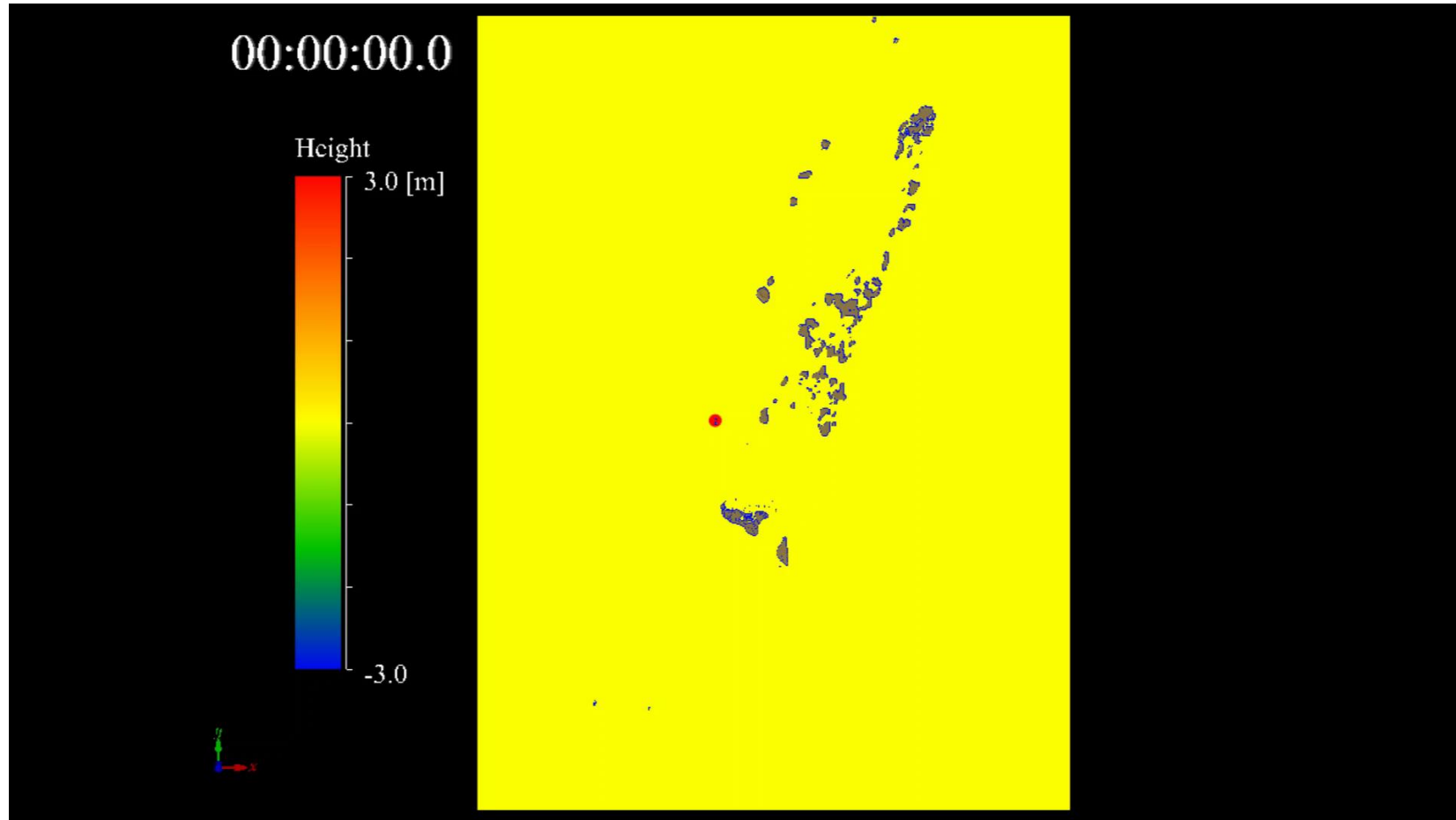
L : wavelength, V : velocity, T : period



$P_0 = 500\text{hPa}, P_1 = 2\text{hPa}$
 $T = 600\text{s}, V = 310\text{m/s}$

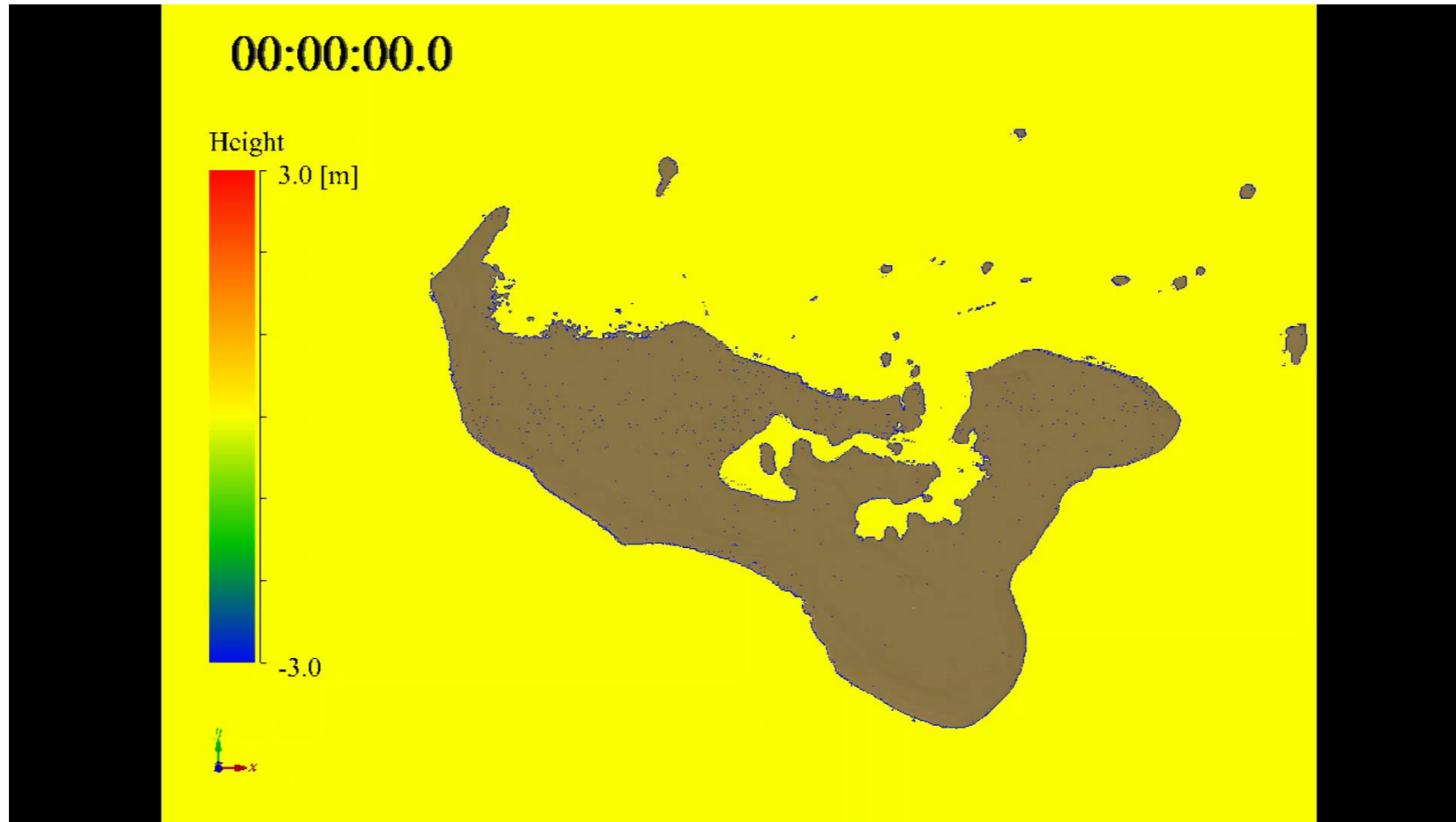
Result

Domain1



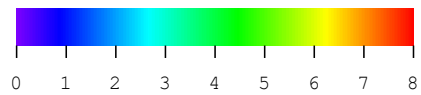
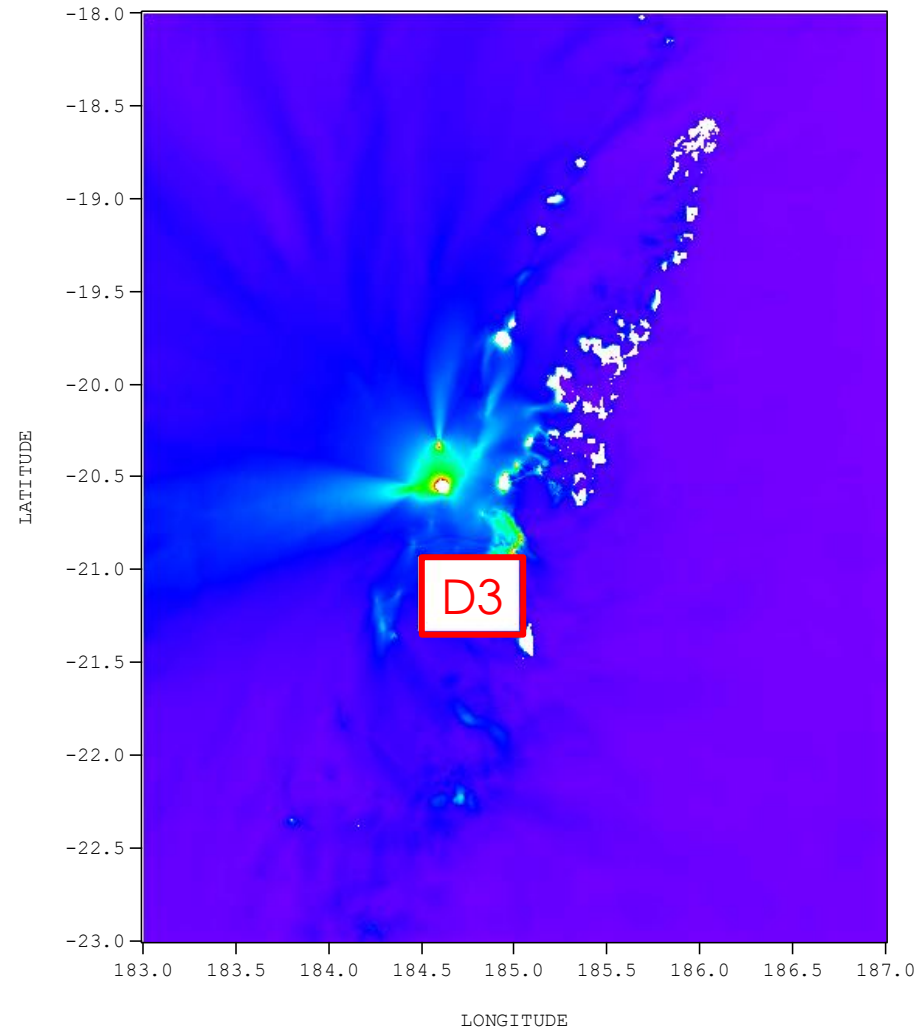
Result

Domain3



Maximum Water Level

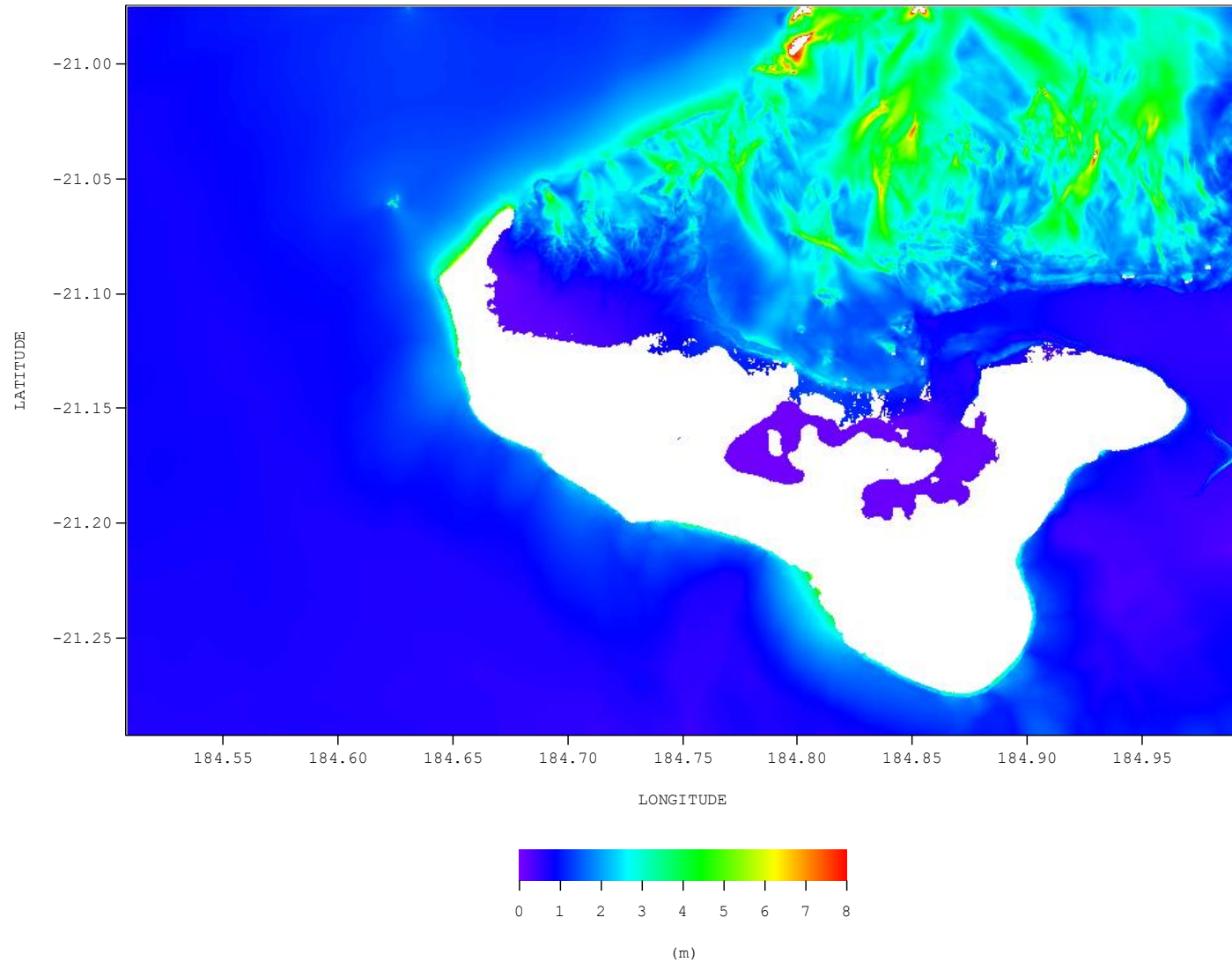
Domain1



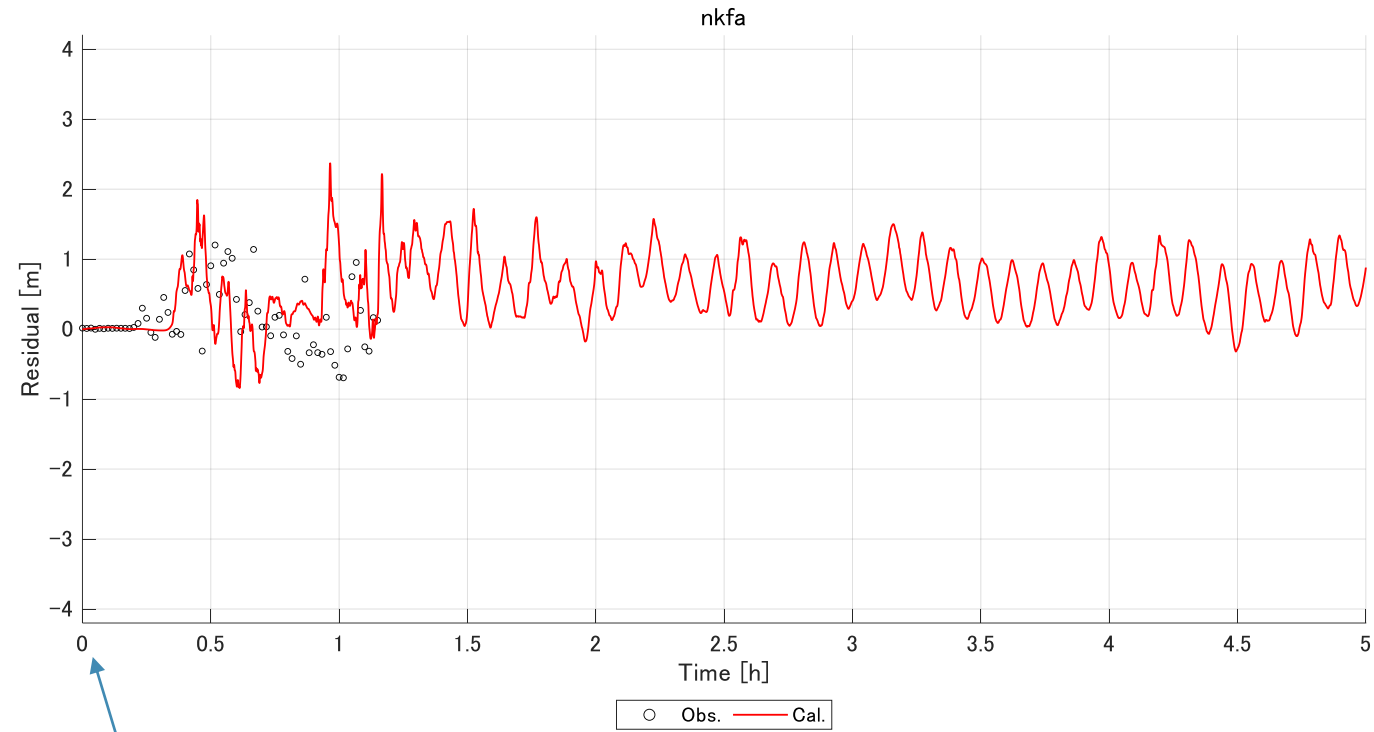
(m)

Maximum Water Level

Domain3



Result



4:15 (UTC) is set as the start time.

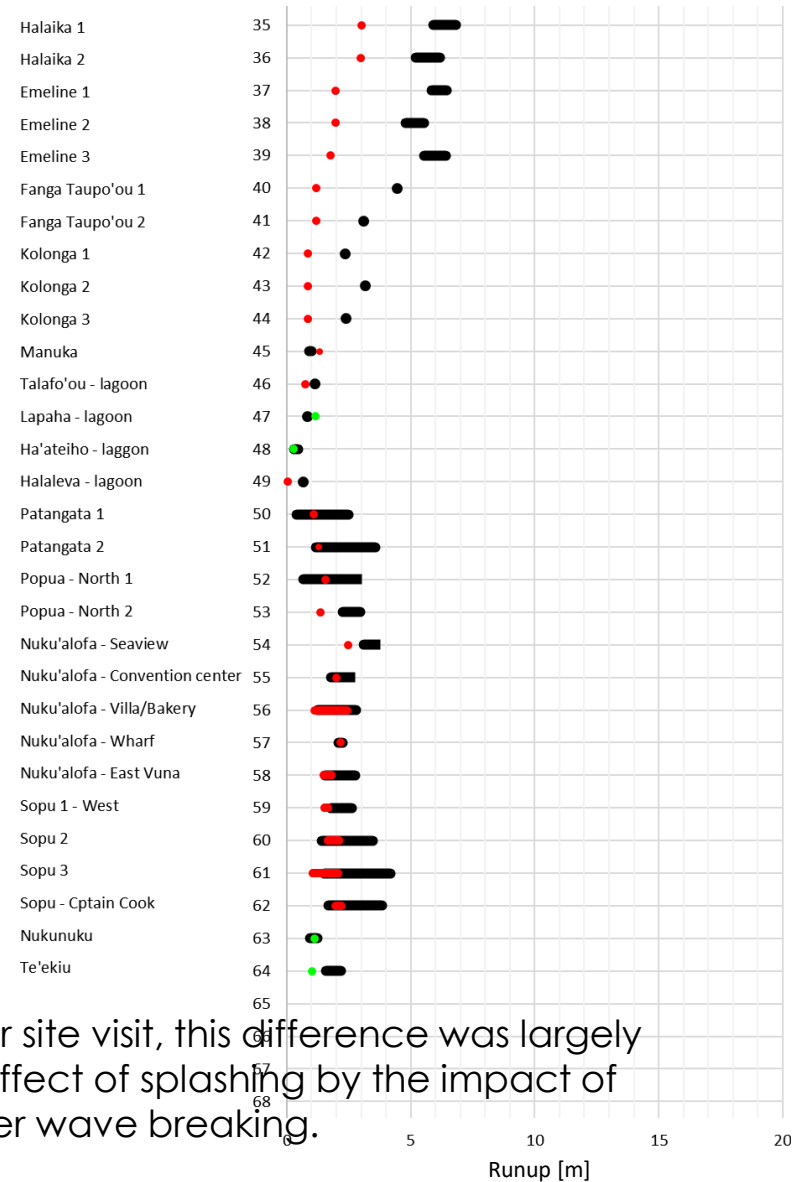
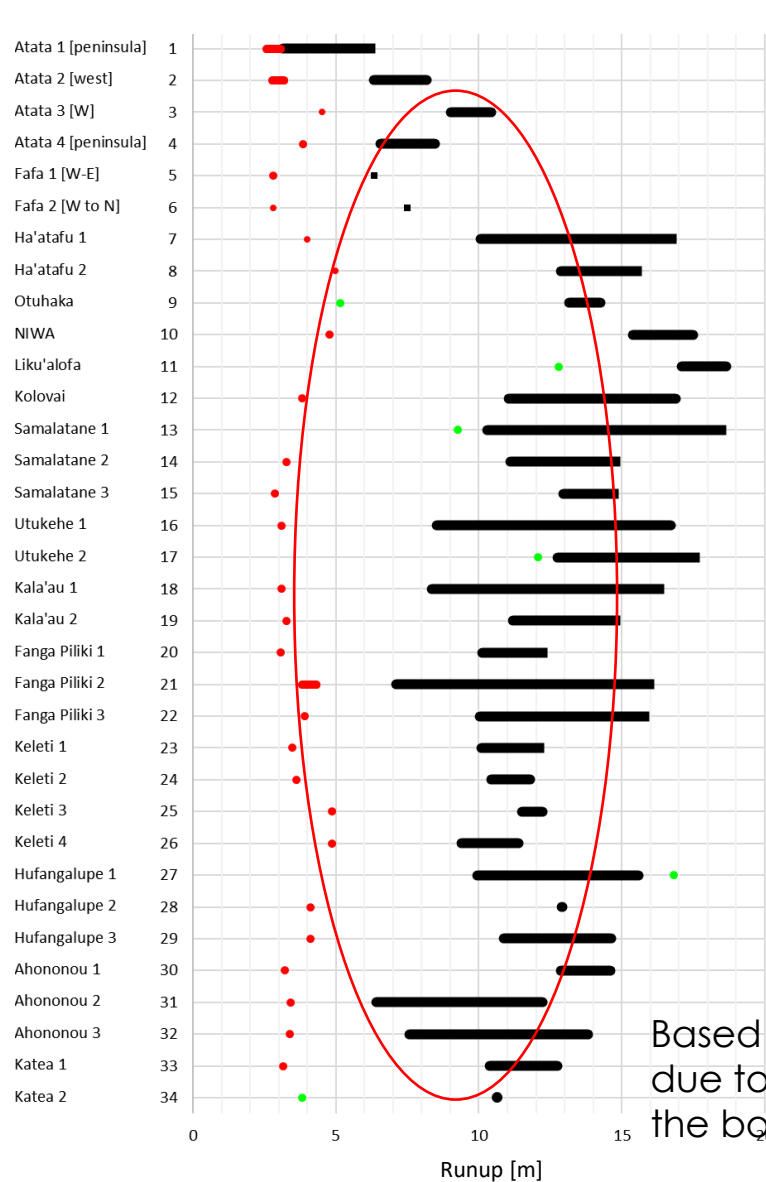
Survey Point from Prof. Cronin



● Surveys

● Calculation

● cell height



Based on our site visit, this difference was largely due to the effect of splashing by the impact of the bore after wave breaking.

