

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)

令和4年7月

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

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 委員名簿

(有識者)

市原 美恵	東京大学 地震研究所 准教授
今村 文彦	東北大学 災害科学国際研究所 所長
植田 達志	静岡県 危機管理部 広域防災統括官
越村 俊一	東北大学 災害科学国際研究所 教授
◎佐竹 健治	東京大学 地震研究所 教授
鈴木 亘	国立研究開発法人 防災科学技術研究所 地震津波火山ネットワークセンター 主任研究員
関谷 直也	東京大学大学院情報学環 総合防災情報研究センター 准教授
廣井 悠	東京大学大学院工学系研究科 都市工学専攻 教授
福島 隆史	一般社団法人日本民間放送連盟 災害放送対策部会 幹事 (株式会社TBSテレビ 報道局社会部エキスパート職部長)
藤本 真人	日本放送協会 報道局 災害・気象センター長
前野 深	東京大学 地震研究所 准教授
森 信人	京都大学 防災研究所 教授
○矢守 克也	京都大学 防災研究所 教授
吉永 敏之	高知県土佐清水市 危機管理課長

(関係省庁)

松浦 直	内閣官房 内閣参事官
矢崎 剛吉	内閣府 政策統括官(防災担当) 付 参事官(調査・企画担当)(第2回まで)
朝田 将	内閣府 政策統括官(防災担当) 付 参事官(調査・企画担当)(第3回)
荒竹 宏之	総務省 消防庁 国民保護・防災部 防災課長
石崎 憲寛	国土交通省 大臣官房 参事官(運輸安全防災)
朝堀 泰明	国土交通省 水管理・国土保全局 防災課長
奥田 晃久	国土交通省 水管理・国土保全局 海岸室長(第2回まで)
田中 克直	国土交通省 水管理・国土保全局 海岸室長(第3回)
西村 拓	国土交通省 港湾局 海岸・防災課長

◎は座長、○は副座長、敬称略、有識者は五十音順

目次

1. はじめに	4
2. 気象庁の対応	5
2-1. トンガ諸島の火山噴火直後	5
2-2. トンガ諸島の火山噴火後	6
3. 気象庁が発表する潮位変化に関する情報について	8
4. 火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化に関して入手可能なデータ・情報と活用可能性	9
5. 火山噴火等による潮位変化に関する情報のあり方	12
5-1. 火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化に関する情報のあり方	12
5-2. 火山噴火や地震に起因する様々な潮位変化に関する情報と普及啓発	18
6. 中長期的な課題	22
7. まとめ	24
8. 終わりに	25

開催履歴

参考文献

1. はじめに

令和4年1月15日に発生した、フンガ・トンガ・フンガ・ハアパイ火山の大規模な噴火(以下「トンガ諸島の火山噴火」という。)により、日本では、気圧変化とその直後からの潮位変化が観測された。この潮位変化は、津波の到達予想時刻より数時間早く観測されるなど、地震による津波とは異なる性質を有していた。気象庁は、各地で観測された大きな潮位変化に最大限の警戒を呼びかけるため、津波警報・注意報の枠組みを用いることが適切であると考え、津波警報等を発表した。

一方、この一連の対応では、潮位変化が観測された時点ではそのメカニズム等が明らかではなかったため、津波警報等の発表までに時間を要したことや、火山噴火の発生から津波警報等の発表までの間の情報発信が不十分だったこと等の課題があった。

これらの課題に対応するため、令和4年2月、気象庁では、当面の対応として、海外で大規模噴火が発生した場合や大規模噴火後に日本へ津波の伝わる経路上にある海外の潮位観測点で潮位変化が観測された場合に、「遠地地震に関する情報」を活用して、日本でも火山噴火等による潮位変化が観測される可能性がある旨を周知することを開始した。さらに、国内の潮位観測点で観測された潮位変化に応じて、津波警報や津波注意報を発表することとした。

また、今般の潮位変化がどのようなメカニズムで発生したと考えられるのかについて、令和4年2月より「津波予測技術に関する勉強会」(以下「勉強会」という。)において検討がなされ、令和4年4月に「今般の潮位変化は大規模噴火に伴う気圧波の伝播等の複合的な要因によって生じた。現時点で明らかになっているメカニズムに関する知見を活用し、今後、大規模な噴火が発生した際に、速やかに適切な情報を国民に提供することが重要」との報告書がまとめられた。