Breaking (Kuji fishery port)

2011, Great East Japan Earthquake Tsunami

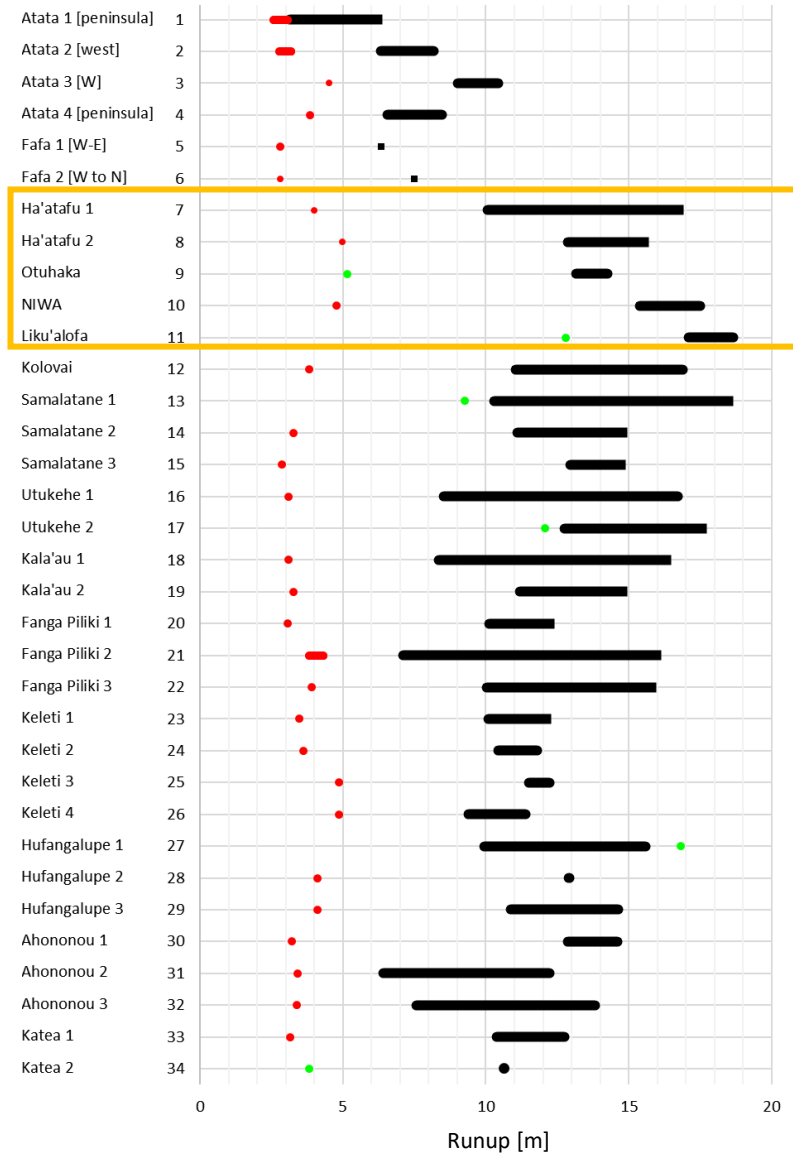


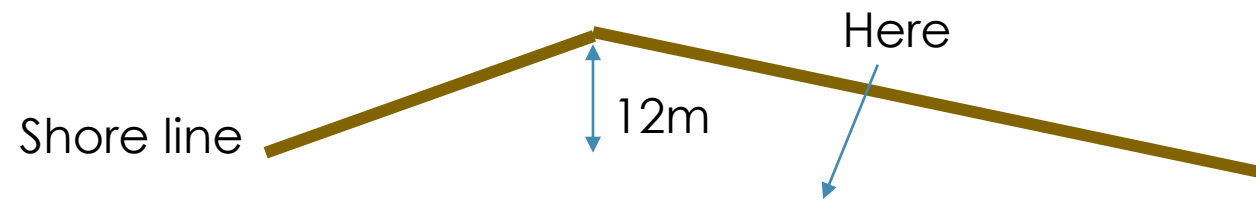
taken by a residence

● Surveys

● Calculation

● cell height

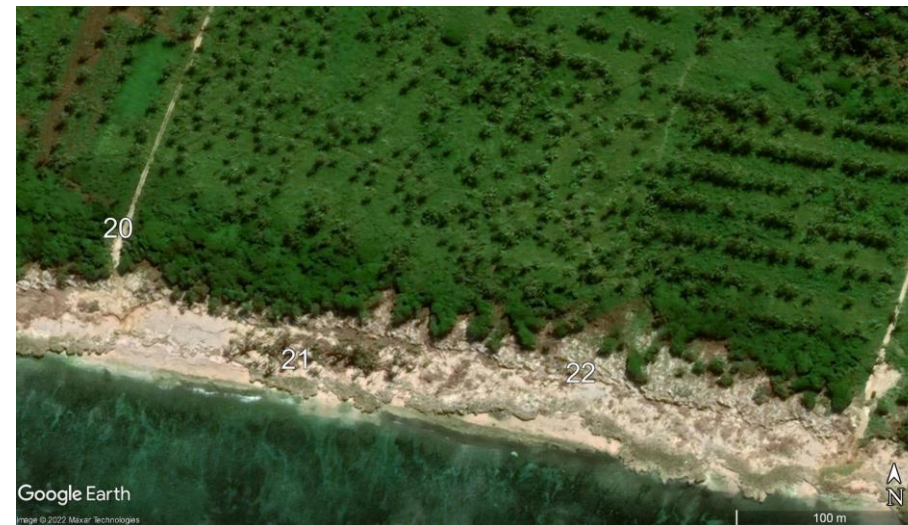
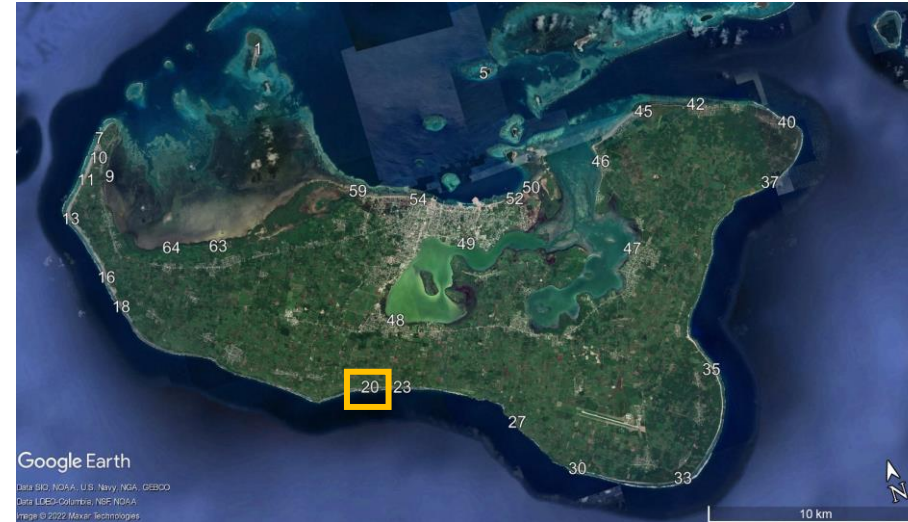
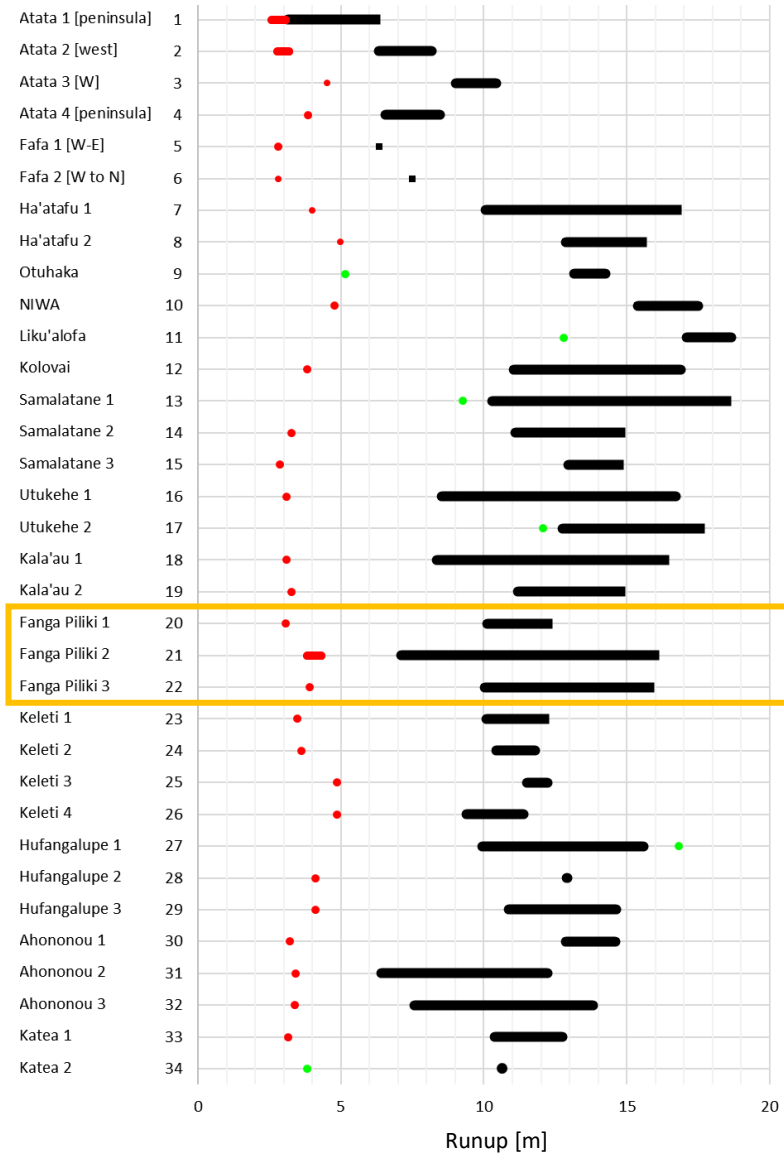




● Surveys

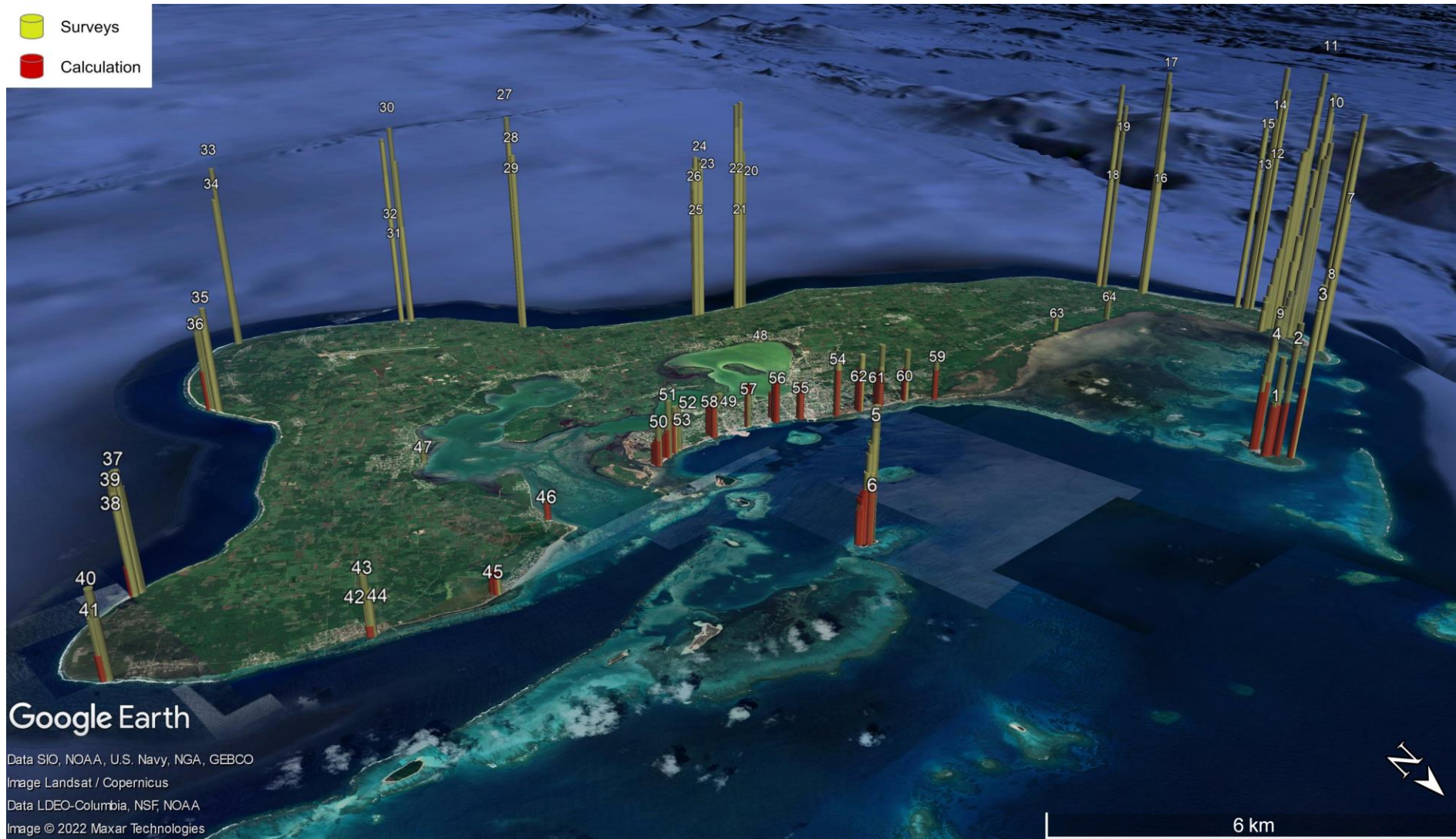
● Calculation

● cell height





$$R = 5\text{km}, H = 45\text{m}$$



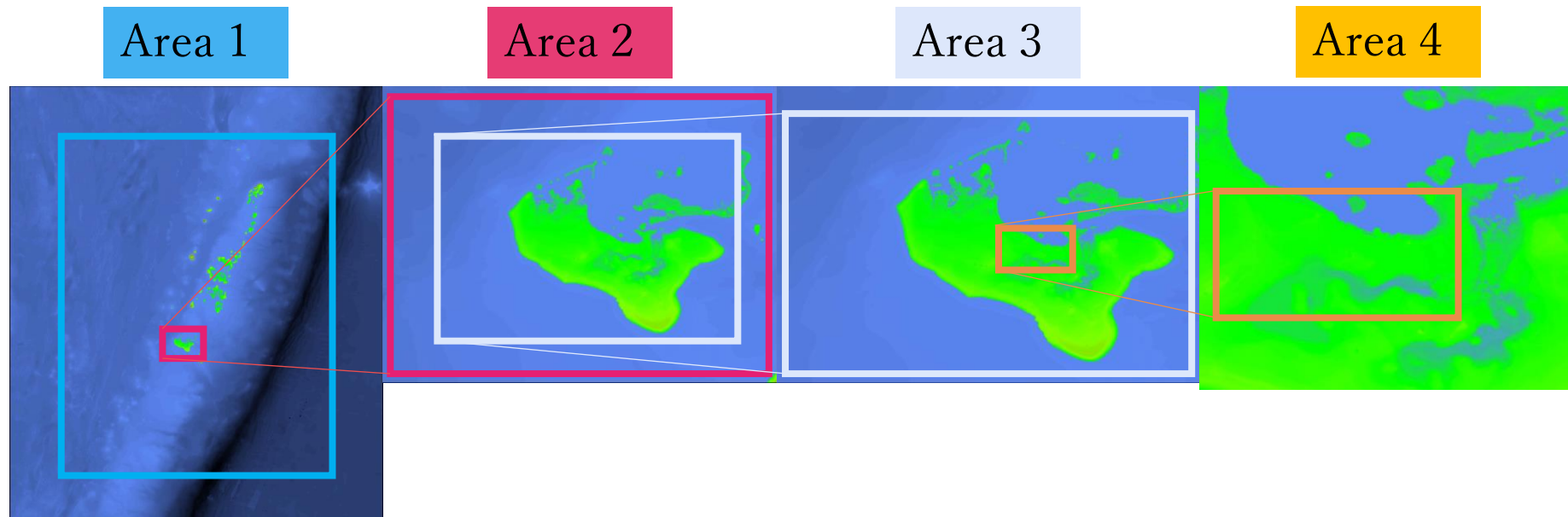
How should tsunami countermeasures be implemented on Tongatapu Island?

Tsunami sensitivity analysis

Calculation Conditions

Area	Size (x × y × z)	Grid size [m]
1	960 × 1200	450
2	680 × 500	90
3	1740 × 1140	30
4	1020 × 510	10

- Calculation Time : 7200s
- DT=AUTO(0.001~0.1s)

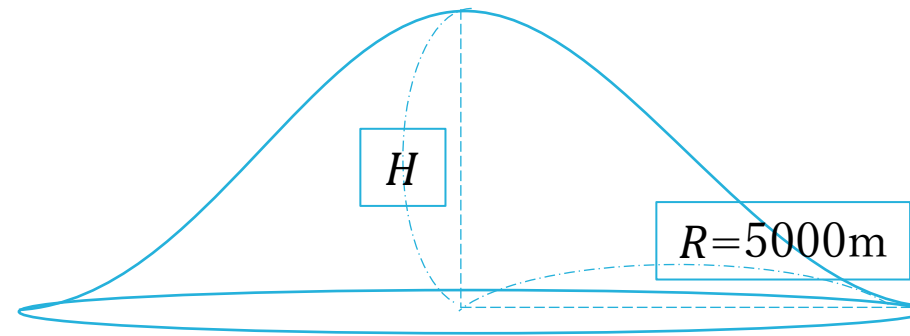


Tsunami sensitivity analysis

Wave Source

In this inundation simulation, the wave source from the eruption is given by sin wave concentricly from the position of the volcano.

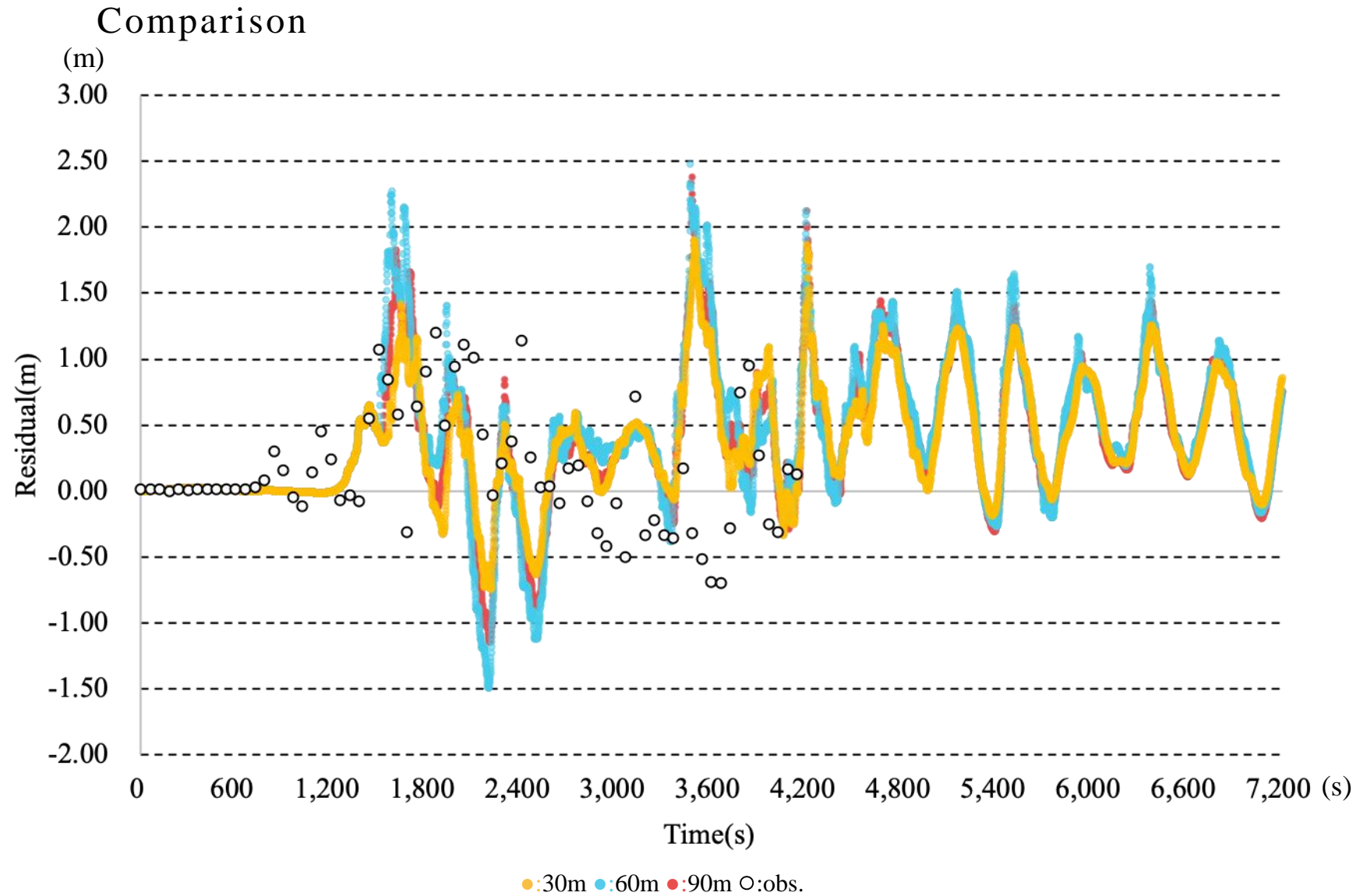
H= ①30m
②60m
③90m



R : distance from the burst center [m]

H : Maximum rise [m]

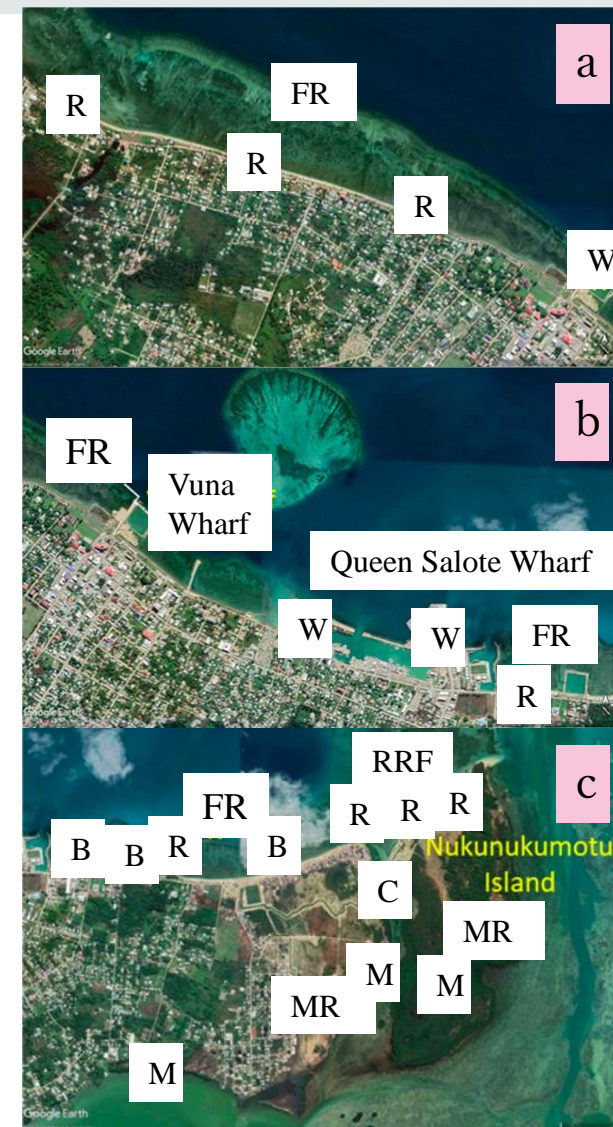
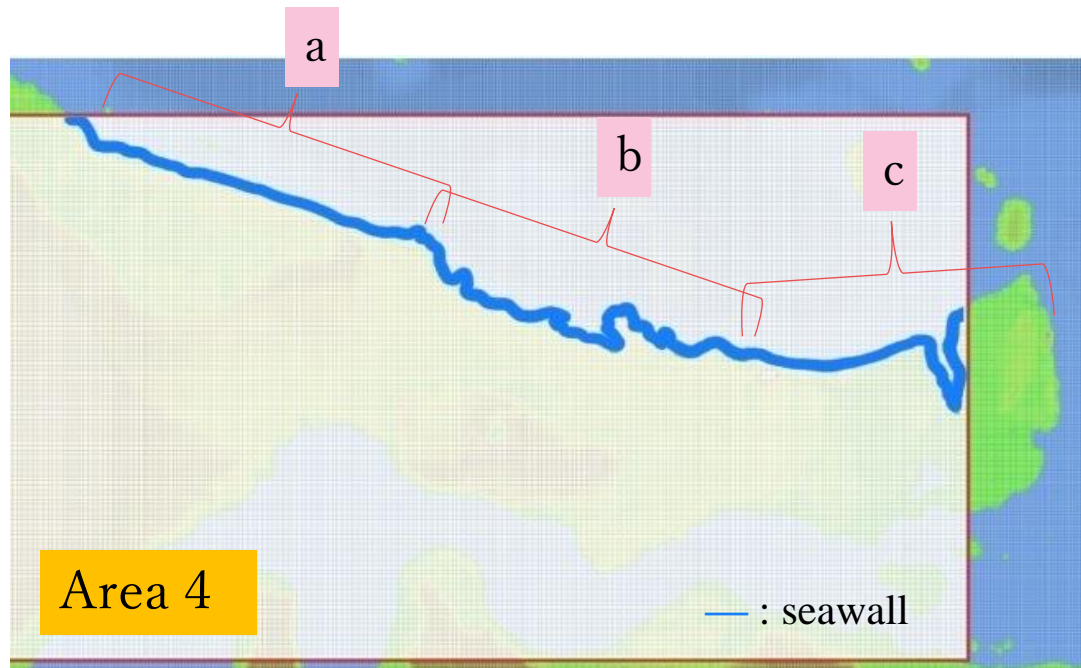
Tsunami sensitivity analysis



Tsunami sensitivity analysis

Seawall

- ① no seawall
- ② current seawall height(2.5m)
- ③ seawall raised by 0.5m(3.0m)
- ④ seawall raised by 1.0m(3.5m)



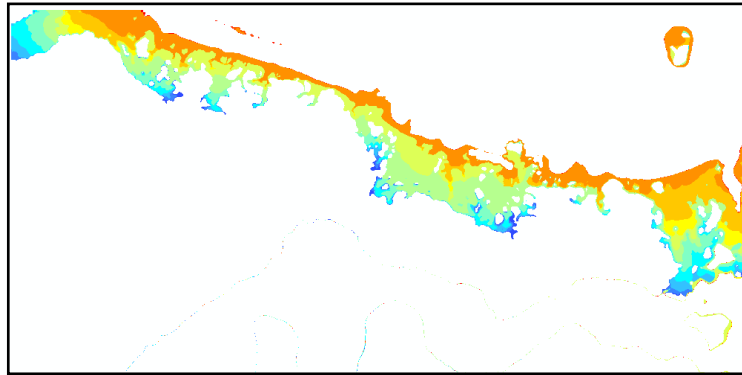
FR=fringing reef, R=revetment, W=Wharf, C=channel,
 MR=mangrove removal, and M= mangroves,
 RRF=rocky reef flats, and B=breakwater

http://ccprojects.gsd.spc.int/wp-content/uploads/2021/03/Coastal-protection-along-the-north-coast-of-Tongatapu-Tonga_-CPS_20_140_Report-1_Rev1.pdf

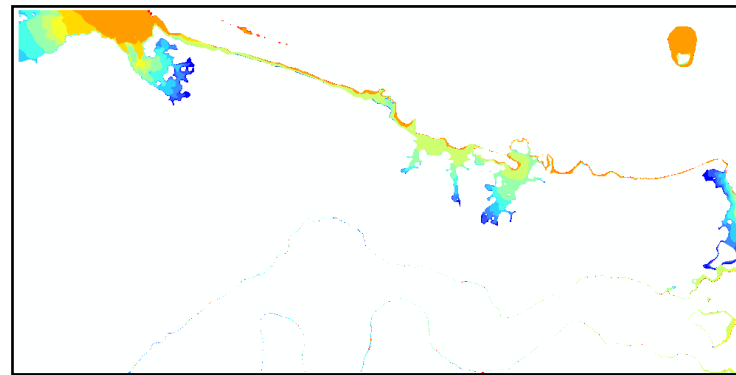
Tsunami sensitivity analysis

Arrival time of the first wave

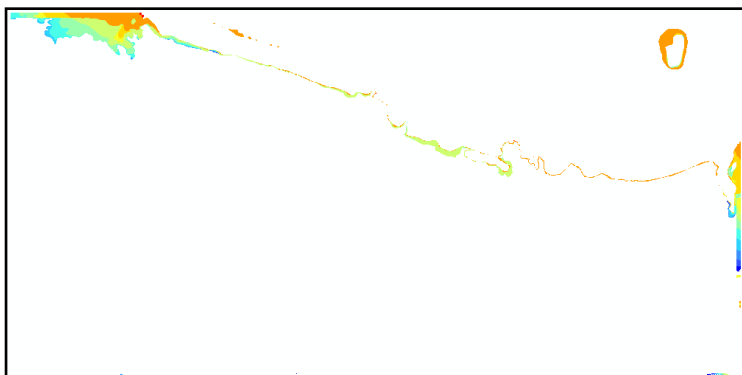
distance from the burst center : 30m



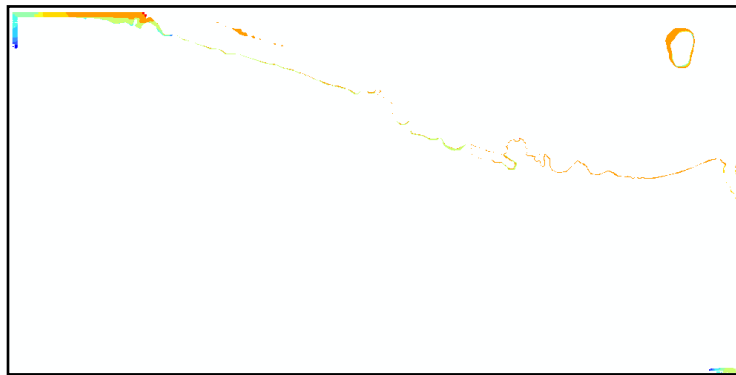
30m_no



30m_current



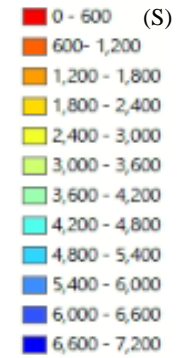
30m_+0.5m



30m_+1.0m

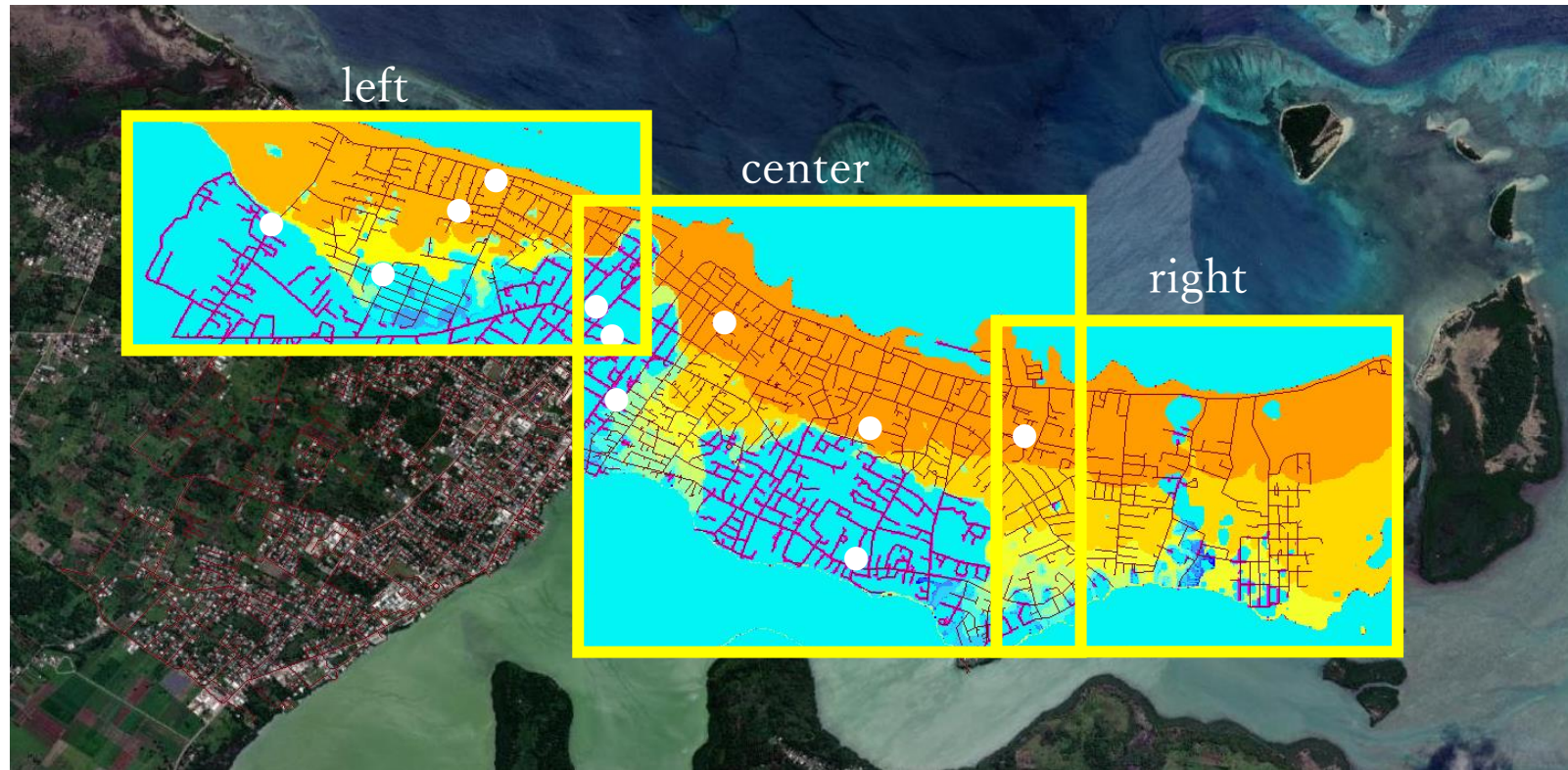
Case name : R_seawall

Ex) R=30m
no seawall } → 30m_no



Evacuation simulations

Multi-agent based evacuation simulation (Arikawa and Oie, 2015)



Grid Interval	10m
Time Step Interval	10.0 s
Calculation Time	7200 s
Evacuation Start Time	0s,1400s,3000s,3300s,3600s,5400s
Evacuation Speed	1.0 m/s (initial velocity)
Number of Evacuees	5000 (random placement)
Tsunami Avoidance	On

Calculation Condition

11 Evacuation shelters :

School : 8/11

City hall : 1/11

Hill : 2/11

Location	left	center	right
Evacuation Center	6 locations	8 locations	1 location
Number of Grid	367 × 162	356 × 324	281 × 238

Discussion

horizontal axis : Evacuation start time(s)

vertical axis : Percentage of affected people(%)

—●— no

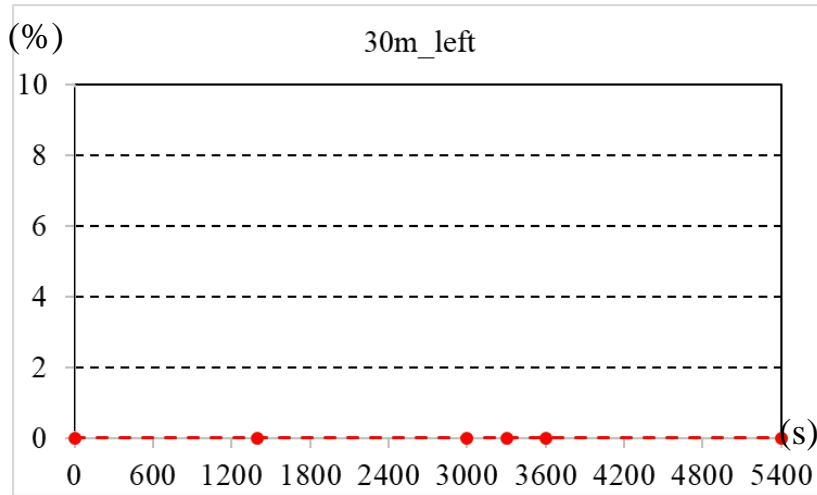
—●— current

—●— +0.5m

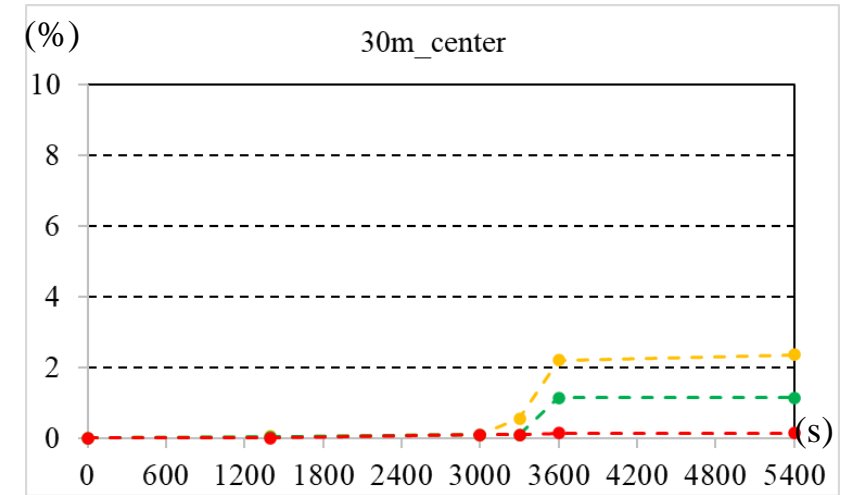
—●— +1.0m

H=30m

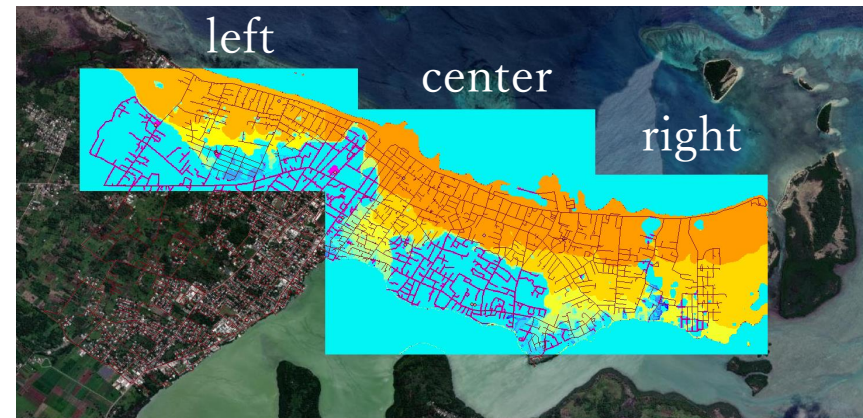
Left



Center



30m_+0.5

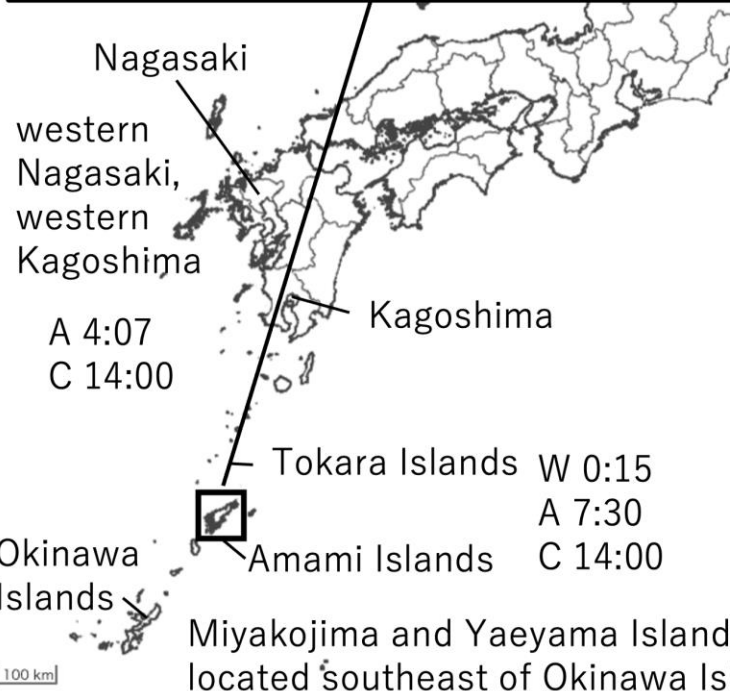
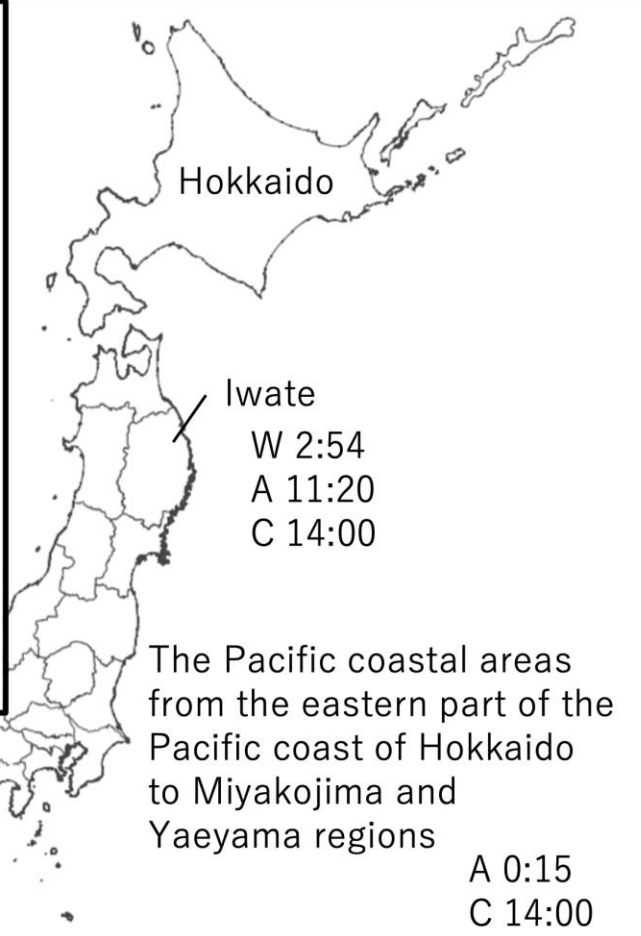


Evacuation Behavior

日本の避難行動は以下を参照

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*, 179(5), 1549-1560.

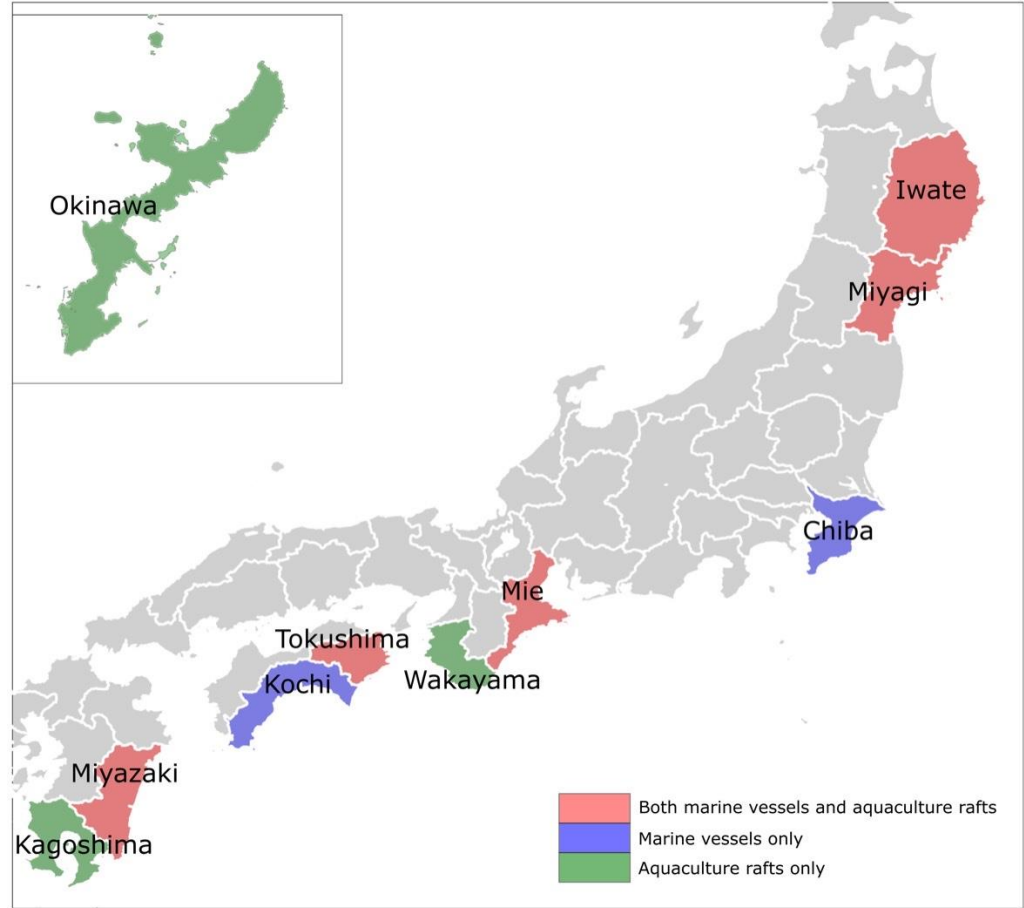
<https://doi.org/10.1007/s00024-022-03058-0>



Legend

W: Issue of tsunami warning
A: Issue of tsunami advisory
C: Cancel
*The number represents the time, which is January 16, 2022, JST

Issue of tsunami warning



Major fishery damage along the coast of Japan

Evacuation behavior in Japan

- Amami Islands

- In terms of the evacuation ratio, approximately 960 out of 1,400 people in Yamato Village evacuated, and most of those in Setouchi Town evacuated, including vertical evacuation to the 2nd and 3rd floors. In Amami City, government staff commented that the line of cars trapped in traffic started at 24:18 JST, 3 minutes after the warning was issued. This is proof that the evacuation started not only because of the evacuation order of the local government but also because of the JMA tsunami warning. We also found that quite a few people returned home after the alarm was cancelled.
- There was a traffic jam that did not move for approximately one hour in Amami City

- Otsuchi Town

- In Otsuchi Town, on the other hand, the evacuation rate was about 4%.

Evacuation behavior in Tongatapu

- Three people died
- From the interview with TGS, Tongans were aware that earthquakes and volcanoes can cause tsunamis, and they evacuated when they saw the signs of nature, rather than relying on alerts.
- In fact, on the west side of the coast, where the restaurant owner saw the sea change, he shouted to the people in the surrounding houses to run, and they evacuated inland.
- There were witnesses on the north side who saw the tsunami and began to evacuate.

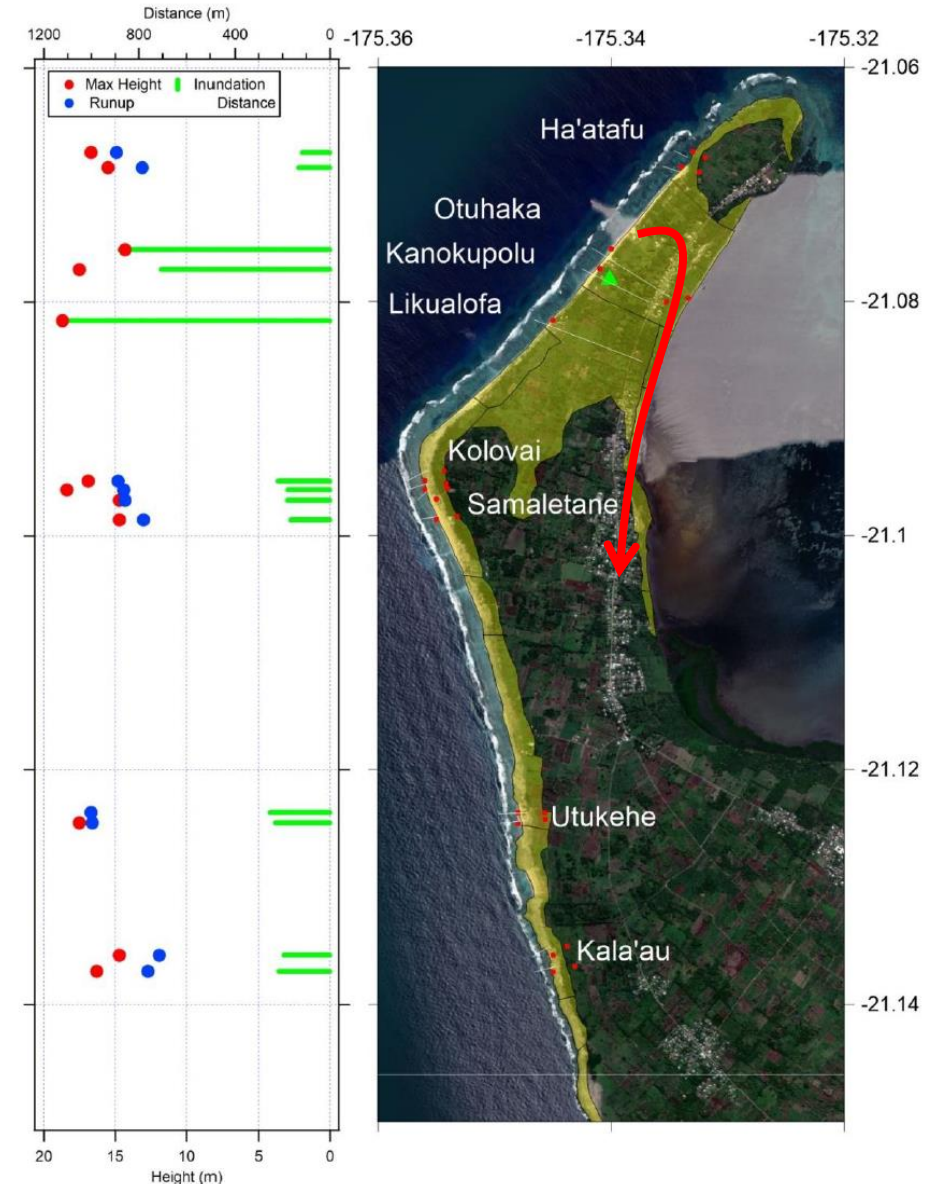
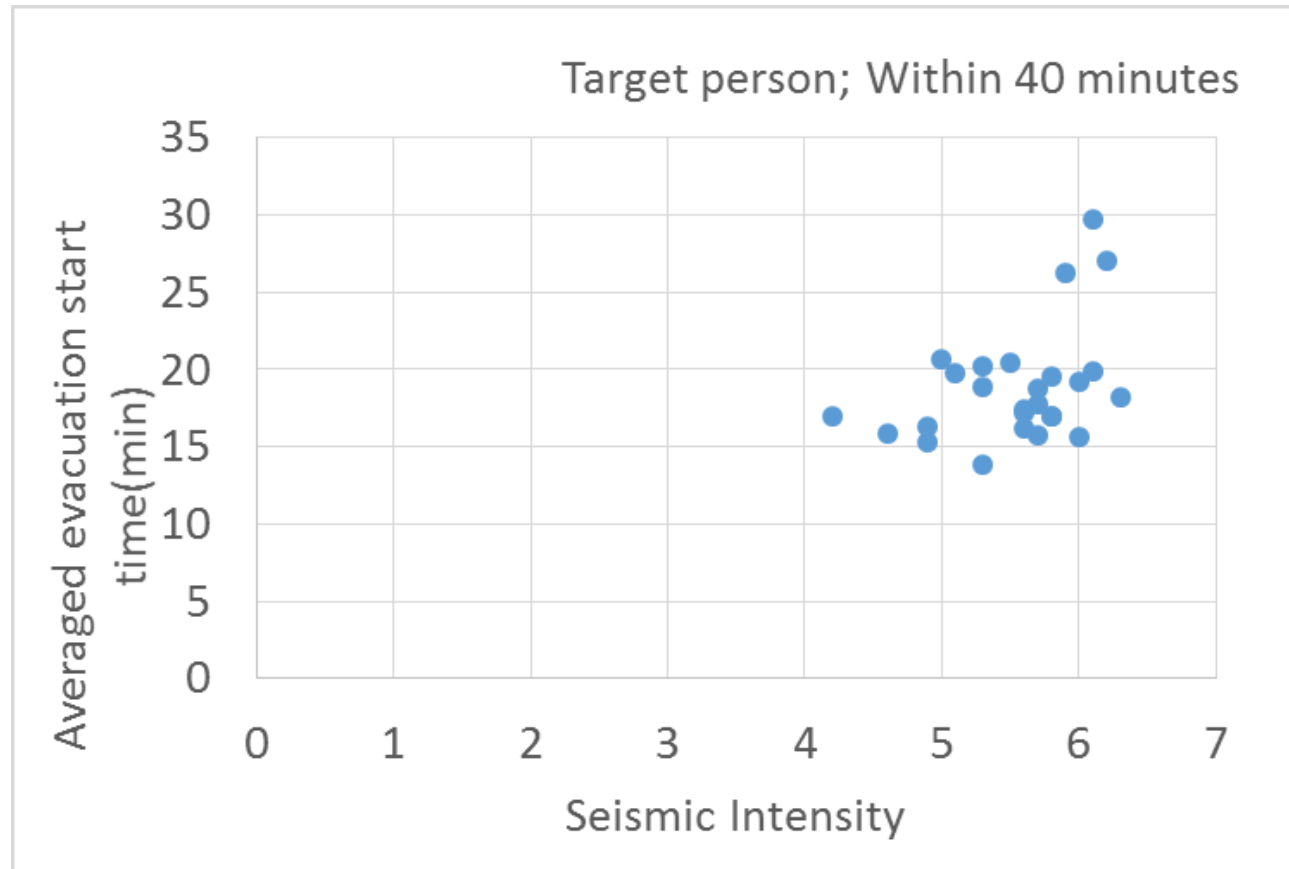


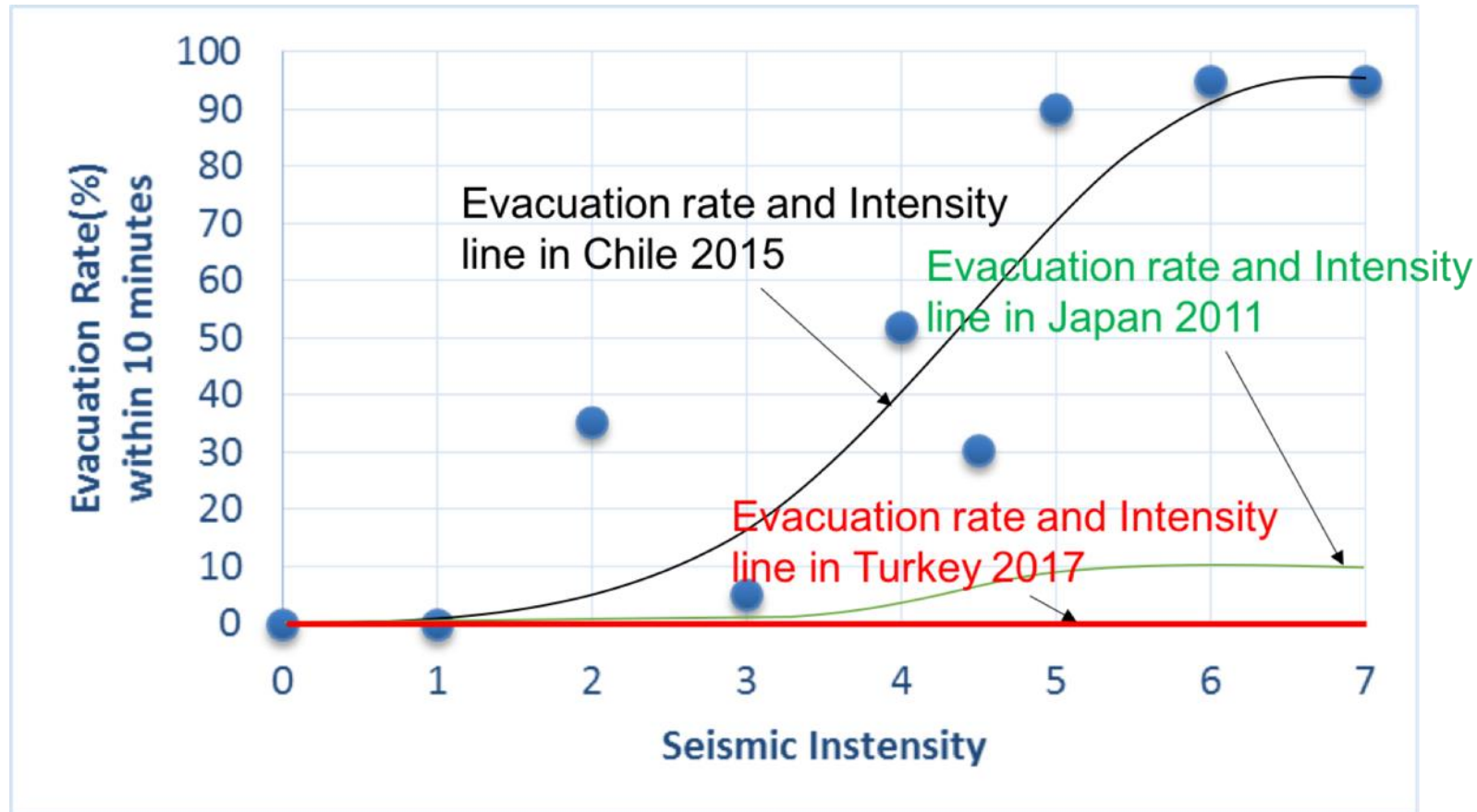
Figure 3.1 Locations surveyed along the western coast of Tongatapu. The start and endpoints of each transect are indicated with the red dot. Green triangle indicates the location of the NIWA weather station. Yellow shaded area indicated extents of inundation. Left plot shows maximum tsunami trace height and maximum runup height along each transect, right plot shows maximum inundation distance.

The relation between the Intensity of the shaking and evacuation rate in the 2011 Tohoku Earthquake



Data :archives for reconstruction support, <http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>

Relation between seismic intensity and evacuation rate within 10 minutes in Turkey, Japan and Chile



Difference between country's preparation for tsunami disaster prevention and response to tsunami evacuation

	Protective facilities	Warning system	Tsunami education
Japan	◎	◎ (within 3 min)	◎
Chile	×	○ (after 2010)	◎
Turkey	×	×	×



Japan ▪ ▪ ▪ Waiting for information and do not depend on alert only. As a result, they **do not evacuate until the limitation of their feeling**

Chile ▪ ▪ ▪ If the earthquake shakes, **they run away quickly** (do not depend on alert)

Turkey ▪ ▪ ▪ They evacuate properly against the earthquake. On the other hand, they do not recall the tsunami even strong earthquakes is occurred. As a result, **after they see the tsunami, they would run away**



Therefore, while it is important to enhance education and warnings, it is clear that **visualization of the tsunami is important** for immediate evacuation.

Case of the eruption tsunami in Tonga, 2022

	Protective facilities	Warning system	Tsunami education	Natural warning sign	Case
Japan	◎	◎ (within 3 min)	◎		2011, 2022(tonga)
Chile	×	○ (after 2010)	◎	Seismic intensity	2015
Turkey	×	×	×		2017
Tonga	×	△(within 10 - 15min)	○	eruption	2022

- Visibility is important to the Tongan people. In other words, it is important to realize fear
- In the case of Japan, the height of the seawalls changed the resulting evacuation situation
- It suggests that "people did not evacuate because they felt safe that the tsunami would not inundate the area." (Height of seawall, Otsuchi 12m, Amami Islands less than 3m)

Conclusions

- トンガの被災の様子を示した。高いところでは20m近く遡上していることがわかる。また、トンガタプ島に來襲した津波の様子を示した。
- 津波のシミュレーション結果から、現状の堤防高さを50cm程度かさ上げすることで、今次津波の被害をおおよそ防ぐことができる。これは火山性津波の波長が比較的短いことにも起因する
- 避難の様子は、日本では奄美大島と大槌町で異なり、奄美大島では、かなり多くの方が警報後即時避難した。一方で大槌町ではほとんど避難しなかった
- トンガにおいては、海の変化の様子を見た人が避難を率先した。火山により津波が生じることは知っていた。
- これらのことから、堤防の高さが安心感を助長しているという可能性が高く、今後のトンガの堤防の在り方や、日本における避難の在り方を議論することが重要であると考えられるものの、

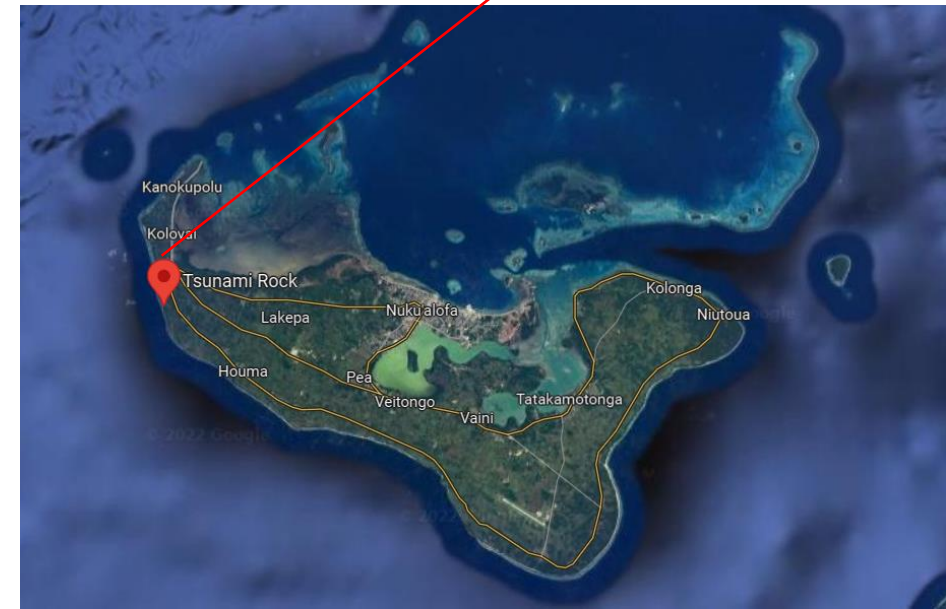
Tsunami Boulder in Tongatapu

Photos



Video

Thank you for your attention



トンガの噴火により四国沿岸で発生した漁船被害等に関する調査

【令和3年度 自然災害研究協議会突発災害調査報告】

田中 健路*・上本 琢人*・村上 太一*・鈴木 悠太*・石丸 克弥*・朝位 孝二**

* 広島工業大学環境学部地球環境学科

** 山口大学大学院創成科学研究科

要 旨

2022年1月15日にトンガで発生した火山噴火により、火山性気象津波と見られる顕著な潮位変化が世界各地で観測された。日本国内では、四国太平洋岸を中心に漁船の転覆・沈没・流失被害が発生した。著者らは、漁船の被害が発生した、高知県・徳島県の各漁港を調査し、被災した漁船の停泊位置や当時の対応状況について情報を収集した。被災した漁船の停泊位置は、漁港の開口部および中央付近で、平常時の槍付け係留されていた漁船のうちの一部であった。10分程度の周期で湾内での海水の出入りにより局所的に渦を伴う早い流れが生じ、係留ロープの破断や船舶の転覆に至ったと見られる。

1. はじめに

2022年1月15日13時15分頃(日本時間)、南太平洋のトンガのフンガ・トンガフンガ・ハアパイ火山で大規模噴火が発生した。この噴火に伴い、ラム波をはじめとする大気波動が全球的に伝播し、日本においても、2hPa前後の気圧変動が観測された。気圧変動と連動するように、日本の太平洋岸では、当初の津波到達予想時刻より3時間前後早く、第1波に対応する潮位変化が見られた(気象庁, 2022)。その後、数時間かけて徐々に波高が増幅し、局所的に1mを超える顕著な潮位変化となった。大気側を伝播する気圧波が強制力として作用することで発生した、津波周期帯を持つ海洋長波と見られることから、今事例における潮位変化は、火山性気象津波(Volcano-Meteorological Tsunami)(Lowe and Lange, 2000)の一種と見られる。日本に到達した火山性気象津波によるものと見られる潮位変化により、高知県・徳島県の太平洋岸を中心に38隻の漁船の転覆・流失等の被害が発生した。

今事例に関する火山噴火過程、大気波動や火山性気象津波の伝播など一連のメカニズムの全容解明に向けた調査研究が行われ、様々な知見が取得されつつある(佐竹ら, 2022)。著者らは、漁船の当時の停泊位置や被害状況を把握することを目的とし、今

事例における被害発生後の2022年1月末に四国沿岸を対象として初動調査を行い、以後2回追加で現地調査を行った。本稿では、現地調査における住民からの証言や調査時に取得された被災した船舶の状況について報告するとともに、四国沿岸での潮位観測状況および漁港内の流動場に関する数値実験を行い、現地調査結果の整合性を検証した。

2. 調査概要

今事例に関して、漁船等の被害が発生して以降、8月末までに3回にわたり、現地調査を行った。今回調査を実施した漁港の位置を図-1に示す。初回の初動調査は、広島工業大学・田中1名のみで行い、1月29-30の2日間の日程で各漁港を訪問し、当時の状況につい



図-1 今回の調査対象地点

てヒヤリング調査を行った。2回目の調査では6月7-8日の期間で行われ、佐喜浜漁港でのヒヤリング調査および室戸市役所における行政側の対応について資料収集を行った。8月23-24日の3回目の調査では、各漁港を訪問し、岸壁の形状や水深測定を行った。

3. 各漁港での状況

3.1 穴喰漁港(徳島県海陽町)

徳島県穴喰漁港の概況を図-2に示す。住民が目撃した情報によれば、15日22:00頃は漁港内では大きな海面の揺れが見られなかったが、23:30頃には潮位変化が大きく、漁港内で渦を巻いていた。漁港の中は大きく揺れたものの、漁港のすぐ北に隣接する穴喰川は漁港で見られる静かであった。押し波と引き波の間隔が10分前後で繰り返され、これまで経験した地震による津波の時の海面の変化とは異なる。16日0:46頃に海陽町で防災無線での注意喚起放送(2回目)があり、1:00過ぎ頃に最大波が到達。引き潮の時間帯と重なったこともあり、開口部付近は橋の上から海底が見えるまで海面が下がり、漁港内の水が茶色く濁った。夜が明けても海面の揺れが続いていた。

穴喰漁港では、湾奥で漁船が2隻沈没し、1隻の船のマストが折れる被害が発生した。穴喰大橋の南東側の岸壁に停泊していた漁船2隻の係留ロープが切



図-2 穴喰漁港の漁船被害の概要



写真-1 穴喰漁港で漂流した漁船の損傷状況

れ、流失。1隻は近隣の砂浜で発見されたが、もう1隻が漁港から約3km北東側の乳の崎まで漂流した。1月末の調査において、解体前の漁船が1隻引き揚げられて静置されていた(写真-1)。

3.2 甲浦漁港(高知県東洋町)

甲浦漁港では、1隻の漁船転覆被害が確認されている。被災した漁船の停泊位置を図-3に示す。2又に分かれる分岐点付近の岸壁に槍付け係留されていた漁船が転覆し、対岸側付近に漂流している様子が翌朝上空を飛行したNHKの取材ヘリ(NHK, 2022)によって確認されている。当時目撃した漁協関係者によると、1月15日20時過ぎから少しずつ海面が揺れ始め、16日0:00過ぎると揺れが大きくなったと証言している。転覆した漁船が引き上げられていたが、他の船体などとの衝突や船体と海底面との摩擦による損傷は見られなかった。



図-3 甲浦漁港での被害概要

3.3 佐喜浜漁港(高知県室戸市)

佐喜浜漁港では、1カ所の漁港では最多となる8隻の漁船被害が発生した。漁港内の漁船の概況を図-4に、室戸市の対応と漁民の証言を時系列として整理した内容を表-1に示す。高知県沿岸に津波注意報が発表される前から、湾内の海面昇降と海水の流動に伴い、船のぶつかる音がしはじめ、津波注意報が



図-4 佐喜浜漁港の被害概況

表-1 佐喜浜漁港に関連する当時の状況

日時	気象庁の情報・市の対応・漁民証言
1/15 13:15	・噴火発生
19:03	・太平洋沿岸に津波予報（若干の海面変動）を発表
1/16 0:00	・漁港付近の住民が船のぶつかる音を聞いた（漁民証言）
0:15	・津波注意報発表(トンガ沖海底火山噴火の影響による)
0:20	・漁船が流される、転覆する光景を見る。（漁民証言）動画を撮影
0:30頃	・自動製氷庫付近に停泊していた19t級の漁船の係留ロープが破断し漂流しかける。（漁民証言）
0:55	・佐喜浜住民から佐喜浜漁港で船が流されていると消防へ連絡あり。
1:10	・佐喜浜住民より、佐喜浜漁港の船が流され、沈んでいるものもあると通報。
2:10	・防災対策課職員、佐喜浜港で現地確認。目視で3隻沈没。地元住民の話では他にも沈んでいるとの話だったが確認できないとのこと
3:00	・室戸市長現場確認
4:30	・市長と防災課長協議の結果、7:00より関係課長と協議を行うことを決定
7:00	・市担当者らによる協議：三津・岬・高岡では被害なし、行当より西は調査中。佐喜浜で5隻の転覆・沈没を目視確認。港外への流出もある。 ・防災無線で津波注意報に関する注意喚起放送を実施。
9:00	・市担当者らによる協議：佐喜浜以外での被害が発生していないことを確認。以後、防災対策課2名で対応することを確認。
9:30	・防災無線で津波注意報に関する注意喚起放送を実施。
13:10	・漁協から室戸土木事務所に佐喜浜の行方不明5隻と電話連絡。
13:33	・高知地方气象台より電話。14:00に津波注意報解除予定。
14:00	・津波注意報解除 ・Lアラート入力 無線放送実施 災害配備体制解除

発表された直後の1月16日0:20～0:30頃にかけて、船が漂流し、他の漁船と衝突、転覆する様子が目撃されている。

写真-2、写真-3は現地漁民が撮影した動画からキャプチャしたものである。気象庁が1月15日19時3分に発表した津波予報の段階では、若干の海面変動が発生する可能性であったことから、漁港内では船首を岸壁に向けて係留する槍付け係留がされていた。写真-2では、一番手前の漁船は槍付け係留されたままであるものの、それ以外の3隻は、船首が岸壁側を向いていなかったり、岸壁から離れていたりしており、ロープの破断により漂流している様子が伺える。写真-3は、開口部側に停泊していた2t級の漁船（漁船A）のロープが破断し、押し波と共に漁港奥側へと漂流し、船首が小型の漁船Bの左舷後方に衝突する瞬間である。漁船Bの船体が右側に転倒し始めている様子が伺える。漁港内で転覆・沈没で発見された5隻の漁船は、構内奥の中央付近に集中していた（例えば写真-4）。明け方になり、漁船が1隻沖に漂流し



写真-2 漁港内で漂流する漁船(高知県漁連副会長植元氏提供)

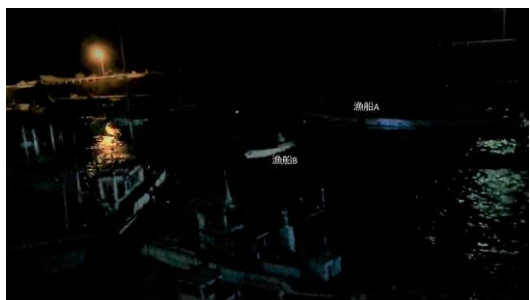


写真-3 漁船Aが漁船Bに衝突する様子(高知県漁連副会長植元氏提供)



写真-4 漁港内の転覆・沈没状況(白矢印の船)、(高知県漁連副会長植元氏提供)

たことが分かり、ドローンで捜索し発見されるなど、計8隻が損傷被害を受けた。

また、自動製氷機付近に停泊していた19t級の漁船2隻の係留ロープが破断したが、状況に気づいた船員が、離岸する前に漁船に乗り込み操舵したことで、漂流を逃れることができた。発見が遅れて操舵不能となったとしたら、より多くの構内に停泊していた漁船と衝突し、被害が拡大した可能性が考えられる。



図-6：小室漁港で被災した船舶の位置（著者撮影）

3.4 宇佐漁港（高知県土佐市）

宇佐漁港では2隻の船舶被害が発生したが、うち1隻はマリナーに停泊中の小型船、もう一隻が漁港の3箇所の船溜まりのうち、中央の船溜まりの開口部付近に停泊していた漁船である。

宇佐漁港は前面に位置する沿岸州の東西両端から導流堤や一文字堤が設置されており、外海からの長波が両側から進入する構造となっている(図-5)-。一文字堤の南側は浦ノ内湾と接続しており、浦ノ内湾の反射波の一部が漁港側に進入しうる。そのため、波の増幅については、他の被害が発生した漁港と比べて複雑な条件を有しているものと見られる。



図-7：



図-5 宇佐漁港周辺の概要

3.5 小室漁港（高知県四万十町）

小室漁港では、4隻の漁船が転覆、うち1隻が港外の砂浜に流失する被害が発生した。停泊位置は図-6に示す通り、開口部寄りの岸壁に槍付け係留により停泊していた。漁港のすぐ北側に河口を有する後川から、興津海岸の砂浜維持のため設置されたと見られる導流堤が南側に伸びている(図-7)。当時の状況を目撃した漁民の話によれば、引き波の際の川からの水が漁港内に回り込んで渦ができたとのことである。渦が引き波時の水の流入によるか押し波の進入によるものかについては、遡上距離、潮汐位相、周期などの影響を受けることが予想されることから、これらのパラメータを条件とした数値実験を行い検証する必要がある。

3.6 佐賀漁港（高知県黒潮町）

佐賀漁港では、伊与木川の河口兩岸の船溜まりでロープ損傷に伴う船内への浸水や転覆により計4隻が被害を受けた(図-8)。兩岸の船溜まりの開口部側で波の進入を直接的に受けやすく流速の大きい位置と見られる。被災した船が停泊した船溜まりの外側にも左右1カ所ずつ船溜まりがあるが、船舶への被害が報告されていない。



図-8 佐賀漁港における被害箇所

3.7 三崎漁港（高知県土佐清水市）

三崎漁港では構内中央部に係留していた漁船4隻が転覆・流失する被害が発生した。構内で転覆した状態で発見されたのが1隻、残り3隻のうち2隻は東隣の砂浜で転覆した状態で発見され、1隻は東隣の湾ま

で流された。漁民の証言によれば、最大波到達時に被災した漁船が停泊していた右岸（西側）の堤防の天端をわずかに超え、堤防から1~2m程度の範囲で数cm程度冠水したとされる。漁港の奥は水深が比較的浅く海面の揺れは奥まで届いていないということであった。三崎漁港は、2011年東北地方太平洋沖地震などにおいて、漁港全体が干上がるまで水が退き、漁船が全部転覆する被害が発生したことがある。

三崎漁港をはじめとする足摺岬より西側の土佐清水市沿岸では、冬季の前線通過などに伴い、全振幅50cm以上の顕著な潮位副振動（気象津波）が観測されることがあり（田中, 2018）、今事例に類似した海面昇降が度々発生している。



図-9 三崎漁港における被害概要

4. 議論

前節で得られた本調査における証言を基にした内容の妥当性について、潮位観測や数値解析結果を加えて述べる。それと共に、現象解明を行う上で求められる点について述べる。

4.1. 潮位観測との整合性

前節で述べた被害状況の全般的な特徴について、潮位観測結果と強制潮位を湾外から与えた湾水振動に関する数値解析の結果と照合しながら述べる。図-10は気象庁験潮所の阿波由岐（徳島県）、室戸岬・土佐清水の毎15秒潮位観測データより、2分~200分のバンドパスフィルターを用いて抽出した潮位偏差成分の時系列である。第1波と見られる潮位変化が1月15日20時40分から20時50分の間に第1波の到達による潮位上昇が観測されており、3地点いずれにおいても1月16日0時から1時の間に最大波高に到達している。連続ウェーブレット解析により、卓越周期の時間変化を解析すると、1月16日0時から3時の時間帯において、阿波由岐で10~16分、室戸岬で8~12分、土佐清水で20~25分の周期帯にピークが見られている。ただし、土佐清水においては、1月16日0時付近に10分前後のピークも現れている。今事例で10分前後の短い周期で押し波引き波が繰り返されたという証言と大きく矛盾していないことが潮位観測結果から示唆される。

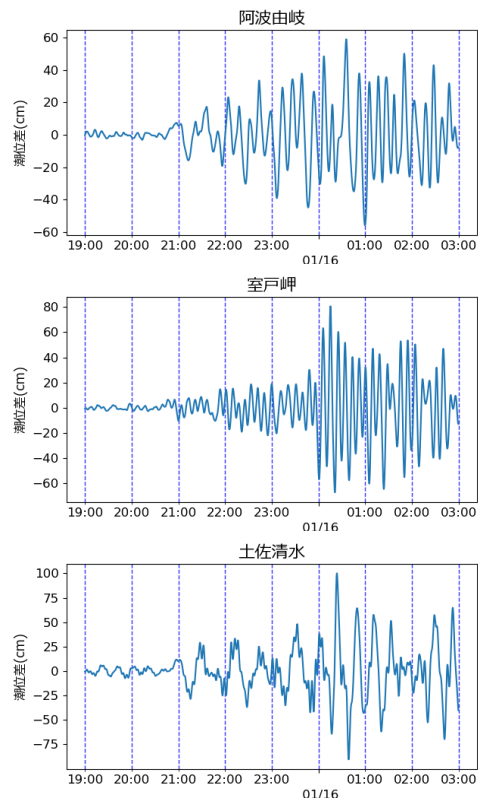


図-10 四国太平洋岸の気象庁験潮所(阿波由岐・室戸岬・土佐清水)で観測された潮位偏差成分

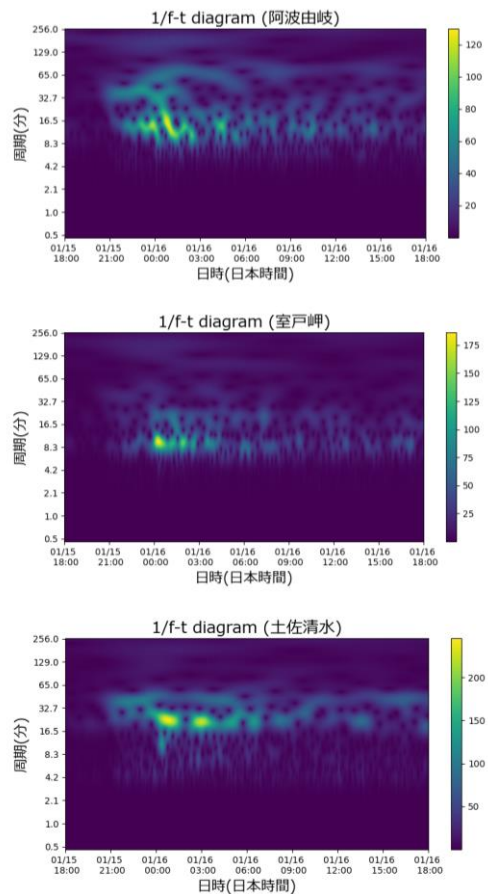


図-11 図-10と同じ験潮所のwaveletスペクトル

4.2 漁港内での渦と流動場

今回の調査で得られた証言の中で、漁港の中で渦ができたことが挙げられる。漁港の開口部で潮位変化を境界条件として強制的に与え、漁港内の渦の形成をはじめとする流動場の構造に関する数値解析を試みた。一定水位の助走期間を1時間分与え、強制潮位の振幅を50cm、周期を10分とし、6周期分(1時間)の計算を行った。今回の数値解析には、流動解析シミュレーターiRICを使用し、ソルバーにはNays2DHを用いた。対象漁港に対し、2mメッシュに格子分割した計算領域を設定した。

室戸市佐喜浜漁港を対象領域とした結果を図-12に示す。図-12の上段に配置した粒子(トレーサー)が、押し波によって奥へと流動する際に、図-4に示している転覆被害が発生した区域や19t級の漁船が停泊していた区域などで渦が形成され、局所的に流速が大きくなる。図-12に見られる渦は漁港の最奥部には到達せず、粒子も初期位置付近で安定して存在する。最奥部では海面昇降が大きくとも、質量保存の法則の関係から水平の流速変化が相対的に小さくなり、係留ロープに加わる張力が弱い。一方、開口部付近や、渦形成域は、水平流速変化が大きく、係留ロープが破断する危険性が高いことが示唆される。張力に関する定量的な知見を得るために、今後更なる解析が求められる。

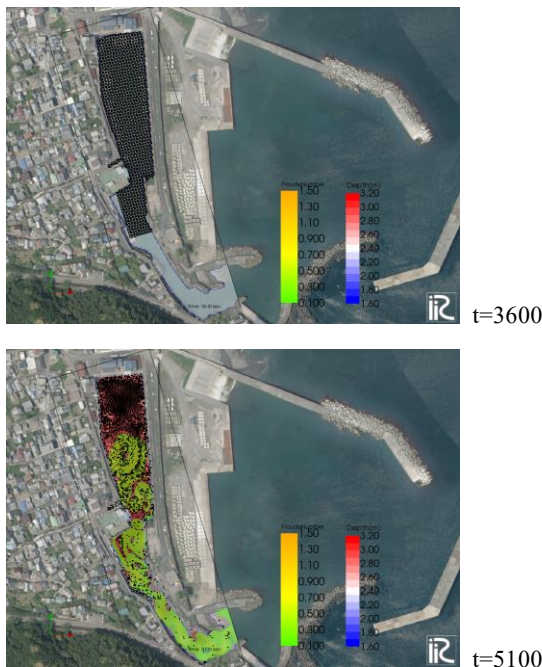


図-12 佐喜浜漁港における流動場の解析例。上段：粒子配置の初期状態 (t=3600)、下段：強制波入射開始から1500秒後(2周期半後)の粒子位置・水位・フルード数の分布。

4.3 岸壁の構造・係留方法と漁船転覆との関係

今回の漁船等の被害に関する他の特徴として、係留方法が挙げられる。1月15日19時3分の気象庁発表の津波情報で若干の海面変動の可能性の発表を受けて、波高の予想が出ないほど微小な波が到達すると解釈し、通常の槍付け係留のままであった。このことが、船体に対してロールやヨーが加わり転覆したり、ローブ破断の一因となったりした可能性が考えられる。台風接近時に高潮・高波対策として、船首を港軸湾口方向に向けて係留する対応がとられる場合がある(写真-5)。遠地津波に関する情報を受けて、数時間のリードタイムの間にこの方法で係留を行うことで、今回の転覆等の被害を低減することが可能と見られる。

漁港内の岸壁では、消波対策のために、上部ブロックを数10cm突き出し、下部に空洞を設ける構造を取り入れている所もある。例えば、佐喜浜漁港では、写真-5のように、岸壁上部は下部に対して30cm突き出している。槍付け係留の場合、潮位が急激に低下すると、船首が岸側に引き寄せられる。船首の一部が下部空洞に潜り込み、そこから潮位が急上昇すると船首が空洞に潜り込んだまま上部ブロックに押しつけられた状態となり、船体バランスが崩れて転覆する可能性があるのではないかと、現地の漁民から指摘があった。実際にそのような現象が起こる可能性があるかどうか不明であり、水槽模型実験等による検証が必要である。



写真-5 台風接近時の漁船係留の様子(高知県漁連副会長植元氏提供)



写真-6 佐喜浜漁港の岸壁上部ブロックの突き出し

5. おわりに

本稿で述べた現地調査で得られた結果についてまとめると以下の通りになる。

(1) 漁港内で転覆・流失等の被害を受けた船舶の係留位置は、流速が大きくなりやすい開口部付近や構内の渦が発達しやすい区域に集中する傾向にある。潮位が最も高くなりやすい最奥部では、水平流速が減衰するため、係留ロープ破断の可能性が相対的に低くなる。

(2) 今回被害が確認された漁港においては、津波予報での若干の海面変動の予想を受け、係留方法を通常時の槍付け係留のままであった。高潮対策と同様、船首を湾軸方向湾口側に向け、漁港最奥部に係留していたら転覆被害を軽減できた可能性がある。今事例のように、予想波高の発表が困難な場合について、1mを超える海面昇降に備えた船舶係留の対応の呼びかけを行うことが求められる。

(3) 漁港内で波が大きくなり、船の衝突音が聞こえるようになった時間帯がおおむね2022年1月16日0時～1時の間であり、四国沿岸の験潮所の観測データから解析される最大波の発生時間帯と一致する。

(4) 漁民の証言の中の10分前後の漁港内の押し波引き波の成分は、験潮所の潮位観測データからも抽出されており、同周期帯の波が少なくとも四国の太平洋側沿岸に様に到達した可能性が示唆される。

(5) 岸壁下部空洞への船首の潜り込みが、転覆の一因となりうるかは不明であり、模型実験等での検証が必要である。

謝 辞

本報告の初動調査において、自然災害研究協議会より支援を受けた。また、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)による支援を受けた。高知県漁協組合連合会・植元茂男副

会長より、当時の状況を撮影した貴重な写真・動画資料を提供いただいた。ヒヤリング調査にあたって、各地区の漁協の方々にご協力いただいた。

参考文献

- 気象庁 (2002) : フンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山の噴火時における気象庁の対応、今後の当面の対応について、気象庁第19回津波予測技術に関する勉強会, 資料2, 5p.
- 気象庁 (2002) : フンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山の噴火で観測された気圧、潮位変化について、気象庁第19回津波予測技術に関する勉強会, 資料3-1, 8p.
- 佐竹健治, 大湊隆雄, 西田究, サッパシー・アナワット, 関谷直也(2022): 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』, 第59回自然災害総合シンポジウム講演論文集, pp.1-10.
- 田中健路 (2018) : 2018年1月上旬に発生した潮位副振動の気象場, 自然災害研究協議会 中国地区部会研究論文集, 第4号, pp.17-20.
- Lowe, D.J., and Lange, W.P., (2000): Volcanometeorological tsunamis, thec. AD 200 Taupo eruption (New Zealand) and the possibility of a global tsunami, the Holocene, 10, pp. 401-407.
- NHK (2022): 高知県徳島県三重県で漁船沈没や転覆相次ぐ, NHK News web, 2022/1/16 18時30分発表 <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20220116/k10013433281000.html> (2022.9.15 確認)

2021年Cyclone Serojaによる東ティモールの豪雨災害について

朝位 孝二*・白水 元**

* 山口大学大学院創成科学研究科

** 東海大学建築都市学部土木工学科

要 旨

2021年4月4日にサイクロン・Serojaが東ティモール襲来し、甚大な氾濫被害、土砂災害が生じた。現地の東ティモール大学スタッフと協力をしてリモート調査を行った。また人工衛星画像を用いて、斜面崩壊位置の把握を行った。本稿ではその結果を示したものである。

ディリ市内の氾濫は主に河川の通水能力の低さに起因するが、とくに橋が通水阻害となっていることが分かってきた。また多くの斜面崩壊が確認された。それらは土砂生産として、河道に残っている。次回のお水ではそれも同時に流れ出し、大きな被害を引き起こす要因となり得る。また河床高の上昇にもつながり通水能力の低下につながる。今後の土砂管理は益々重要となる。

1. はじめに

ティモール島北西のサヴ海で発達した低気圧が2021年4月3日にサイクロンSerojaへと発達した。このサイクロンによりティモール島のインドネシアおよび東ティモールでは河川氾濫、土石流、地すべりなどが発生し、犠牲者も発生した。東ティモールはポルトガルの植民地の後、インドネシアに併合されていたが2002年に独立をはたした若い国である。災害統計資料が充実していないため、過去の災害との比較は難しいが、独立以降では明らかに甚大な災害であった。特に首都であるディリでは多くの氾濫、土砂災害が生じた。

サバナ気候に属する東ティモールでは雨季と乾季があり、これまでも雨季の豪雨による洪水氾濫、土砂災害に見舞われてきたが、サイクロンによる被害は極めてめずらしいものと思われる。発展途上国である東ティモールにおいては、通常であれば被害調査のため海外から多くの調査団が現地を訪れたであろうが、COVID19対策として首都ディリでは都市封鎖が施行されており入国や調査が困難な状況であった。さて、筆頭著者が所属する学科ではJICAプロジェクトを通して東ティモール国立大学工学部土木

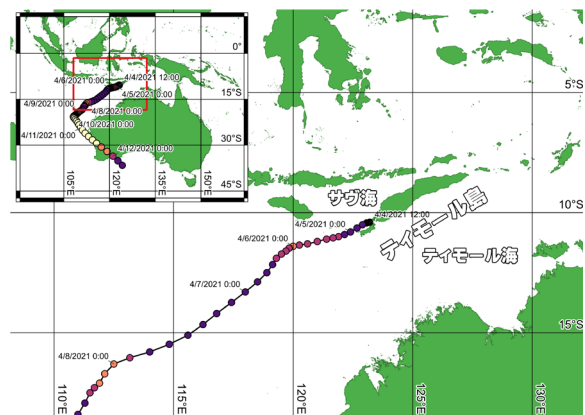


図1 Serojaの軌跡

学科と強いつながりがある。そこで、現地教員による災害調査の支援をオンラインで行い情報を共有した。また著者らは独自に衛星リモートセンシングによる調査も行った。本稿では、これらの活動で得た結果を報告する。

2. サイクロンSeroja

2021年3月29日から4月3日にかけて熱帯低気圧 Tropical Low22U がサヴ海で発達し、ティモール島西岸に滞留し、周辺地域に大量の降雨をもたらした。

表 1 東ティモールの過去災害 (2001 年以降)

	Year	Disaster Type	Disaster Subtype	Origin	Start(d/m/y)	End(d/m/y)	Total Deaths	Injured	Affected
1	2001	Flood	Riverine flood	Heavy rain	20/6/2001	23/6/2001	1		2,508
2	2003	Flood	Riverine flood	Sudden unseasonal rains, monsoonal rain	16/6/2003	20/6/2003	3		600
3	2003	Flood			?/12/2003	?/1/2003			450
4	2005	Epidemic	Viral disease	Dengue haemorrhagic fever	5/1/2005	28/2/2005	22		336
5	2006	Storm			15/1/2006	?/3/2006			8,730
6	2007	Flood		Intense monsoonal activity	?/12/2007	?/1/2008			
7	2007	Flood	Riverine flood	Heavy rains	?/6/2007	?/7/2007	1		947
8	2007	Drought	Drought		?/2/2007	?/3/2007			
9	2014	Epidemic	Viral disease	Dengue	?/1/2014	?/2/2014	2	197	
10	2015	Earthquake	Ground movement		4/11/2015	4/11/2015		3	2,000
11	2016	Drought	Drought	Lack of rain, El Nino	?/4/2016	?/4/2016			120,000
12	2020	Flood	Riverine flood	Heavy rains	13/3/2020	13/3/2020	3	7	9,131
13	2021	Storm	Tropical cyclone	Tropical cyclone 'Seroja-21'	5/4/2021	6/4/2021	41		143,670



図 2 東ティモールの行政区

勢力を強め4日の15時(UTC)の時点でTropical Cyclone 26Sとなり、20時(UTC)にはカテゴリー1の規模に発展してSerojaという名前が与えられた。その後、このサイクロンは西オーストラリア州に向かって南西に移動し、4月6日0時(UTC)時点では、その中心はティモール島の西南西400 km、小スンダ列島のスンバ島の南130 km、西オーストラリア州ダービーの北西730 kmに位置し、最大風速102 km/hの勢力を維持していた。その後、移動速度が増しティモール島近海から離れていく。図1にIBTrACSに基づく¹⁾ 2021年4月4日12:00(UTC)からUTC 2021年4月12日6時(UTC)にかけての3時間毎の位置を示す。

3. 被災状況と降雨状況

3.1 東ティモールの被災状況

表-1は2021年5月7日時点のEM-DAT²⁾に基づく2001年以降の東ティモールで発生した災害をまとめたものである。2002年に独立した東ティモールでは十分な統計データが不足しているため不明な箇所も多いが、表1に従えば今回のサイクロンでは東ティモール全体で少なくとも42人が死亡し、143,670人が被災した。また数値が明らかになっている事例の中では死者数、被災者数ともに今回の災害が最も人数が多いことがわかる。東ティモール独立後最大の災害となった。

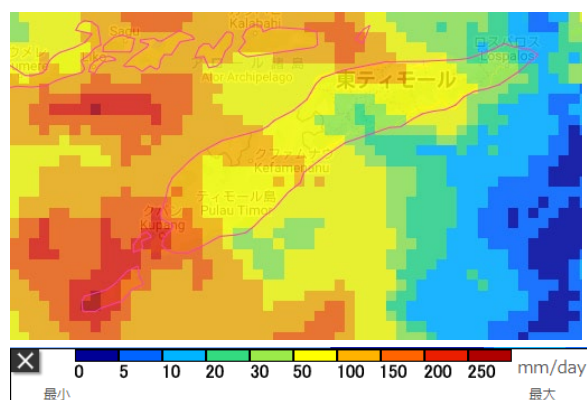


図 3 GSMaP による日降水量

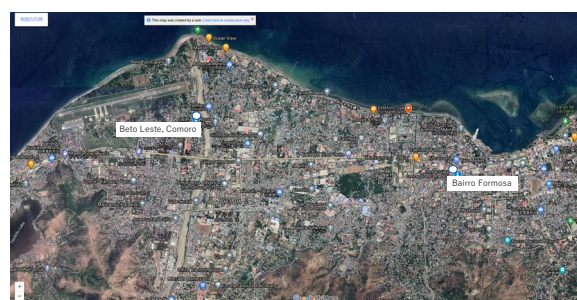
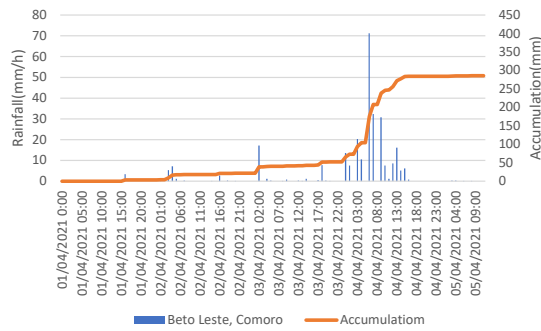


図 4 雨量計の設置場所 (ディリ市内)

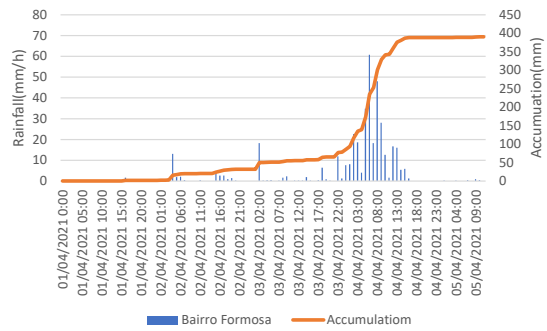
図2に東ティモールの行政区を示す。表1では41名であるが行方不明者を含めて死者42名である。ディリ県で22名、アイレウ県で2名、アイナロ県で10名、マナトゥット県で5名、ピケケ県で3名となっている。多くは土砂災害による被災者であった。

3.2 降雨状況

東ティモールでは十分な降雨観測網が発達していないため、地上雨量計による東ティモール国内での全体的な降雨状況は不可能である。現在、全球降水観測衛星によって観測された降水量がGSMaPでインターネット公開されている。そこで2021年4月3日(UTC)の日雨量分布をGSMaPから入手した³⁾。それ

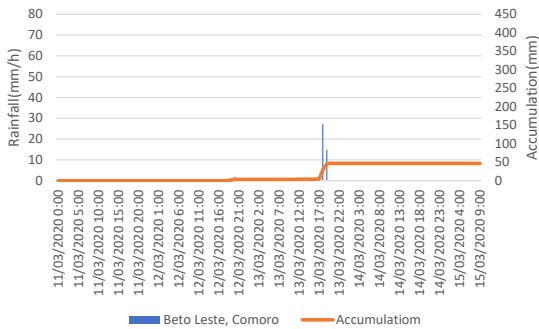


(A) Beto Leste

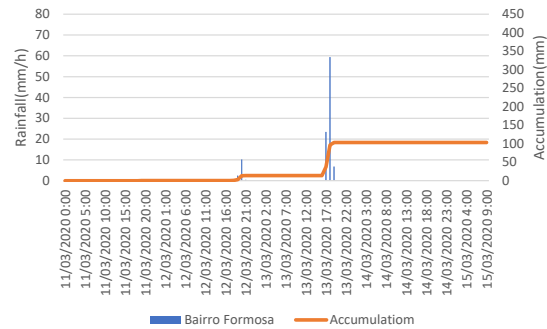


(B) Bairro Formosa

図5 雨量計の設置場所（ディリ市内）



(A) Beto Leste



(B) Bairro Formosa

図6 光学衛星画像による氾濫箇所

を図3に示す。ティモール島の西側で150mmを越える雨量となっている。ディリ県では100mm～150mm程度の降水量となっている。全体的には50～100mmの日雨量となっている。東ティモールの東部のラウテン県では日雨量は少なく20～30mmの範囲となっている。

GSMaPの空間解像度は 0.1° （赤道付近で11km）であるため、大広域の雨量分布の把握には適しているが、狭い局所的な降雨特性の把握には向いていない。幸いにもカウンターパートである東ティモール大学教員がディリ市内に雨量計を2箇所設置していた。その設置場所を図4に示す。Comoro川の左岸側のBeto Lesteと4km程度東に位置するBairro Formosaに雨量計が設置されている。

図5に現地時間（日本時間との時差は無い）で2021年4月1日0:00から2021年4月5日9:00まで（105時間）の時間降雨量を示している。Serojaが接近する前から多少の降雨が、Beto Lesteでは4日0:00頃、Bairro Formosaでは3日22:00頃から雨が降り出している。4日6:00にBeto Lesteで71.2mm/h、Bairro Formosaで60.8mm/hの強い降雨となった。降雨は4日6:00にピークを取りその後減少していく。4日17:00以降は雨が

収まっている。降雨継続時間は17～19時間程度であり、累積雨量はBeto Lesteで285.8mm、Bairro Formosaで390.2mmであった。ピークの降水量はBeto LesteがBairro Formosaよりも大きいですが、Beto Lesteでは降水量が0mm/hとなる時刻がいくつか存在しているため累積雨量はBairro Formosaの方が大きくなっている。なお、本格的な降雨が始まった4日0:00からの累積雨量ではBeto Lesteで232.4mm、Bairro Formosaで309.8mmであった。

ディリでは前年の2020年3月にも雨季による豪雨災害が発生し、市内各地で浸水が発生した。その時に雨量を示したのが図6である。期間的に図5と比較できるように105時間（2021年3月11日0:00～2021年3月15日9:00）の降雨量を示している。表1から分かるように東ティモールの豪雨災害は台風性よりも非台風性（熱帯収束帯に起因する降雨）の豪雨が多い。3月13日18:00が降雨のピークとなり、Beto Lesteで27.4mm/h、Bairro Formosaで59.4mm/hとなった。継続時間は3時間程度であり、この期間の累積雨量はBeto Lesteで46.8mm/h、Bairro Formosaで103.4mm/hであった。今回の台風性豪雨は東ティモールにおいて、多量の降水量をもたらしたことが分かる。

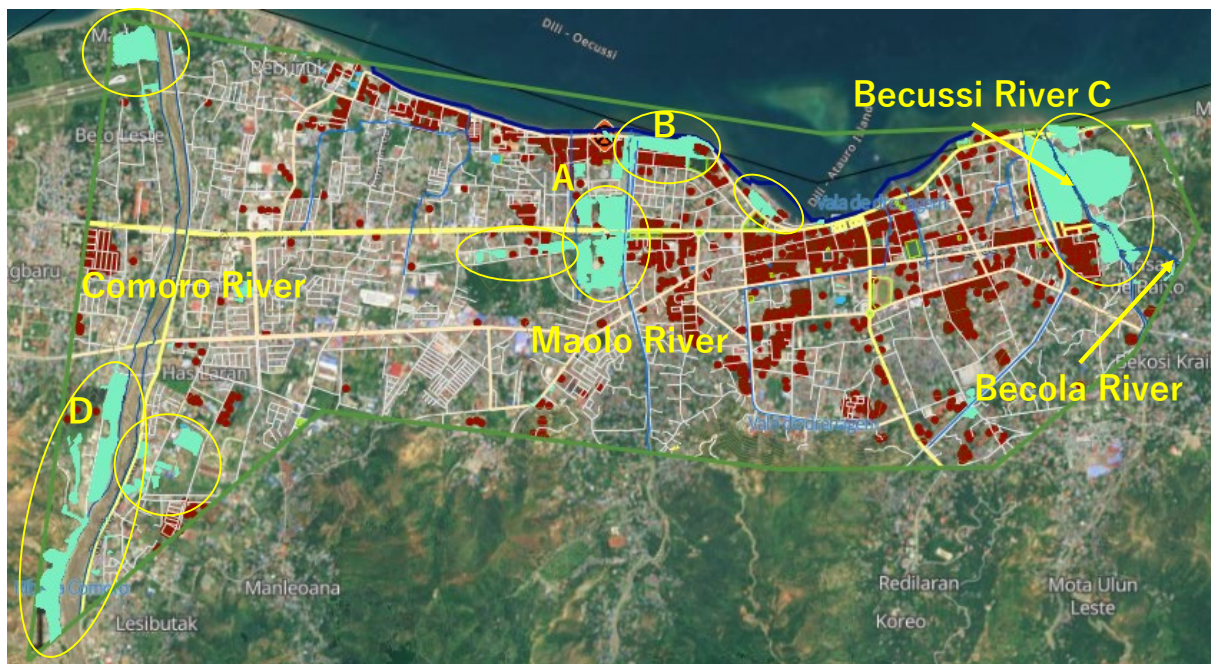


図7 光学衛星画像による氾濫箇所



UNTIL教員による調査箇所

図8 Maolo川周辺の拡大図

4. ディリにおける浸水域と被災状況

4.1 ディリ市内の浸水域

欧州委員会（European Commission）が運営しているコペルニクスプログラムで観測された光学衛星画像の PRODUCTS を公開している。図7にその PRODUCTS を示している。オリジナルの PRODUCTS はカラーであり浸水域が緑色のハッチで塗りつぶしているが、それに著者らが○で囲っている。

撮影時刻はUTCで2021年4月4日15:59（LOC4月5日0:59）である。図7から分かるように光学衛星画像で確認できる氾濫域は河川の近傍であり、外水氾濫で

あることが推測できる。

4.2 Maolo川周辺の氾濫

図8にMaolo川周辺の拡大図を示す。Maolo川の氾濫は図7における氾濫域AとBの原因となっている。Maolo川の左岸側には大統領府があり、河口付近の左岸側に日本大使館がある。図8中のA-、B-、C-pointは東ティモール大学教員が調査した箇所である。A-point近傍の写真を写真1に示す。撮影日は現地時間で2021年4月8日である。以降キャプションの撮影日は現地時間である。また年は省略する。河床と橋桁の間隔は狭いことが確認できる。橋が洪水流の流下



写真1 氾濫域 A の A-point (4月8日撮影)



写真2 大統領府前の通りの状況 (4月7日撮影)

を阻害してバックウォーターが発生し、それに起因して越水が発生し右岸側および左岸側に氾濫していたものと考えられる。

写真2は橋につながる通りに面している大統領府前の写真である。Maolo川からの氾濫水によって運ばれてきた泥が幅広く堆積していることがわかる。

写真1の橋から46m程度上流側にある橋の様子を写真3に示す。トラス状の欄干を持つ長さ13m程度の橋である。流木ゴミが橋上・下流側や欄干に引っかかっており洪水は橋の上を流れて行ったことが示唆される。



写真3 氾濫域 A の B-point (4月8日撮影)



写真4 氾濫域 A の C-point (4月8日撮影)



写真5 日本大使館前の道路陥没 (4月8日撮影)

B-pointにも橋がありA-pointと同様、橋による通水阻害が発生している。紙面の都合上写真は割愛している。図7および図8では氾濫域AのB-point周辺では氾濫域が確認されていない。浸水域は衛星画像での判断結果であるが、実際には別の写真から土砂が周囲の道路に積もっている様子が見取れた。

C-point近傍の様子を写真4に示す。河口の傍の通り

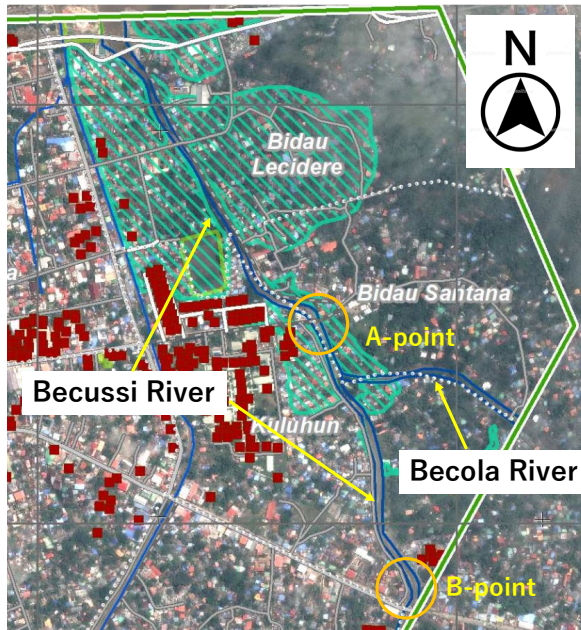


図9 Becussi川と Becola 川周辺の拡大図

に架かっている橋である。この橋も橋桁と河床の高さが低く、通水障害が大きいものと思われる。左岸側の護岸が破壊されており大きな被害が生じた。洪水流は橋を乗り越えて、さらに道路に沿って左右に流れていったものと考えられる。図7に示している氾濫域Bの発生要因と考えられる。

この道路の左岸側方向（西側）には日本大使館があり、大使館前面で大きな道路陥没が発生した。その様子を写真5に示す。道路上に流れ込んだ水流がアスファルト舗装の下の砂利等を洗い流し、その結果陥没が発生したものと考えられる。

4.3 Becussi川周辺の氾濫

図7の氾濫域Cの拡大図を図9に示す。図中のA-point, B-pointは東ティモール大学教員による調査箇所である。この氾濫域はBecussi川と Becola川の合流部から下流側で大きな氾濫が発生していることが分



写真6 氾濫域CのA-point（4月8日撮影）

かる。

A-pointの状況を写真6に示す。欄干が破壊されゴミが引っかかっている。上段の欄干程度まで水位が上昇していたと推測される。また橋脚上部に亀裂が確認できる。床版にかかる流体力などにより発生したものと考えられる。ここには示していないが別の写真から橋や周辺道路には氾濫でもたらされた砂や土砂に覆われていたことが確認できている、二河川の合点から少し下流に位置するため流量が増大し、この橋が通水障害となったものと考えられる。この橋より下流側においても流下能力不足のため氾濫域が広がったものと考えられる。

B-pointにおいても橋が存在しており、欄干が壊れるなどの破損は確認された。しかしながらA-pointと比較するとその被害は小さいため、詳細な報告は割愛する。

4.3 Comoro川周辺の氾濫

図7の西側にあるComoro川周辺の拡大図を図10に示す。Comoro川はディリ市内で最も大きい河川で川幅は80~90m程度である。A-point, B-pointは東ティモール大学教員による調査箇所である。調査地点は氾濫域Dよりも上流側にある。

写真8にA-pointの被災状況を示す。写真8の左側は

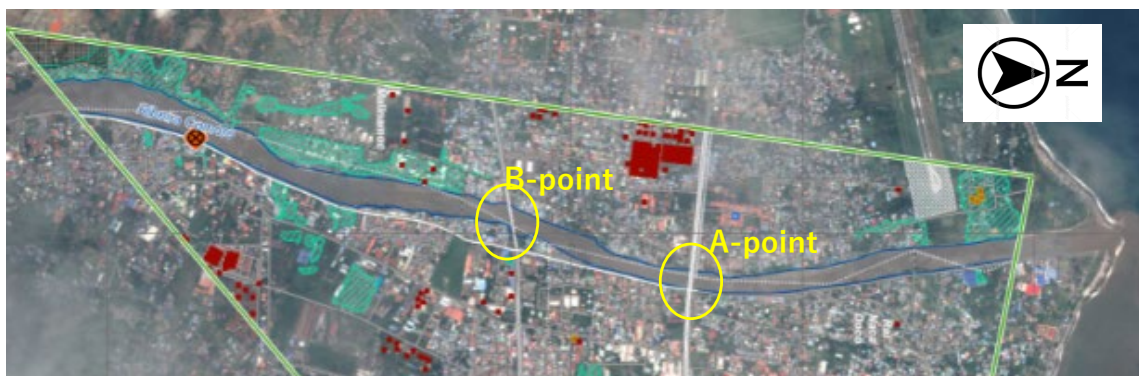


図10 Comoro 川周辺の拡大図



写真8 A-pointの被災状況（Comoro川）（4月12日撮影）



写真9 A-pointの被災状況（Comoro川）（4月8日撮影）



写真10 B-pointの被災状況（Comoro川）（4月4日撮影）

Google Earthの2020年11月19日の状況である。Comoro川に限らず東ティモールの河川は乾季など雨が無い場合には水無川の状態となる。堰から少し下流側の右岸側の○で囲まれた箇所が今回の被災箇所である。周辺には甚大な氾濫は認められていないが、洪水流

により護岸が破壊されている。

写真9には同じ被災箇所を下流側から上流側に向かって撮影したものである。堰の損傷は認められていないことが分かる。しかしながら堰の両端の護岸が浸食されていることが分かる。洪水流が堰の両端

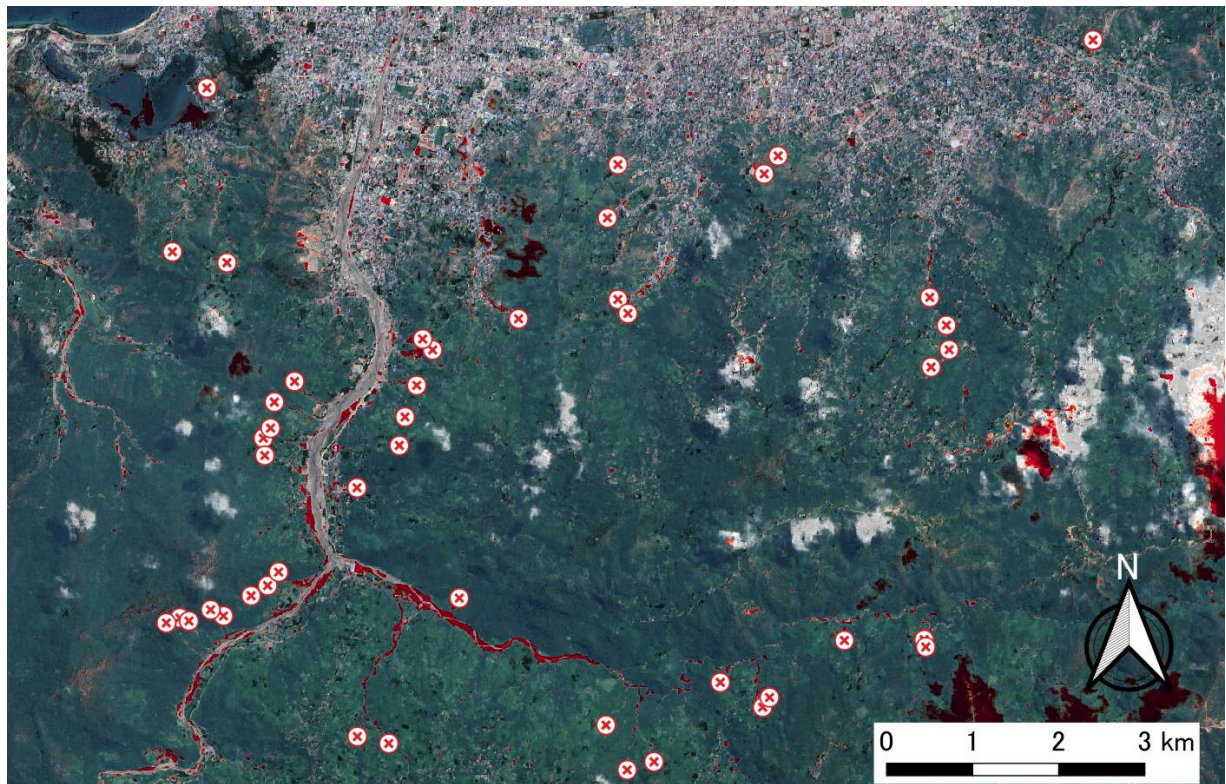


図11 デイリ近郊の斜面崩壊痕跡の抽出

を迂回し、柔らかい側岸を浸食することは良く知られており、迂回流と呼ばれている。写真9から、今回も迂回流が発生して堰近傍の護岸や道路を破棄したものと考えられる。日本大使館前の洗堀と同様、デイリの道路は比較的軟弱な地盤にアスファルト舗装されている程度であるため強靱さが不足していたのであろう。

写真10にB-pointの被災状況を示す。右側はGoogle Earthの2020年11月19日の状況である。左側に洪水時に撮影された動画のスナップショットを示す。スナップショット(写真9-3)から水位が高い状況となっていることが分かる。右岸側の家屋はかろうじて浸水を免れている状況であるが、左岸側の家屋(写真9-1, 写真9-2)は洪水流に巻き込まれて流されてしまっている。特に写真9-1が示す場所では護岸浸食があり、家屋が流されている。Comoro川では住居のある下流域では左岸側の方が右岸側よりも低いため、このような被害が生じた。

5. 衛星画像解析

5.1 斜面崩壊の抽出

ここまでは氾濫被害について述べてきたが、この章では光学衛星画像を用いた斜面崩壊箇所の探索について述べる。デイリ近郊の土石流痕跡をSentinel-2

マルチバンド衛星の観測データを利用して検出した。発災前後の観測データは欧州連合(EU)の地球観測プログラムであるCopernicusプログラムの枠組みで運用されているCopernicus Open Access Hubを利用して入手した。光学マルチバンドセンサを搭載した衛星群Sentinel-2の観測プロダクトについてデイリを観測したものを検索し、発災前として2020年4月20日、発災後として2021年4月10日及び15日の観測データをダウンロードした。Level-1Cという処理レベルのプロダクトでオルソ補正が行われた大気補正前の各周波数バンドの反射率のデータが含まれる。欧州宇宙機関ESAが公開しているSNAP(Sentinel Application Platform)を利用して特定バンド抽出やNDVI(正規化植生指数)の算出を行った。地理情報システムQGIS上でNDVIデータの発災前後での差分値を求め、可視光バンドデータで構成したトゥルーカラー画像、およびASTER光学衛星による全球3次元地形データASTER-GDEMと照合することで斜面災害の痕跡を検出し、源頭部の位置をマッピングした。その結果を図11に示す。50箇所程度の痕跡が抽出された。

今回の豪雨で大量の土砂生産が発生した。次回の出水でこれらの土砂が下流へ運ばれ、河床を浅くしてしまう可能性があるため、土砂管理は重要な課題である。

Sentinel-2の解像度は波長によって異なるが10～

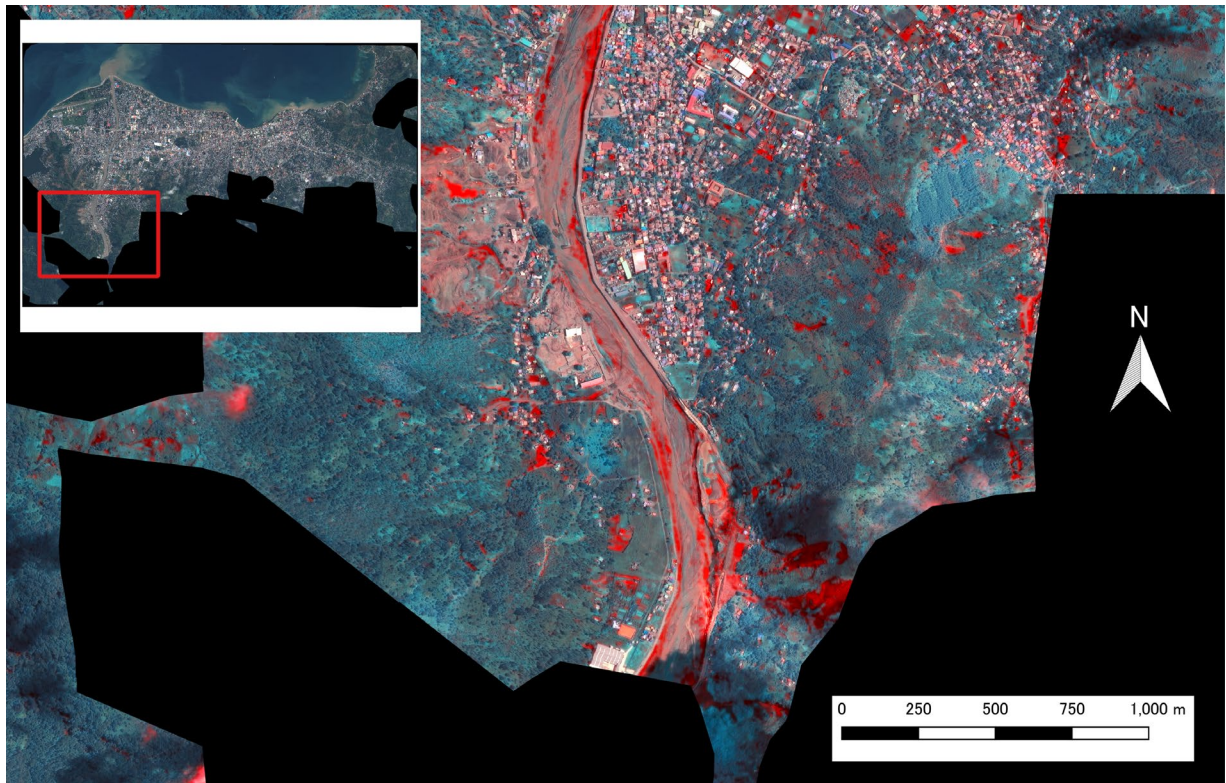


図12 Comoro川の中上流部の土砂災害（植生の減少，土砂の流出を赤色で強調）

60m程度である。市街地などより詳細な被災状況の把握には細かい解像度を持つ衛星画像が必要である。そこで解像度が50cmのPleiades衛星の観測データを利用した。これは図7に示しているプロダクトと同じ衛星データである。発災前後の観測データはディリ市街を中心とした188 km²の範囲で、発災前として2021年1月22日、発災後として2021年4月9日のものをAirbus社の提供するオルソ補正済みパンシャープン50cm解像度プロダクトとして購入した。

図12にComoro川の中上流部の解析結果を示す。Comoro川右岸の集落背後や左岸の採石場における斜面災害の痕跡を示す。植生の減少，砂の堆積で裸地化した箇所を赤色で強調表示している。右岸下側の集落で斜面から川辺一帯が赤色に見える。この集落では8棟が土石流に埋まったものとみられる。左岸の採石場も一部の谷部や植生との境で赤色を帯びており、崩落があったものと考えられる。図12の中央を流れるComoro川河道の高水敷が砂で覆われ赤色を帯びている。

6. おわりに

2021年4月4日にサイクロン・Serojaが東ティモール襲来し、甚大な氾濫被害，土砂災害が生じた。コロナ禍のため現地に入ることができなかったため、現地の東ティモール大学スタッフと協力をしてリモ-

ー調査を行った。また人工衛星画像を用いて、斜面崩壊位置の把握を行った。本稿ではその結果を示したものである。

ディリ市内の氾濫は主に河川の通水能力の低さに起因するが、とくに橋が通水阻害となっていることが分かってきた。また多くの斜面崩壊が確認された。それらは土砂生産として、河道に残っている。次回の出水ではそれも同時に流れ出し、大きな被害を引き起こす要因となり得る。また河床高の上昇にもつながり通水能力の低下につながる。今後の土砂管理は益々重要となる。

謝辞

Pleiades衛星の観測データの購入において自然災害研究協議会より支援を受けた。東ティモール大学工学部土木工学科のスタッフはコロナ禍にも関わらず現地で貴重な調査を行って頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) IBTrACS: <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/>.
- 2) EM-DAT: <https://www.emdat.be/>.
- 3) GSMap: https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMap/index_j.htm.

3/16福島県沖の地震で発生した地震動と建物被害の対応

境 有紀*・汐満 将史**・中澤 駿佑***

* 京都大学防災研究所

** 山形大学

*** 宇都宮大学

要 旨

2022年3月16日に発生した福島県沖の地震において、震度6弱以上を観測した強震観測点を対象として、観測点周辺の被害調査を行った。その結果、多くの観測点周辺で瓦屋根の被害、外壁の損傷といった軽微な被害が見られたが、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。観測された強震記録の性質を分析した結果、1秒以下の短周期が卓越する一方で建物の大きな被害と関連のある周期1-1.5秒の応答は小さく、このことが大きな震度を観測したにも関わらず、建物の全壊・大破といった大きな被害が生じなかった原因と考えられる。

1. はじめに

2022年3月16日に発生した福島県沖の地震(Mj7.4)では、最大震度6強の強い揺れを観測した。そこで、震度6弱以上を観測した強震観測点を対象として、観測点周辺の被害調査を行った。本稿では、観測点ごとの調査結果を示し、発生した地震動の性質と建物被害との関係について検討を行う。

2. 調査の概要

今回の地震では震度6弱以上を観測した強震観測点の数が58点と多く、その全ての調査を行うことは困難であったため、調査時点で震度情報が公開されているものを対象に

1. 震度6強を観測した全ての観測点
2. 震度6弱を観測した観測点のうち、既に強震記録が公開されており、周辺に80棟以上の建物が存在する

という条件で調査対象の絞り込みを行った。対象となった18観測点の位置を図1に示す。図中のJMAは気象庁震度観測点、震度計は地方公共団体震度計を示している。

調査範囲は、観測点から半径200m以内とし、範囲内の全ての建物について、外観から全壊・大破といった大きな被害の有無、木造・非木造を判定した。なお、寺社、倉庫、蔵等や地盤被害、基礎の被害を受けた建物は対象外とし、被害率を算出するための全建物棟数と被害棟数にはカウントしていない。つまり、調査範囲内の寺社や倉庫等を除く全ての建物

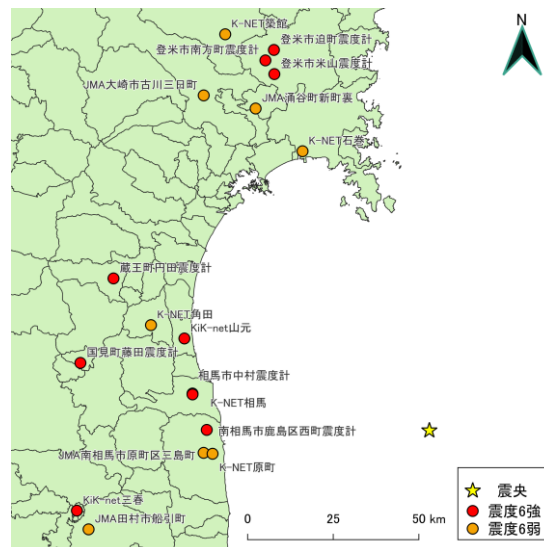


図1 調査を行った観測点位置

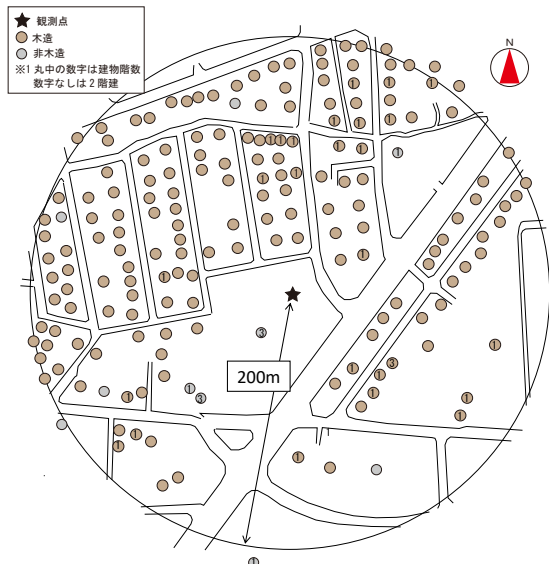


図2 建物分布図の例(国見町藤田震度計)

の、振動による上部構造の被害を対象とした。調査結果の例として、国見町藤田震度計周辺の建物分布図を図2に示す。定量的な被害データは建物のみを対象としたが、地盤等の建物以外の被害についても記録を行った。

3. 調査結果

3.1 各観測点周辺の被災状況

(1) K-NET 築館 (震度6弱, 調査日: 3/25)

観測点は栗原市築館総合支所(写真1)の敷地の南端に設置されている(写真2)。周辺では外壁や屋根瓦に被害を受けた建物(写真3,4)が見られたが、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。

(2) 登米市迫町震度計 (震度6強, 調査日: 3/19)

観測点は、登米市迫保健センター(写真5)の入口前のスペースに設置されている(写真6)。周辺では外壁に被害を受けた建物(写真7)などが見られたが、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。建物以外では、舗装の被害(写真8)が見られた。

(3) 登米市南方町震度計 (震度6強, 調査日: 3/19)

観測点は、登米市南方庁舎(写真9)の敷地内の電源設備のあるスペースに設置されている(写真10)。庁舎建物内で天井材の落下が見られた(掲載許可がないため写真なし)ほか、周辺では舗装の被害(写真11)や掲示板の被害(写真12)が見られたが、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。

(4) 登米市米山震度計 (震度6強, 調査日: 3/19)

観測点は、登米市米山総合支所(写真13)の敷地内に設置されている(写真14)。建物に隣接しているため、強震記録に建物の応答が含まれている可能性がある。周辺(写真15,16)には軽微なものも含め建物被害は見られなかった。



写真1 栗原市築館
総合支所



写真2 K-NET 築館



写真3 外壁の被害



写真4 屋根瓦の被害



写真5 登米市迫保健セ
ンター



写真6 登米市迫町
震度計



写真7 外壁の被害



写真8 舗装の被害



写真9 登米市南方
庁舎



写真10 登米市南方町震
度計



写真11 舗装の被害



写真12 掲示板の
被害

(5) JMA大崎市古川三日町(震度6弱, 調査日: 3/25)

観測点は大崎市古川三日町公園(写真17)の北西の端に設置されている(写真18)。周辺では外壁に被害を受けた建物(写真19)が見られたが、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。建物以外では、塀の被害や墓石の被害(写真20)が見られた。



写真17 大崎市古川三日町公園



写真18 大崎市古川三日町

(6) JMA涌谷町新町裏(震度6弱, 調査日: 3/25)

観測点は涌谷町役場(写真21)の敷地の西側に設置されている(写真22)。建物に隣接しているため、強震記録に建物の応答が含まれている可能性がある。役場建物近傍の地盤に被害が見られた(写真23)ほか、基礎に被害を受けた建物(写真24)が見られたが、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。



写真19 外壁の被害



写真20 墓石の被害

(7) K-NET石巻(震度6弱, 調査日: 3/25)

観測点は石巻市立大街道小学校(写真25)の敷地の北西端に設置されている(写真26)。周辺(写真27, 28)には軽微なものも含め建物の被害は見られなかった。



写真21 涌谷町役場



写真22 JMA涌谷町新町裏

(8) 蔵王町円田震度計(震度6強, 調査日: 3/20, 25)

観測点は蔵王町役場(写真29)の建物内1階に設置されている(写真30)。役場敷地内の舗装の被害(写真31)のほか、周辺では外壁に被害を受けた建物(写真32)が見られたが、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。建物以外では、舗装の被害や灯籠の被害が見られた。



写真23 地盤の被害



写真24 基礎の被害

(9) K-NET角田(震度6弱, 調査日: 3/26)

観測点は角田市役所(写真33)の敷地の南東端に設置されている(写真34)。周辺には屋根瓦に被害を受けた建物(写真35)や外壁に被害を受けた建物(写真36)が見られたが、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。



写真13 登米市米山総合支所



写真14 登米市米山震度計



写真25 石巻市立大街道小学校



写真26 K-NET石巻



写真15 周辺の様子



写真16 周辺の様子



写真27 周辺の様子



写真28 周辺の様子

(10) 国見町藤田震度計(震度6強, 調査日: 3/18, 25)

観測点は国見町役場(写真37)の駐車場に設置されている(写真38)。周辺には外廊下のブレースの抜けや柱根巻に被害を受けた建物(写真39)や、外壁に被害を受けた建物(写真40)、瓦屋根に被害を受けた建物が見られたが、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。建物以外では、ブロック塀の被害が見られた。



写真 33 角田市役所



写真 34 K-NET 角田

(11) KiK-net山元(震度6強, 調査日: 3/19)

観測点は山元町体育文化センター(写真41)の敷地内に設置されており、周囲は高さ約1mの盛土になっている(写真42)。周辺では瓦屋根に被害を受けた建物(写真43)や、外壁に被害を受けた建物(写真44)が見られたが、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。



写真 35 瓦屋根の被害



写真 36 外壁の被害

(12) K-NET相馬(震度6強, 調査日: 3/19, 26)

観測点は川原町児童センター(写真45)の敷地内に設置されており、観測点の南側には高さ約2mの壁がある(写真46)。周辺では瓦屋根に被害を受けた建物(写真47)や外壁に被害を受けた建物(写真48)が見られたが、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。建物以外では、墓石の転倒や石積みの塀の被害、舗装の被害が見られた。



写真 37 国見町役場



写真 38 国見町藤田
震度計

(13) 相馬市中村震度計(震度6強, 調査日: 3/19, 20, 26)

観測点はK-NET相馬から北に約280mの地点にある相馬市役所(写真49)の駐車場に設置されている(写真50)。周辺では瓦屋根に被害を受けた建物(写真51)や外壁に被害を受けた建物(写真52)が見られたが、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。建物以外では、ブロック塀や石積みの塀、鳥居の被害などが見られた。

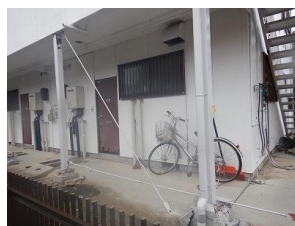


写真 39 ブレースと
柱根巻の被害

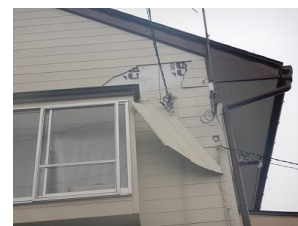


写真 40 外壁の被害



写真 29 蔵王町役場



写真 30 蔵王町円田
震度計



写真 41 山元町体育
文化センター



写真 42 KiK-net 山元



写真 31 舗装の被害



写真 32 外壁の被害



写真 43 瓦屋根の被害



写真 44 外壁の被害

(14)南相馬市鹿島区西町震度計(震度6強, 調査日 : 3/18)

観測点は南相馬市鹿島区役所(写真53)の入口に設置されており, 周囲には土が盛られている(写真54)。周辺では瓦屋根に被害を受けた建物(写真55)や外壁に被害を受けた建物(写真56)が見られたが, 全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。建物以外では, ブロック塀や墓石, 鳥居の被害が見られたほか, 舗装の被害も見られた。

(15)JMA南相馬市原町区三島町(震度6弱, 調査日 : 3/26)

観測点は南相馬市役所(写真57)の建物の裏手に設置されている(写真58)。建物に隣接しているため, 強震記録に建物の応答が含まれている可能性がある。周辺(写真59)では瓦屋根に被害を受けた建物(写真60)が見られたが, 全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。

(16)K-NET原町(震度6弱, 調査日 : 3/26)

観測点は南相馬消防署(写真61)の敷地の北側に設置されており, すぐ横は段差になっている(写真62)。周辺(写真63, 64)では目立った被害は見られなかった。

(17)KiK-net三春(震度6強, 調査日 : 3/18)

観測点は三春町立沢石小学校(写真65)の敷地内に設置されており(写真66), 背後は斜面になっている(写真67)。周辺(写真68)では目立った被害は見られなかった。

(18)JMA田村市船引町(震度6弱, 調査日 : 3/26)

観測点は田村市役所(写真69)の敷地の南端に設置されている(写真70)。周辺(写真71, 72)では目立った被害は見られなかった。



写真 49 相馬市役所



写真 50 相馬市中村
震度計



写真 51 瓦屋根の被害



写真 52 外壁の被害



写真 53 南相馬市鹿島
区役所



写真 54 南相馬市
鹿島区西町震度計



写真 55 瓦屋根の被害



写真 56 外壁の被害



写真 45 川原町児童
センター



写真 46 K-NET 相馬



写真 57 山元町体育
文化センター



写真 58 JMA 南相馬市
原町区三島町



写真 47 瓦屋根の被害

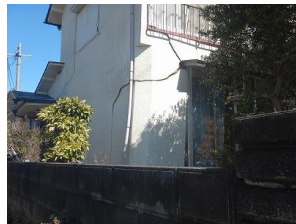


写真 48 外壁の被害



写真 59 周辺の様子



写真 60 瓦屋根の被害

3.2 各観測点周辺の被害のまとめ

各観測点周辺の被害状況、被害率を表1に示す。多くの観測点で外壁や瓦屋根に被害を受けた建物が見られたが、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。建物以外の被害では、舗装や塀の被害が見られた。

4. 観測された地震動の性質と建物被害との対応

本稿執筆時点で記録の公開されている観測点について、計測震度、地動最大加速度等の地震動強さ指標を表1に示している。地震動強さ指標には、建物の大きな被害と相関が高い減衰定数20%における周期1-1.5秒の平均スペクトル値(以下、1-1.5秒応答)(境, 2013)と1-2秒震度(境ら, 2004)も記している。また、加速度応答スペクトルを減衰定数を一般的な5%に加えて、建物が全壊に至る時の等価減衰にあたる20%(境, 2013)とした場

合について、図3, 4に示す。図4には、今回観測された強震記録と過去の強震記録の比較、具体的には、計測震度が最も大きいKiK-net三春、1-1.5秒応答が最も大き



写真 65 三春町立沢石小学校



写真 66 KiK-net 三春



写真 67 観測点の背後



写真 68 周辺の様子



写真 61 南相馬消防署



写真 62 K-NET 原町



写真 69 田村市役所



写真 70 JMA 田村市船引町



写真 63 周辺の様子



写真 64 周辺の様子



写真 71 周辺の様子



写真 72 周辺の様子

表 1 被害調査結果と地震動強さ

	観測点名	震度	全壊・大破率 [%]	木造全壊率 [%]	地震動強さ				
					PGA ^{※1} [cm/s ²]	PGV ^{※2} [cm/s]	計測震度 ^{※3}	1-2秒震度	A _{1-1.5} ^{※4} [cm/s ²]
2022年 福島県沖の地震	K-NET相馬	6強	0.0	0.0	744.4	73.2	6.17	5.71	544.2
	K-NET原町	6弱	0.0	0.0	626.1	36.8	5.59	5.13	186.6
	K-NET築館	6弱	0.0	0.0	524.0	39.4	5.62	4.94	212.1
	K-NET石巻	6弱	0.0	0.0	391.8	65.1	5.84	6.06	512.0
	K-NET角田	6弱	0.0	0.0	396.2	54.5	5.82	5.56	428.4
	KiK-net三春	6強	0.0	0.0	767.2	53.7	6.20	5.04	229.6
	KiK-net山元	6強	0.0	0.0	993.2	75.2	6.01	5.11	293.9
	登米市米山町震度計	6強	0.0	0.0					
	登米市南方町震度計	6強	0.0	0.0					
	登米市迫町震度計	6強	0.0	0.0					
	蔵王町田田震度計	6強	0.0	0.0					
	相馬市中村震度計	6強	0.0	0.0					
	南相馬市鹿島区西町震度計	6強	0.0	0.0					
	国見町藤田震度計	6強	0.0	0.0					
JMA大崎市古川三日町	6弱	0.0	0.0	309.6	44.2	5.62	5.48	343.1	
JMA南相馬市原町区三島町	6弱	0.0	0.0	646.4	33.9	5.59	5.06	224.8	
JMA涌谷町新町裏	6弱	0.0	0.0	324.8	41.6	5.51	5.38	263.5	
JMA田村市船引町	6弱	0.0	0.0	629.0	21.2	5.50	4.22	80.9	
過去の記録	1995年兵庫県南部地震・JR鷹取	6強	34.9	59.4	741.6	157.2	6.48	6.63	1227.1
	2004年新潟県中越地震・JMA小千谷	6強	1.2	1.8	975.0	93.6	6.33	6.03	616.0
	2011年東北地方太平洋沖地震・K-NET築館	7	0.0	0.0	2765.2	105.8	6.67	5.58	332.1

※1 地動最大加速度(水平2方向ベクトル合成)

※2 地動最大速度(加速度波形に0.1-10Hzのバンドパスフィルタをかけて積分し、水平2方向ベクトル合成したものの最大値)

※3 気象庁の算出方法では小数点以下1桁までとされるが、ここでは参考のため2桁目まで示す

※4 周期1-1.5秒平均加速度応答(減衰定数20%)

いK-NET相馬と、1995年兵庫県南部地震JR鷹取、2004年新潟県中越地震JMA小千谷、2011年東北地方太平洋沖地震K-NET築館を比較して示している。なお、K-NET築館は2012年に移設されており、今回とは異なる地点で記録されたものである。

図3より、発生した地震動のほとんどは震度と相関がある周期1秒以下の短周期(境ら、2002)が卓越する一方で、建物の全壊・大破といった大きな被害と相関の高い周期1-1.5秒は小さく、このことが震度6弱、6強といった大きな震度を観測したにも関わらず、全壊・大破といった大きな被害が見られなかった要因であると考えられる。K-NET相馬、K-NET石巻は比較的大きな1-1.5秒応答を有するが、その大きさは全壊率が1.9%であった2004年新潟県中越地震JMA小千谷の8~9割程度とやや小さい。観測点周辺の建物の耐震性能の違いの影響も考えられるが、建物被害が生じない、もしくはその境界程度の1-1.5秒応答の大きさであったと考えられる。

5. まとめ

2022年3月16日に発生した福島県沖の地震を対象に、強震観測点周辺の被害調査を行った。その結果、多くの観測点周辺で瓦屋根や外壁の被害といった軽微な被害を受けた建物は見られたものの、震度6弱以上という大きな震度を観測したにも関わらず、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。

観測された強震記録の性質と建物被害との対応について検討した結果、発生した地震動のほとんどが周期1秒以下の短周期が卓越する地震動であり、建物の大きな被害と相関を持つ1-1.5秒応答が小さかったことが、大きな震度を観測したにも関わらず全壊・大破といった大きな震度を受けた建物が見られなかったことの要因であると考えられる。

謝 辞

現地の方々には、被災直後にも関わらず様々なご協力をいただきました。南相馬市役所職員の皆様には、被災後の対応でお忙しい中、観測点の設置位置の確認を行っていただきました。本調査は、京都大学大学院生藤田雄大氏、山形大学大学院生江口直希氏と共同で行いました。強震記録は防災科学技術研究所、気象庁、鉄道総合技術研究所に提供していただきました。本調査を行うにあたり、自然災害研究協議会の支援を受けました。

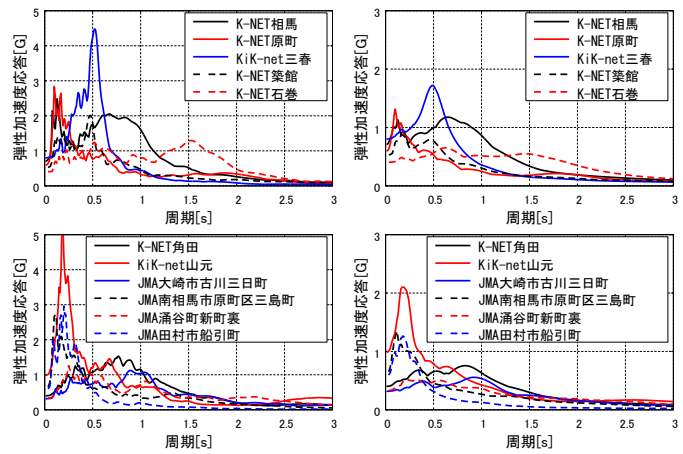


図3 弾性加速度応答スペクトル
(左：減衰定数 5%, 右：減衰定数 20%)

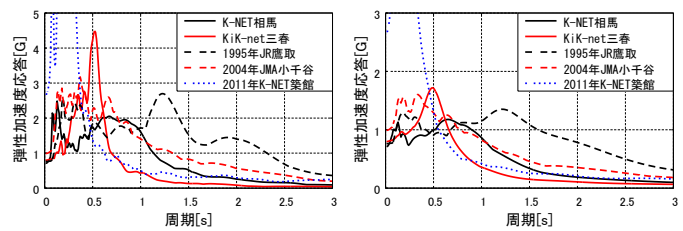


図4 弾性加速度応答スペクトルの
過去の強震記録との比較
(左：減衰定数 5%, 右：減衰定数 20%)

参考文献

- 境有紀 (2013) : 2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と建物被害の対応性—建物の大きな被害をより正確に推定する地震動強さ指標—, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第683号, pp.35-40.
- 境有紀, 神野達夫, 額額一起 (2002) : 建物被害と人体感覚を考慮した震度算定方法の提案, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, CD-ROM.
- 境有紀, 神野達夫, 額額一起 : 震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案 (2004) : 日本建築学会構造系論文集, 第585号, pp.71-76.

熱海市で発生した泥流の流動特性を考慮した土砂災害対策

竹林 洋史*

* 京都大学防災研究所

要 旨

2021年7月3日に複数回の泥流が発生した熱海市逢初川流域の泥流の流動特性について現地調査を実施するとともに、土砂災害危険度の高い谷地形の宅地における土砂災害対策について検討した。対象流域は明確な谷地形が形成されており、泥流は横断的にはあまり広がらず、幅80m以下の範囲で流れている。これは、溪流・河川の流れ方向に対して直角方向（横断方向）に数十メートル移動するだけで避難できることを示している。また、上流域で最初に泥流が確認されてから約50分後と約100分後に下流域で人的被害が発生している。これは、下流域の住民が上流域で発生している現象を正確にイメージできていなかったことが一つの原因である。そのため、上流域の様子をスマホやテレビなどを使って自宅などで確認できるカメラの設置など、容易に上流域で発生している現象をイメージできるシステムが必要と思われる。

1. はじめに

熱海市の逢初川流域で2021年7月1日午前1時ごろから降り始めた雨は、2021年7月3日午後2時ごろまで降り続き、雨が降り止む約3時間半前の7月3日午前10時27分の少し前に最初の泥流が逢初川流域の宅地上流部の家屋を流出させた。その約100分後の12時10分までの間に少なくとも8回の泥流が発生し、多くの家屋が被災するとともに、死

者26名、行方不明者1名の人的被害も発生した。

本研究では、2021年7月3日に複数回の泥流が発生した逢初川流域の泥流の流動特性について現地調査を実施するとともに、土砂災害危険度の高い谷地形の宅地における土砂災害対策について検討した。

2. 対象地域の概要

図-1に示すように、熱海市の逢初川流域は静岡県

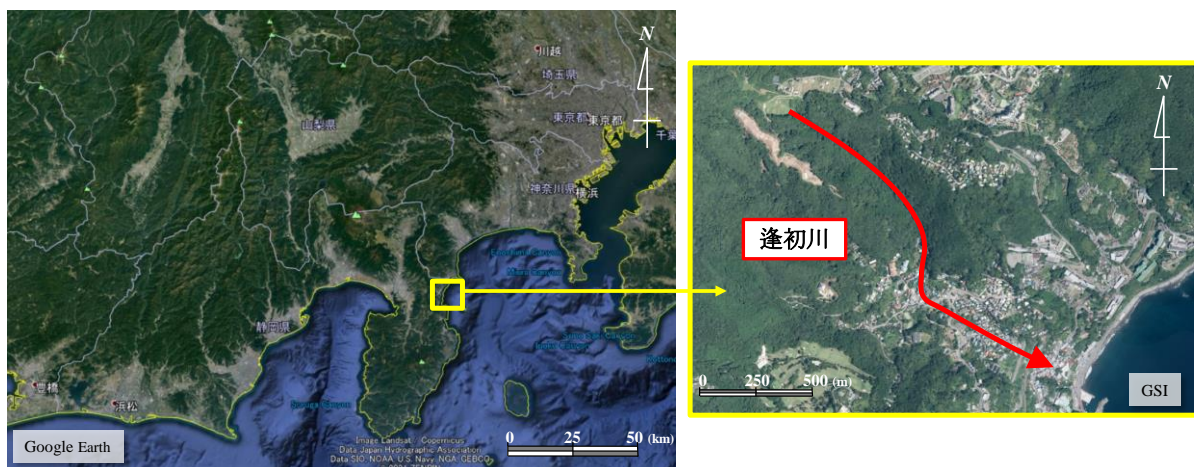


図-1 熱海市の逢初川流域の位置



図-2 逢初川流域周辺の土砂災害警戒区域

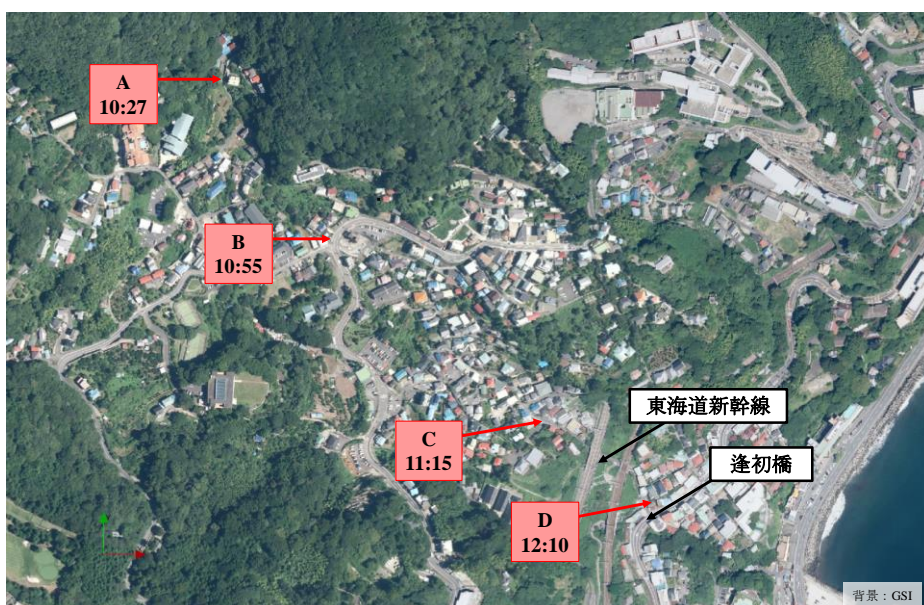


図-3 泥流の通過時間と場所

東部の神奈川県との県境に位置しており、JR熱海駅から北に約1kmの場所である。図-2は逢初川流域を含む周辺地域の土砂災害警戒区域を示している。泥流が発生した逢初川流域も土砂災害警戒区域が設定されており、図の中で濃い黄色で示されている領域である。つまり、対象地域周辺は多くの土砂災害警戒区域があるとともに、それらの土砂災害警戒区域の内の3つが逢初川流域の土砂災害警戒区域の下流域で重複しており、被災領域の下流部は特に土砂災害の危険度が高いことがわかる。逢初川流域は明確な谷地形であるため、土砂災害警戒区域も逢初川に沿って細長い平面形状となっている。また、土砂災害警戒区域は海岸まで続いている。これは、海岸まで地盤勾配が急であることを示しており、泥流が海岸域まで到達する可能性があることを示している。濃い黄色で示された領域の上流端にわずかであるが

赤で示された土砂災害特別警戒区域がある。

3. 泥流の流動特性と土砂災害対策

図-3 に現地の住民や消防団などによって泥流が確認された場所と時間を示す。宅地に最初に流れ込んだ泥流が確認されたのは、図-3 に「A」として示している場所において7月3日午前10時27分少し前である。図-3 に「B」として示している場所で10時55分に撮影された泥流の動画をキャプチャーしたものを図-4 (a) に示す。図-4 (a) の中央に示すえんじ色のビルの奥側（南側）を黒色の泥流が流れている。動画から得られた泥流の流速は約8m/sであった。2013年に伊豆大島で発生した泥流の数値シミュレーションで得られた泥流の流速は平均14m/sで場所によっては20m/sを超えており、「B」



(a) B 地点, 10:55 am

(b) C 地点, 11:15 am



(c) D 地点, 12:10 am

図-4 住民によって撮影された泥流

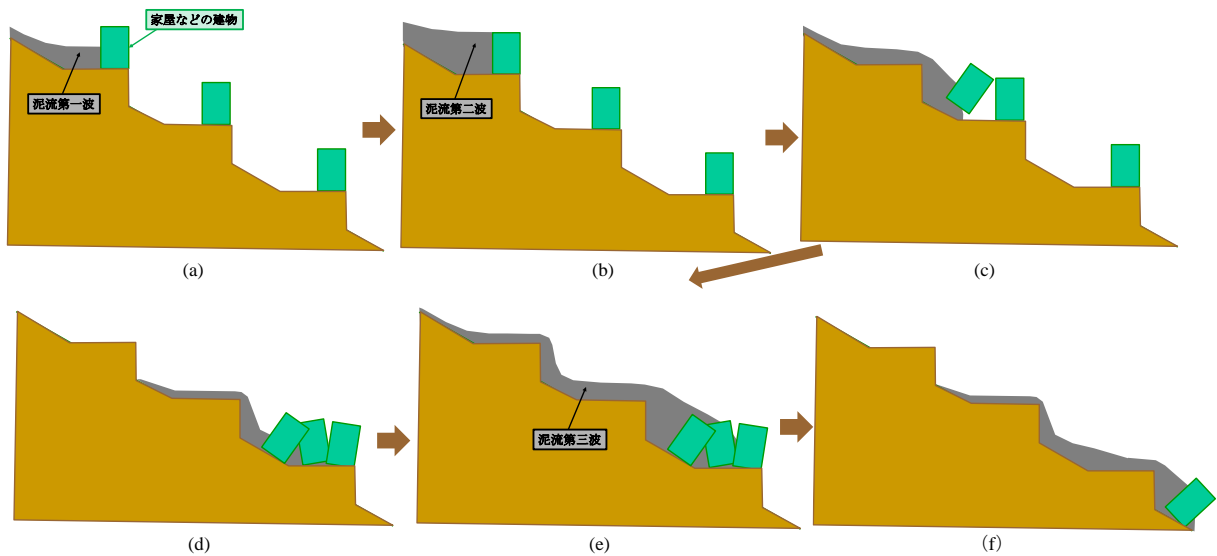


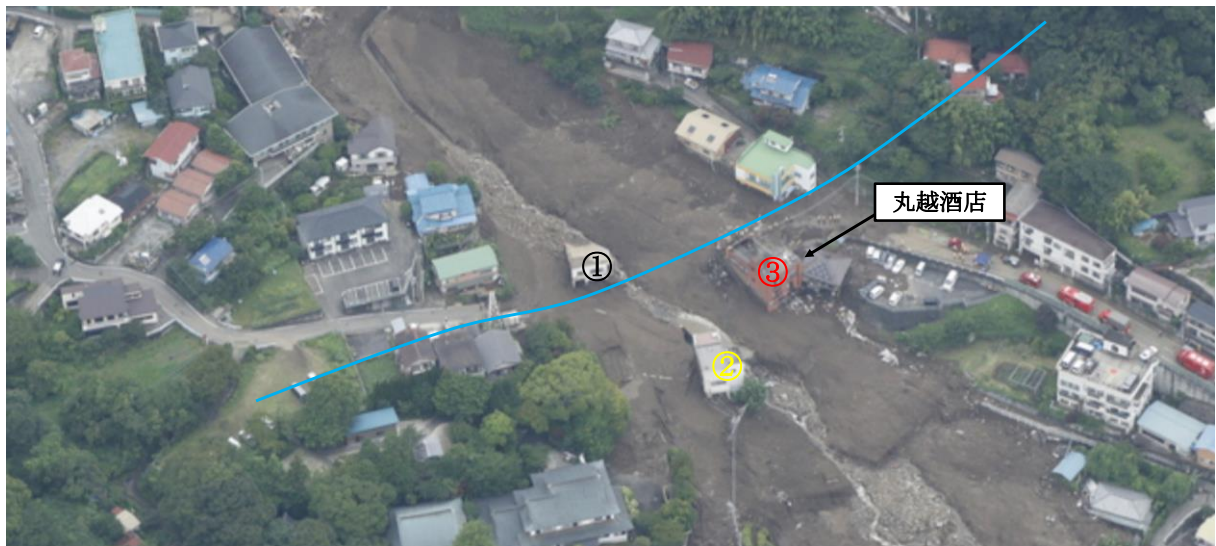
図-5 建物が泥流の下流への伝播に与える影響

地点で観測された泥流の流速は、泥流としては比較的遅い。これは、上流で多くの家屋を破壊しながら

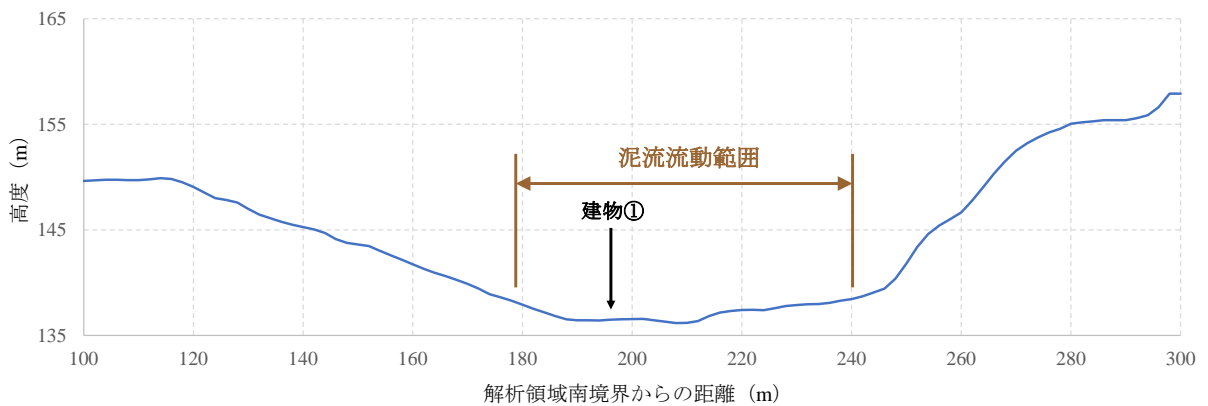
流れてきたためと考えられる。なお、図-4 (a) に示す泥流は、宅地に最初に泥流が流れ込んだ時刻か



(a) 被災前 (Google Earth)



(b) 被災後 (アジア航測撮影)



(c) 泥流流動域に残存した建物と (b) で示した青線に沿った地盤高

図-6 泥流流動範囲と建物の破壊、宅地内の地形との関係

ら約 30 分経過しており、図-3 の「A」で確認された泥流とは異なる。図-3 に「C」として示している

場所で 11 時 15 分に撮影された泥流の動画をキャプチャーしたものを図-4 (b) に示す。図-4 (b) に示



図-7 泥流流動域に残存した建物

す泥流は、図-4 (a) に示す泥流が確認されてから約 20 分経過しており、両泥流は異なるものである。図-4 (b) の泥流の下流部は 11 時 15 分よりも前に既に流れてきていた泥流でちょうど図-4 (b) に示す地点で停止していた。一方、図-4 (b) の泥流の上流部は撮影時に流れてきた泥流である。つまり、図-4 (b) は停止していた泥流の上を別の泥流が覆い被さるように流れてきている状況を示している。図-3 に「D」として示している場所で 12 時 10 分に撮影された泥流の動画をキャプチャーしたものを図-4 (c) に示す。泥流は家屋を破壊するとともに、逢初橋の高欄を乗り越えて逢初川に流れ込んでいる。

以上のように、泥流は大きなものが 1 回発生して海岸まで流れたのではなく、比較的小規模なものが間欠的に複数回発生したと考えられる。また、泥流は図-5 に示すように、家屋などの建物に衝突する過程で減速しながら停止し、次の泥流が先に流れて停止した泥流上を流れ、停止した泥流を取り込んで規模を拡大させながらさらに下流に流れて家屋などの建物に衝突する過程で減速して停止するプロセスを繰り返しながら海岸まで到達したと考えられる。また、図-3 に「C」や「D」として示している場所に泥流が到達したのは、宅地に最初に流れ込んだ泥流が確認されてから約 50 分後と約 100 分後である。これらの場所においても人的な被害が発生している。これより、リードタイムが十分に確保できたとしても人的被害をゼロにすることは難しいことがわかる。避難せずに自宅に留まった理由は様々あると考えられるが、下流域の男性住民によると、上流域で発生している状況がイメージできていればより速やかに避難していたとのことである。つまり、上流域で土石流や泥流が発生したという状況を言葉のみで聞いても現在の自分が被災リスクが高い状態なのかどうか実感できないことが自宅に留まっていた理由の一

つと考えられる。そのため、上流域で発生している現象を住民がより速やかに認識・理解するために、土砂災害警戒区域が設定されている溪流では上流に複数のカメラを設置し、下流域の住民がスマートフォンやテレビなどで上流の様子を視覚的に確認できるようなシステムの導入が有効と考えられる。

図-6 に泥流流動範囲と建物の破壊、宅地内の地形との関係を示す。図-6 (c) に示すように、対象地点は明確な谷地形を形成しており、溪流横断方向の地盤高の変化が大きい。その結果、泥流の流動幅は 50m～80m と地盤の低い範囲に限定されている。これは、溪流・河川の流れ方向に対して直角方向（横断方向）に数十メートル移動すれば泥流が流れてこない地盤の高い場所に避難できることを示している。これらのことから、谷地形が発達している土砂災害危険地域については、溪流・河川横断方向に容易に移動できる道路を整備するとともに、溪流の流れに対して直角方向に数十メートル移動するだけで避難できることを住民が認識することにより、泥流による人的被害を大きく減少できる可能性があると考えられる。また、図-6 (a) と (b) を比較すると、多くの家屋や樹木が泥流によって流出しているが、①～③の番号を付けた建物は、泥流流動域内にあるにもかかわらず残存していることが分かる。図-7 に建物①～③の被災直後の様子を示す。これらの建物は鉄筋コンクリート構造の建物であることがわかる。流動痕跡や泥流を撮影した動画などから、対象地点の泥流は深さ約 3m、速度約 8m/s で流れていたようである。しかし、対象地点を流れた泥流は、木造家屋は破壊する流体力を有していたが、鉄筋コンクリート構造の建物を破壊するほど大きな流体力ではなかったことがわかる。土石流・泥流によって木造家屋のみが破壊され、鉄筋コンクリート構造の建物は残存する現象は、2014 年の広島市安佐南区八木三丁

目の土石流など、多くの土石流・泥流被災地で確認されている (Takebayashi & Fujita, 2020)。

また、図-7 の建物①をよく見ると、下流側の壁面が白く、泥流による土砂がほとんど付着していないことがわかる。また、建物の一階は泥流が通過しているが、二階は下流側の窓ガラスは割れておらず、二階に流れ込んだ泥流は少量であったことが分かる。つまり、鉄筋コンクリート構造の建物の上階の下流側への避難は、生存率を高めることがわかる。

4. おわりに

2021 年 7 月 3 日に複数回の泥流が発生した熱海市伊豆山逢初川流域の泥流の流動特性について調査研究を実施するとともに、土砂災害危険度の高い谷地形の宅地における泥流からの避難方法について検討した。得られた成果をまとめると以下のようである。

(1) 対象流域は明確な谷地形が形成されており、泥流は横断的にはあまり広がらず、幅 80m 以下の範囲で流れている。これは、溪流・河川の流れ方向に対して直角方向（横断方向）に数十メートル移動するだけで避難できることを示している。これらのことから、谷地形が発達している土砂災害危険地域については、溪流・河川横断方向に容易に移動できる道路を整備するとともに、溪流の流れに対して直角方向に数十メートル移動するだけで避難できることを住民が認識することにより、泥流による人的被害を大きく減少できる可能性があると考えられる。

(2) 下流の新幹線や JR 周辺で泥流による人的被害が発生したのは、上流域で最初に泥流が確認されてから約 50 分後と約 100 分後である。これは、下流域の住民が上流域で発生している現象を正確にイメ

ージできておらず、被災リスクが高い状況であることを理解していなかった可能性がある。そのため、上流域の様子をスマホやテレビなどを使って自宅などで確認できるカメラの設置など、容易に上流域で発生している現象をイメージできるシステムが必要と思われる。

(3) 泥流流動域内では、多くの木造家屋は流出していたが、鉄筋コンクリート構造の建物は破壊されていなかった。また、ある鉄筋コンクリート構造の建物の一階は泥流が通過していたが、二階に流れ込んだ泥流は少量であった。これは、鉄筋コンクリート構造の建物の上階の下流側への避難は、生存率を高めることを示している。

謝辞

熱海市の住民の皆様から発災時の多くの情報をご提供頂いた。また、静岡県、熱海市（危機管理室、消防第四分団など）、アジア航測、パシフィックコンサルタンツ、NHK、朝日新聞、読売新聞、山口大学・山本教授から、各種データ・被災の状況など、詳しい情報をご提供頂いた。ここに記して感謝致します。

参考文献

Takebayashi H., Fujita, M. (2020) : Numerical Simulation of a Debris Flow on the Basis of a Two-Dimensional Continuum Body Model. *Geosciences*, 10, 45.

漸増型巨大災害リスクに対応する地域防災体制の構築

生田 英輔*・越山 健治**・寅屋敷 哲也***・紅谷 昇平****

* 大阪公立大学 都市科学・防災研究センター

** 関西大学 社会安全学部

*** ひょうご震災記念21世紀研究機構 人と防災未来センター

**** 兵庫県立大学 大学院減災復興政策研究科

要 旨

南海トラフ巨大地震に代表される時間経過とともに発生リスクが増加する漸増型災害リスクに対して、災害軽減レベルを各時期で設定し、時期に応じた対策を行うことが理想的であるが、自治体、企業、住民といった地域防災のステークホルダーにおいてその計画・対策論は確立されていない。本研究では南海トラフ巨大地震の影響を受ける近畿圏において、自治体、企業、住民を対象に調査やワークショップを実施した。その結果、自治体、企業、住民いずれも長期間での対策実施には至っておらず、短中期的な対策促進と時系列評価を加味したリスクマネジメントの必要性が明らかになった。

1. はじめに

1.1 背景と目的

南海トラフ巨大地震のような海溝型地震の特徴は、時間の経過とともに発生リスクが増加する「漸増性」にある。リスクが増えていく以上、被害軽減レベルを各時期で設定し直し、時期に応じた対策実行を行うことが理想的な防災計画であるが、地域防災のステークホルダーである行政機関、企業、住民においてその計画・対策論が確立されていない。「南海トラフ地震が30年以内に80%の確率で発生する」といった発生確率の評価をどのように解釈し、計画・対策に生かしているかも明らかになっていない。これらの現状を踏まえ、本研究では近畿圏を中心に漸増型災害リスクに対応した地域防災体制の課題を明らかにするため、自治体、企業、住民の3者のステークホルダーを対象に調査やワークショップを実施した。発生が現実視されるものの、具体的な防災計画・対策論が不十分な南海トラフ地震対策において、ステークホルダーごとに課題を明らかにし、中長期的な対策を促進に資する知見を得ることを目的とした。

1.2 研究方法

研究期間は2020年度と2021年度の2年間であった。2020年度は地域防災のステークホルダーである自治体、企業、個人に対して調査を実施し、南海トラフを見据えた防災対策の現状と課題を明らかにした。2021年度は調査結果のさらなる分析を進めるとともに、ステークホルダーが参画するワークショップを開催し、漸増型巨大災害リスクに関する課題の共有とモデル的な地域防災体制を提案した。

1.3 研究体制

幅広い分野の研究者を擁する自然災害研究協議会近畿地区部会の幹事を中心に表1に示す研究体制を構築し、研究を進めた。

2. 自治体の漸増型災害リスクへの取組

2.1 背景と目的

2013年に改正された「南海トラフ地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法（以後南海トラフ法）」（2013年）による地震防災体系では、地震防災対策推進地域の自治体はそれぞれ計画策定をす

表1 研究体制（2022年3月時点）

氏名	所属・職名
生田 英輔 (研究代表者)	大阪市立大学大学院生活科学研究科・准教授
越山 健治	関西大学社会安全学部・教授
寅屋敷 哲也	ひょうご震災記念 21 世紀研究機構 人と防災未来センター・主任研究員
紅谷 昇平	兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科・准教授
西野 智研	京都大学防災研究所・准教授
牧 紀男	京都大学防災研究所・教授
荒木 進歩	大阪大学大学院工学研究科・准教授
橋 伸也	神戸大学都市安全研究センター・准教授
辻岡 綾	同志社大学インクルーシブ防災研究センター・特定任用研究員
照本 清峰	関西学院大学建築学部・教授
藤本 将光	立命館大学理工学部・准教授

ることになっている。この発端は2002年制定の「東南海・南海地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法（以後東南海・南海法）」であり、大綱の決定（2003）、基本計画の作成（2004）、地震防災戦略の策定（2005）がなされた。その後、2011年東日本大震災の教訓を踏まえ、現行特別措置法のもと、各都道府県・市町村で推進計画が作成されている。この改正により従来の「東南海・南海地震」「東海地震」を対象とした推進基本計画、地震防災戦略は廃止されている。

この南海トラフ法の推進計画において具体的目標が掲げられている。目標年限は10年間（2014-2023）であり、概ね人的被害を8割減、物的被害を5割減と示している。各自治体の推進計画もこの具体的目標を念頭に計画策定がなされている。

一方で、内閣官房が中心となり国土強靱化基本法（2012）が制定され、この中に「人命の保護が最大限図られる」等、社会資本対策に係る防災対策が書き込まれており、自治体における国土強靱化計画に一部の防災対策および地震防災戦略が内包されるようになった。さらに各自治体では、これらと整合させる形で、または別の形で、地震防災戦略やアクションプランと呼ばれる計画を策定し、地域の地震ハザードリスクに応じた対策を推進している。その結果、南海トラフ地震防災対策推進地域ではさまざまな防災戦略やアクションプランが混在している

状況である。

南海トラフ地震に焦点をあてた計画は、対象となるハザードはプレート境界型巨大地震である。プレート境界型巨大地震が持つハザード特性の一つとして、時間が経過するにつれて地震発生確率は高まっていくことがある。そのためこの地震対策に対する戦略計画・アクションプランは、ハザード確率の上昇とともに段階的な計画の推進が必要となる。これらの実態について計画上どのように扱われているか、またこのようなリスクの漸増性を地域計画に展開する方法について試行することを調査の目的とする。具体的には、①関西・四国の自治体における地震防災計画の策定実態の調査、②市町村における将来リスクを考慮した計画策定の試行、を実施した。

2.2 調査概要

本研究では、関西及び四国の11府県322市町村を対象とした質問紙調査を2021年2月に実施した。質問項目は、地域防災計画、南海トラフ地震防災対策推進計画、地震防災アクションプラン・戦略計画の3計画について、計画の有無・HP公表の有無・計画作成方法等である。回答自治体数は、府県で11自治体（100%）、市町村で298自治体（92.5%）となっている（表2-1）。本調査の実施にあたり、情報収集については(株)サーベイリサーチセンターに委託している。

また府県レベルの地震防災アクションプラン・戦略計画について、2021年と2011年の策定資料をWEB検索およびヒアリングにより収集し、分析を行った。

2.3 調査結果

災害対策基本法に定められている地域防災計画については、対象とした全自治体で「有り」との回答を得た。そのうちHPにおける公開状況は、府県で100%であるが、市町村では86.6%であり全面公開とはなっていない。

南海トラフ地震防災対策推進計画の作成状況では、府県レベルでは作成されているものの、すべての市町村における作成には至っていないことがわかった。なお計画の記述方法は、「地域防災計画への追加」が都道府県で全て、市町村で66.4%を占めている。これは、南海トラフ特措法第5条2項の規定で「基本計画を基本として地域防災計画の中に作成するもの」と位置づけていることが理由と考えられる。

地震防災アクションプラン・戦略計画の作成状況等を調査した結果、府県では存在しているものの、市町村における作成状況は低い値となっている。「有り」の36市町村のうち、和歌山県内市町村が23市町村であることから和歌山県において計画作成が推進

されていることがわかった。また内容をみると、必ずしも南海トラフ巨大地震だけを対象としているわけではなく、各地域の直下型地震等も踏まえた具体的減災目標を設定しているものもある。またこれらアクションプラン・戦略計画は、取組計画を「10年」と設定して目標値を設定し、各部署の事業計画に落とし込み、評価検証するしくみで動いているところが多く見られた。さらに市町村計画は、府県の目標値・事業計画を踏まえて計画策定を行っていることから、市町村の計画率については府県の指導力が強く働いていることが考察できる。

関西・四国の府県における地震防災アクションプラン・戦略計画を収集し、2011年時点および2021年時点の資料を確認できたものについて内容変化を分析した(表2)。

計画年限および内容から、2011年時点では東南海・南海法に基づく計画が中心になっており、2014-2015年を目標年限としていること、概ね10年程度の戦略計画を作成していることが見てとれる。

2021年時点の計画は、南海トラフ法に基づくものとなり新たに10年計画を立てているもの、継続的に計画更新を行っているもの、新たな計画策定を行わず進捗管理を推進しているもの等、さまざまな形が現れている。特別措置法という垂直型に体系化される計画でありながら、基本的に現場レベルの防災対策は自治体を中心となって計画・実行する実態があり、現場レベルの計画を精査することが難しいといえる。

また、先に記したように国の南海トラフ法の推進計画では2023年を目標に人的被害8割減、物的被害5割減を掲げている。これらを府県のアクションプラン・戦略計画でどのように位置づけているかを見ると、物的被害について数値目標の設定をしている自治体は大阪府のみであった。また人的被害についても5府県のみ計画で明記している、人的被害の目標設定は、「限りなくゼロ」から「47%減少」まで差がある。ただしさらに具体的な施策の目標設定および現状数値を見る限り、2023年に目標を達成することは困難であることが見てとれる。国自体のフォローアップ調査結果(2019年)を見ても、全国の集計結果として2018年時点で人的被害が27%減、物的被害が13%減と達成目標にほど遠い結果となっており計画の実効性が問われるものとなっている。

これらの計画は南海トラフ法への改正や国土強靱化法の制定により計画の性質が変化しており、計画比較による対策の進展状況を分析することが難しい内容となっているが、さらに自治体の計画自体の扱いに差異が生じており、そのことが自治体内での進捗管理および計画策定の困難性の原因となっていることが考察される。また、南海トラフ地震の発生確

率が上昇していることを踏まえた計画策定の数値目標の変化、対策項目の変化については捉えることができず、リスクの漸増性を踏まえた戦略計画の展開とはなっていない。

表2 府県の地震防災アクションプラン・戦略計画

2011年時点	計画名	計画年度	人的被害	物的被害
三重県	第二次三重地震対策アクションプログラム	2007-2014 (10)	半減	半減
滋賀県	滋賀県地震防災プログラム	2004-2013 (10)	-	-
京都府	京都府戦略的地震防災対策指針	2009-2018 (10)	-	-
大阪府	大阪府地震防災アクションプラン	2008-2017 (10)	半減	半減
兵庫県	<入手できず>		-	-
奈良県	奈良県地震防災対策アクションプログラム	2006-2015 (10)	半減	-
和歌山県	和歌山県地震防災対策アクションプログラム	2007-2015 (9)	半減	-
香川県	香川県地震防災対策目標	2007-2015 (9)	ゼロに近づけ-	-
徳島県	徳島県地震防災対策行動計画	2006-2015 (10)	ゼロ	-
愛媛県	<入手できず>		-	-
高知県	高知県南海地震対策行動計画	2009-2014 (6)	-	-
2021年時点	計画名	計画年度	人的被害	物的被害
三重県	三重県防災・減災対策行動計画	2018-2022 (5)	-	-
滋賀県	滋賀県地震防災プラン	2021-2023 (3)	-	-
京都府	第三次京都府戦略的地震防災対策指針	2020-2029 (10)	概ね4分の1	-
大阪府	新・大阪府地震防災アクションプログラム	2015-2024 (10)	限りなくゼロ	50%減少
兵庫県	兵庫県南海トラフ地震・津波対策アクションプログラム	2014-2023 (10)	-	-
奈良県	<奈良県国土強靱化アクションプランへ>		-	-
和歌山県	(和歌山県地震防災対策アクションプログラム 総点検)	2015-	-	-
香川県	香川県南海トラフ地震・津波対策行動計画	2021-2023 (3)	ゼロに近づけ-	-
徳島県	とくしま-0作戦 地震対策行動計画	2011-2022 (12)	ゼロを目指す	-
愛媛県	えひめ震災対策アクションプラン	2015-2024 (10)	80%減少	-
高知県	高知県第4期南海トラフ地震対策行動計画	2019-2021 (3)	47%減少	-

2.4 市町村における将来リスクを考慮した計画策定の試行

2.4.1 将来被害想定

時間の経過とともにリスクが増加する「漸増性」という特徴を持つ、海溝型地震の災害リスクに対応した地域防災体制の構築を目的として、地震及び津波の漸増型災害リスクに対応した地域防災体制の課題を、ハード・ソフト面の対策及び住民の行動・意識の面から明らかにし、中長期的な視野を持つ戦略的な地域防災体制の構築を試行する。本活動では、市町村を対象として(A町とする)、具体的な地域計画(防災アクションプランや事前復興等)の骨格、社会情勢の変化(人口・世帯状況)と被害推定、さらに計画の進展シナリオをもとに、直前期・発災期に考え得る計画案について、行政職員の現状認識および意見を収集・分析し、戦略目標の設定と戦略に応じた実行計画骨子の作成手順を試行した。

A町について、将来被害想定算出にあたり、将来人口予測結果を使用した。国土数値情報として公開している将来推計人口データは500mメッシュの粗いデータであるため、本業務では国土技術政策総合研究所が公開している「将来人口・世帯予測ツールV2(H27国勢調査対応版)」(参考：<https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/cohort-v2>)を用いた。また本ツールを用いることで将来人口・世帯数を100mの細分メッシュに配分することができる。なお、将来被害想定算出に使用するデータは250mメッシュであるため、将来人口予測結果についても同メッシュにしてGISで可視化した。

さらに将来人口予測結果の推移に基づき、被害想

定結果に対して按分した結果を将来被害想定とした。被害想定は、全壊建物棟数のみを対象とした。計算結果をGISで整理し将来被害想定図を250mメッシュで可視化した。

その結果A町では、被害量が半減すること（図1）、被害発生領域が小さくなること（図2～5）が示された。中長期の地域計画を踏まえた対策を考える上で有用な情報である。

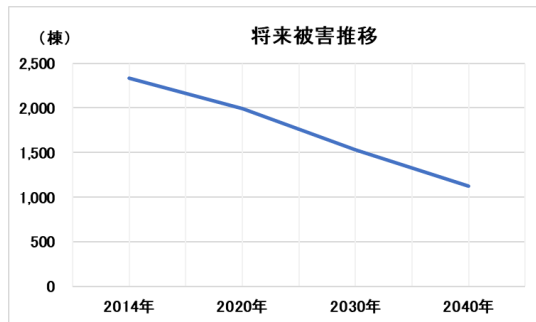


図1 A町の将来被害推移

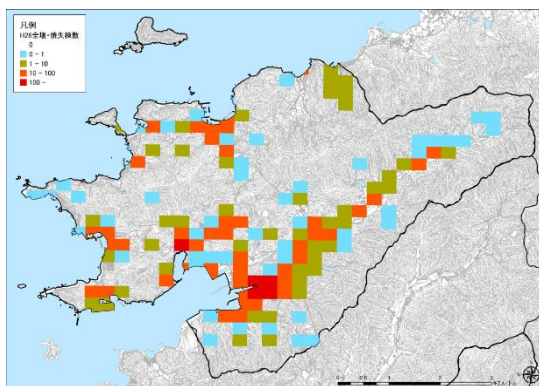


図2 2014年の被害想定 (2,331棟)

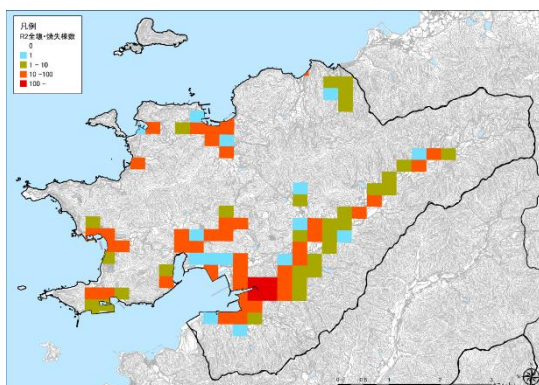


図3 2020年の将来被害想定 (1,994棟)

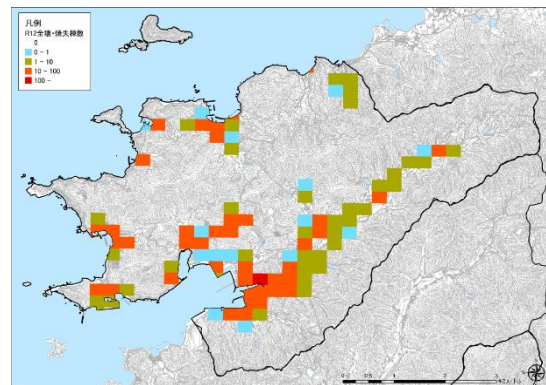


図4 2030年の将来被害想定 (1,529棟)

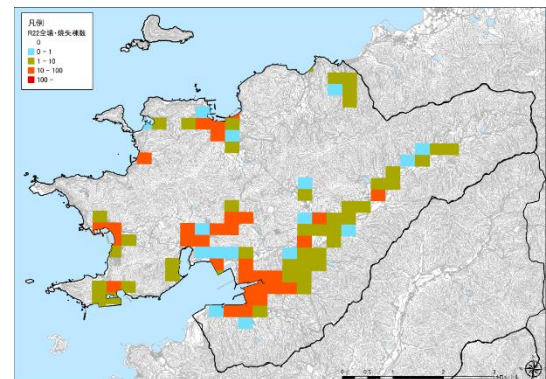


図5 2040年の将来被害想定 (1,126棟)

2.4.2 ワークショップによる計画の策定

A町において以下の概要でワークショップを実施した。

- ・開催日時：2021年12月23日（木）13:30～16:30
- ・開催場所：A町役場 庁舎3階 大会議室
- ・参加者：町職員9人、研究者3人（ファシリテーター1人、グループワーク指導2人）、WS補助スタッフ3人（テーブルファシリテーター2人、記録係1人）

ワークショップは説明、グループワーク、発表共有の順で行った。まずファシリテーターが、2.3.2で分析した将来被害変化を用いて問題意識・目標について説明を行った。本ワークショップで共有しておきたい目標として「A町の地震・津波被害を最小限にすること」を提示した上で、4つの詳細目標を参加者全員で共有した。

- ・できることなら人的被害を0に近づける
- ・できることなら財産被害を0に近づける
- ・できることならまちの機能を維持する
- ・できることなら早く復旧して日常を取り戻す

次に、「シナリオプランニングの検討」と「シナリオごとの計画の検討」をグループワークで実施した。シナリオプランニングでは由良町にとってのS（強み、良いところ）、W（弱み、悪いところ）、O（チャンス、追い風）、T（脅威、向かい風）のそれぞれについて付箋に書き込み可視化した上で、KJ法

を用いたグルーピングを行った。

その後、SWOTの付箋のグルーピングのタイトルを書いた付箋を別途集めて、3~4つの将来シナリオを考える。シナリオは表2-6のように外部環境としての追い風・向い風と内部環境としての良い点・不利な点のマトリックスで検討する。

これらの結果をもとに、基本計画と戦略についてグループ内で議論した。

ワークショップにより地震発生の可能性が近づく（リスクの漸増性）ことが、SWOT分析に直接影響を及ぼすことはなかったが、その後の戦略計画の策定過程で議論した中で影響を及ぼした。それらを踏まえて以下の点で考慮されたことを成果として記す。

(ア)自ら考案したシナリオに基づいた戦略作成手順を踏まえて計画を作成すると、次回見直す際に発生が間近に迫っているという感覚でシナリオを書き換えることができ、それが計画の具体的な変化につながる。

(イ)戦略を考える際にどの程度時間がかかるかを考慮すると、早くできることと時間がかかることの優先順位が必要になることを認識できる。

(ウ)「防災対策」が残された時間や、リスク認知によって変化することを意識して計画作成を行うことの必要性を感じることができる。

3. 企業の漸増型災害リスクへの取組

連携型事業継続力強化計画を策定した中小企業への質問紙調査を実施した。

3.1 調査方法

中小企業に対しては、2019年に中小企業強靱化法が制定され、中小企業における防災・減災の取組を事業継続力強化計画として国が認定を開始した。そこで、複数の事業者が連携して取り組む連携型の事業継続力強化計画を策定した企業へ、事業継続や防災対策における状況やリスクへの考え方等について郵送によるアンケート調査を実施した。

なお、中小企業は、大企業と比べて防災対策が進んでいないとされるが、今回の調査対象は、既に災害対応や事業継続への対策に取り組んでいる企業である。本アンケート調査は、そのような積極的に防災対策に取り組む企業の特徴や考え方を明らかにすることを目的としており、中小企業全体の母集団を代表したサンプリングではないことには留意する必要がある。

3.2 結果

3.2.1 事業継続や防災対策で重視している点

事業継続や防災対策にあたって重視していることは、「社員の安全性」が84%と最も多く、次いで「経済的損失の軽減」(50%)、「社会的責任」(40%)、「地域の安全性」(37%)などと続いている。中小企業でも、自社のことだけでなく、社会的責任や地域の安全性を考慮し、防災対策を行っていることが分かる。

3.2.2 事業継続や防災対策での課題

事業継続や防災対策での課題としては、「ノウハウ」(45%)、「社員の防災意識の不足」(42%)、「費用」(39%)といった、これまでの類似のアンケート調査で挙げられている内容が上位を占めている。さらに、これらに次いで、「サプライチェーンの企業等との連携」や「同業種の企業等との連携」など企業どうしの連携や「リスクの情報不足」が挙げられている。

3.2.3 想定しているリスク

連携型事業継続力強化計画で想定しているリスクとしては、「洪水・浸水害」が64%で最も多く、これに「内陸直下型地震」、「感染症の流行」、「南海トラフ地震」と続いている(図6)。なお、対象は全国の中小企業であり、近畿圏の上場企業を対象とした3.2の調査とは、対象地域が異なることには留意が必要である。また「ライフライン(電力・水道)の途絶」や「通信(インターネット・電話)の途絶」、「部品・材料の不足・仕入停止」のように、ライフラインやサプライチェーンがストップするリスクを想定している中小企業も、一定数存在している。

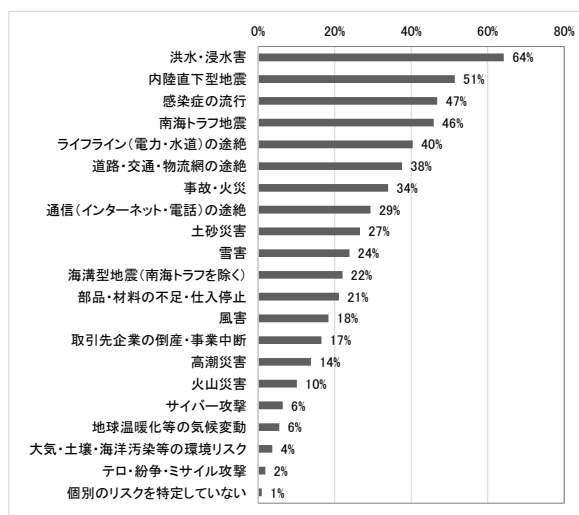


図6 連携型事業継続力強化計画で想定しているリスク(複数回答)(全社、n=109)

3.2.4 災害や危機の想定で考慮する条件

事業継続・防災対策のため、災害や危機を想定する際に、どのような条件を考慮するか、「非常に考慮する」、「やや考慮する」、「あまり考慮しない」、「全く考慮しない」、「分からない」の5つの選択肢で質問し、そのうち「非常に考慮する」、「やや考慮する」を選択した比率を、図7に示す。

これをみると、「今後、数年で発生する可能性」、「発生した場合の被害の大きさ」、「近年の災害・危機の発生状況」では、「非常に考慮する」の割合が50%を超えている。また、今後の発生確率が低くなるにしたがって、「非常に考慮する」の割合も減っており、「今後、数百年で発生する可能性」については、「非常に考慮する」が約1割、「やや考慮する」を含めても約3割にとどまっている。中小企業が災害や危機を想定する際、発生確率や発生時の被害の大きさが影響しており、正しくリスク情報を提供することが重要だと考えられる。

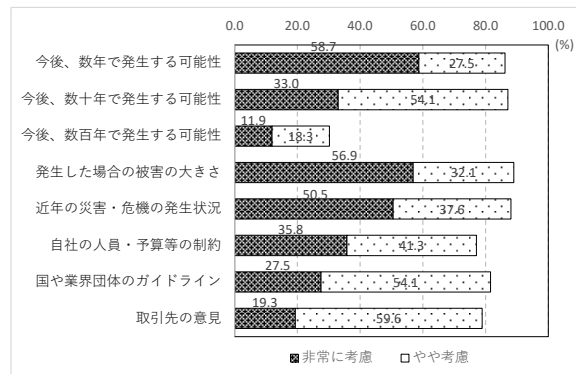


図7 災害や危機の想定で考慮する条件（単一回答）
（全社、n=109）

3.3 企業調査まとめ

連携型事業継続力強化計画に取り組む中小企業への調査では、防災対策で災害や危機を想定する際には、発生頻度の違いを考慮する傾向があり、今後数年～数十年で発生する災害に体しては約90%が考慮すると回答したのに対して、今後数百年に一度程度の災害を考慮する回答したのは約30%にとどまった。また、発生頻度に加えて、発生した場合の被害の大きさや近年の災害・危機の発生状況も考慮して、防災対策に取り組んでいることが明らかになった。

4. 住民の漸増型災害リスクへの取組

4.1 調査目的

住民が個人レベルで将来発生しうる災害をどのように意識して、対策を実施しているのかは、個人差が大きいと考えられる。住民の生活を脅かすリスク

は自然災害だけではなく、多様なハザードの生起確率や自身の被害確率を把握することが必要である。とくに南海トラフ地震のような漸増型災害リスクを住民がどのように認知しているかは、自治体の地域防災に大きく影響を与えられられる。また、災害対策行動も現時点での実施の有無だけではなく、将来の実施予定とその時期、将来わたって実施する意向予定のない行動（必要でないといみなされる行動）もあり、本研究で把握することにした。本研究では南海トラフ地震の被災が想定される大阪府および和歌山県の沿岸地域の住民に対して、南海トラフ地震の発生確率が発表されている30年間を時系列で想定した調査を実施し、リスク漸増型災害に対する個人の意識と対策の関係を明らかにすることを目的とする。

4.2 調査方法

南海トラフ地震の被災が想定される地域に居住する個人の南海トラフ地震や他の災害への意識、対策の実施状況を把握するために、2020年12月16～17日にアンケート調査を実施した。調査方法はWEB調査として、株式会社クロス・マーケティングに委託した。対象地域は南海トラフ地震の津波被害が想定される大阪府の沿岸地域（17区市町）および和歌山県の沿岸地域（18市町）の住民である。目標回答件数は1,000件であり、当該地域の人口比にしたがって、和歌山県が333件（33.3%）、大阪府が667件（66.7%）に設定した。

4.3 調査内容

調査内容は個人属性、災害への不安や経験、災害対策（14種）、災害の生起想定（南海トラフ地震、内陸直下型地震、特別警報級台風の3種）、災害により被害を受ける想定（南海トラフ地震、内陸直下型地震、特別警報級台風、交通事故の4種）、南海トラフ地震発生時の津波の想定や避難判断、分散避難への意識で、計99問である。これらの質問のうち、時間を含む質問は、災害対策、災害生起想定、災害被害想定である。具体的な質問における時間表現は、災害対策では「すでに実施している」「今後30分以内に実施する」「今後1ヶ月以内に実施する」「今後6ヶ月以内に実施する」「今後1年以内に実施する」「今後3年以内に実施する」「今後5年以内に実施する」「今後10年以内に実施する」「今後20年以内に実施する」「今後30年以内に実施する」「実施する予定はない」の9区分で、それぞれ0～100%を10%刻みで選択してもらった。災害生起想定、災害被害想定では「今すぐ～今後30分以内」「今後31分～1ヶ月以内」「今後2～6ヶ月以内」「今後7ヶ月～1年以内」

「今後2～3年以内」「今後4～5年以内」「今後6～10年以内」「今後11～20年以内」「今後21～30年以内」の9区分でそれぞれ0～100%を10%間隔で選択してもらった。

4.4 調査結果

4.4.1 不安に感じる災害・被災経験

自宅で不安に感じる災害の回答結果を表2に示す。最も高い比率となったのは「台風の暴風」であった。2018年台風21号の被害を受けた地域が含まれ、暴風被害の記憶が影響している可能性が高い。次に内陸直下型地震も高い比率であり、2018年大阪北部地震や阪神・淡路大震災の影響が考えられる。大阪市周辺では上町断層帯地震が広く知られているものの、一般的に示されるハザードマップでは本調査の対象である沿岸地域を通る断層は少ないが、回答者の不安は大きいことがわかった。一方、大阪湾の地域では、室戸台風・第2室戸台風による高潮被害が歴史的には知られているが、回答者で高潮を不安と考える人は5%であった。先述した台風21号でも顕著な潮位上昇があったが、防潮設備により市街地への浸水は少なく、高潮の被害はイメージしにくい現状であることがわかった。

また、自然災害の経験では、「被災経験なし」が最も多く57.8%であった。

4.4.2 災害生起想定確率

南海トラフ地震、内陸直下型地震、特別警報級の台風の想定生起確率の平均推移を図8～10に示す。想定時間は「今すぐ～今後30分以内」から「今後21～30年以内」の9区分であり、回答者には全ての時間範囲における生起確率を10%間隔で回答してもらった。集計にあたっては、0%、100%以外は10%間隔の中央の値を代表値として計算した。

南海トラフ地震では「今すぐ」と考える人が1割程度おり、内陸直下型地震でも同様であった。時間とともに確率は漸増していき、1年と2～3年でやや傾きが変わり、その後30年に向けて増加傾向にあった。政府発表の「今後30年以内に80%の発生」と単純に比較することはできないが、個人レベルでは今後21～30年の期間において南海トラフ地震が発生するという認識の平均は約4割である。

内陸直下型地震も南海トラフ地震と同じ傾向であるが、現在から近い時間での生起確率は南海トラフ地震より高い傾向にあった。

特別警報級台風では6ヶ月と7カ月～1年の間で確率が急増しており、これは調査時期と台風シーズンとの期間を反映していると考えられる。

表2 自宅で不安に感じる災害（複数回答）

	人数	比率 (%)
台風の暴風	586	58.6
台風の豪雨	376	37.6
高潮	50	5.0
台風以外の豪雨	214	21.4
内陸直下型地震（断層を原因とするもの）	573	57.3
海溝型地震（プレート境界地震）	474	47.4
津波	242	24.2
河川氾濫	231	23.1
土砂災害	105	10.5
火災	385	38.5
液状化	95	9.5
不安に感じる災害はない	92	9.2
その他	38	3.8

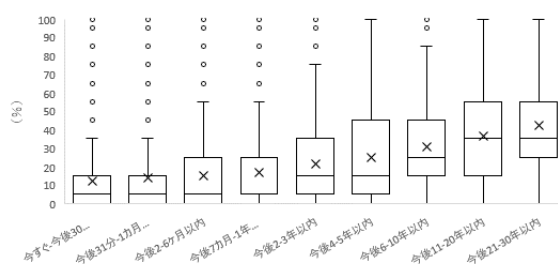


図8 南海トラフ地震想定生起確率の推移

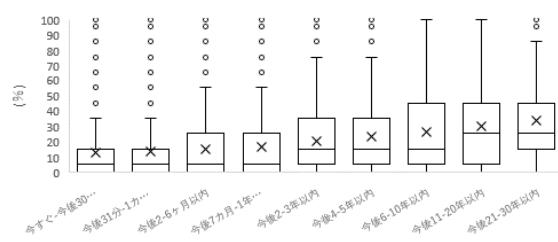


図9 内陸直下型地震の生起確率の推移

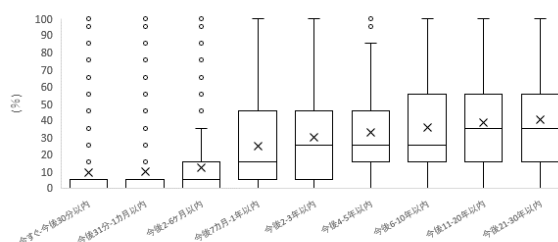


図10 特別警報級台風生起確率の推移

4.4.3 災害対策と時期

災害対策と実施予定の時期の関係を尋ねた。図11に結果を示す。「すでに実施している」が最も多いのは「一時避難場所等・避難ビルの位置の確認」で502人(50.2%)、次いで「一時避難場所等・避難ビルまでの経路の確認」で475人(47.5%)であった。一方で「実施する予定はない」が最も多いのは、「災害リスクの低い地域への引っ越し」で809人(80.9%)、次いで「住宅の耐震改修・建替」で731人(73.1%)であった。調査対象は浸水想定地域を含んでおり、避難関係は早めに対策を実施する意向が強いが、防災訓練や7日分の備蓄はあまり進んでいないことがわかった。

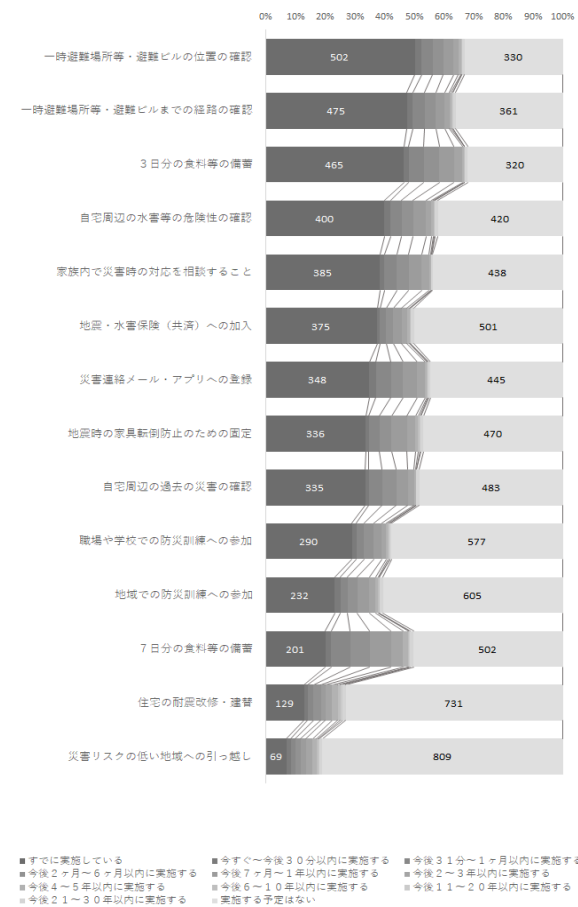


図11 防災対策実施の有無及びその予定

4.5 住民調査まとめ

住民個人にとって南海トラフ地震は多様な自然災害ハザードのなかの一つに過ぎず、30年以内発生確率などの科学的知見に基づきリスクを認知し、対策行動に繋がっているとは限らないことがわかった。地震学的には発生確率やメカニズムも異なる内陸直下型地震も海溝型地震も個人にとっては同じ地震であり、そのリスク認知にも大きな差がない。一方、台風は1年周期で季節性をもって発生するハザード

であると認知されており地震とは明確に異なる発生確率であった。また、ハザードの生起と、ハザードによって自身が被害を受けるかの認識には乖離があり、一般的なハザードの生起リスク情報の呈示のみならず、自身の被災リスクの認知を促進することが対策行動につながる可能性が示唆された。

5. まとめ

本研究で実施した調査により明らかとなったステークホルダーごとの漸増型災害リスクに関する知見は以下の4つである。

(1) 自治体では南海トラフ地震の発生確率が上昇していることを踏まえた計画策定の数値目標、対策項目の変化は捉えることができず、リスクの漸増性を踏まえた戦略計画の展開とはなっていない

(2) 上場企業では被災経験が南海トラフ地震への対策促進に影響するが、一部の戦略・長期計画を有する企業以外は対策が進捗していない

(3) 中小企業では、今後数年～数十年で発生する災害は考慮されているが、今後数百年に一度程度の災害を考慮する企業は少なく、頻度より被害程度を重視している

(4) 住民では、災害全般の中でリスク漸増型災害の特徴は意識されておらず、長期的に対策を進める傾向にはなく、コストの低い対策が重視されている

これらの結果を踏まえ漸増型災害リスクに対応した地域防災体制を検討する。自治体では、次の10年、11～20年、21～30年でどのような防災対策を切り替えながら進めていくかという視点が必要であるが、現状の地域防災計画の枠組みでは盛り込むことは難しい。そこで、地域防災計画とは別の地震防災戦略が立てられたものの実効的な運用にはほとんど至っていない。南海トラフ地震のような巨大災害に対して、企業は単体では動きにくく業界団体や自治体の動向を見ており、企業のニーズに合った情報提供が今後重要となる。一方で、企業ではBCP(事業継続計画)の策定は拡大しているが、BCPに漸増型災害リスク評価を組み入れいくには、ガイドライン等の整備が課題である。住民では、長期的な視点での防災対策以前に、短期的な防災対策の促進が課題であると同時に、漸増型災害リスクを含む災害そのもののメカニズムの理解とリスク認知の促進が課題である。

自治体、企業、住民という地域防災のステークホルダーそれぞれが漸増型災害リスクに対する課題を抱えている中、今後必要とされるのは、それぞれの立場でのリスクマネジメントにおいて、リスクの相

対評価に時系列評価を加えることである。すなわち、被害の大きさと発生時期に応じたリスクマネジメントのモデルが必要とされている。具体的には、発生確率が高くない時点まではリスク保有や移転で対応し、発生確率が上昇する時点からはリスク回避で対応するといった段階的な戦略である。このような戦略が、自治体における地域防災計画や地震防災戦略、企業におけるBCP、住民における地区防災計画や防災マニュアルの基盤となることで、それぞれのステークホルダーが南海トラフ地震発生までの期間に何をすべきかが理解し連携することで、漸増型災害リスクに対応した地域防災体制が構築できる。

本研究では、具体的な漸増型災害リスクに対応した戦略モデルの呈示と検証には至っておらず、今後の課題とする。

謝 辞

本研究は京都大学防災研究所・地域防災実践型共同研究（特定）「漸増型巨大災害リスクに対応する地域防災体制の構築」の一環で実施しました。また、多くの自治体、企業、住民の方にご協力いただきました。記して謝意を表します。

第 59 回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集

2022 年 9 月 26 日

発行：京都大学防災研究所 自然災害研究協議会

議長：奥村 誠（東北大学災害科学国際研究所）

五十嵐 晃（京都大学防災研究所・自然災害研究協議会総務）

（お問い合わせ）電話：0774-38-4347

<http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/ndic/contents.html>