勉強会で得られた知見を踏まえ、今後、同様な現象が発生した場合どのような情報発表がなされるべきか、住民や自治体等の防災対応に資する観点から、「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」(以下「本検討会」という。)が、令和4年5月に設置され、検討を進めてきた。本報告書は、その検討結果を取りまとめたものである。

今般の潮位変化のような現象は、約150年で2～3回程度と発生頻度は低い。しかし、ひとたび発生すれば、沿岸で人的被害等が生じる可能性もあり、これを防ぐために必要な情報が適切に発表されることが求められる。今後火山噴火等により潮位変化が発生した際に、本報告書に沿って気象庁から必要な情報が適切に発表され、被害が最小限に食い止められることを期待する。

2. 気象庁の対応

2-1. トンガ諸島の火山噴火直後

令和4年1月15日13時頃(日本時間)に、トンガ諸島のフンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山で大規模な噴火が発生した。噴煙高度は、約16,000メートル(52,000フィート)まで達した(気象衛星ひまわりの観測による)。この時の、時間経過に伴う状況変化及び気象庁による情報発表は、次のとおりである(気象庁,2022)。

この大規模噴火の後、1月15日13時25分頃からフンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山近傍のヌクアロファ(トンガ)等で、火山噴火に伴うとみられる潮位変化が観測された。日本で潮位変化が生じる可能性が予想されたことから、気象庁は、同日18時00分に「遠地地震に関する情報」を活用して「日本への津波の有無を調査中」と発表した。その後、日本への伝播経路上の海外の潮位観測点では大きな変化は観測されなかったことから、同日19時03分に津波予報(若干の海面変動)を発表した。

しかし、その後、日本国内の潮位観測点で、通常の地震による津波から予想される到達時刻よりも2時間以上も早く潮位変化が観測され始め(資料1)、これらの潮位変化が大きくなる傾向が見られた。このため、翌16日00時15分に津波警報・津波注意報を発表し、潮位変化へ注意警戒を呼びかけた。

この潮位変化により、宮城県、三重県、徳島県及び高知県における船の転覆・沈没等30隻の他、漁具や養殖施設、水産物被害等が確認されている(資料2)。このような被害は、注意報クラスの津波の被害形態と矛盾しないものであった。

表1 令和4年1月15日13時頃のトンガ諸島の火山噴火の時間経過に伴う状況変化及び気象庁による情報発表

日時(日本時間)	事象及び気象庁が発表した情報等
15日13時頃	火山噴火発生
15日13時25分頃	ヌクアロファ(トンガ)で火山噴火に伴うとみられる潮位変化を観測(14時16分82cm(データ断))
15日13時39分	ウェリントン航空路火山灰情報センター(VAAC)が航空路火山灰情報(VAA)を発表 衛星画像で、噴煙高度52,000フィート(約16,000m)を解析
15日18時00分	「遠地地震に関する情報」を活用し、日本への津波の有無を調査中と発表 日本への伝播経路上の海外の観測点では大きな潮位変化は観測されなかった
15日19時03分	太平洋沿岸に津波予報(若干の海面変動)を発表
15日20時台	父島をはじめ、日本各地で、地震に伴う通常の津波到達時刻より2時間以上早く、潮位変化が観測され始めた

15日 23時台	潮位変化が大きくなった 気象庁は、津波注意報、警報等を活用して注意喚起することを判断
16日 00時 15分	津波注意報(北海道太平洋沿岸部東部から宮古島・八重山地方までの太平洋沿岸等)、津波警報(奄美群島・トカラ列島)を発表
16日 02時 54分	岩手県の津波注意報を津波警報に切替え
16日 04時 07分	津波注意報(長崎県西方と鹿児島県西部)を発表 以降、潮位変化が減衰
16日 07時 30分	以降、順次減衰に伴う津波警報・注意報の切替え(引き下げ)
16日 14時 00分	津波注意報(発表中の津波予報区全て)を解除し、津波予報(若干の海面変動)に切替え その後も海面変動が継続
17日、18日	津波予報(若干の海面変動)を継続発表

2-2. トンガ諸島の火山噴火後

(1)メカニズム等の解明

2-1で述べたように、今般の津波警報・注意報の発表では、通常とは異なる対応を行ったが、明らかになった課題としては、主に、

- ・観測された潮位変化のメカニズム等が明らかでなかったため、津波警報等の発表までに時間を要した

- ・火山噴火発生から津波警報等の発表までの間の情報発信が不十分だったというものがあげられた。

そこで、気象庁は、令和4年2月から3月にかけて津波、火山、海洋の専門家を交えた勉強会を開催し、トンガ諸島の火山噴火で発生した潮位変化のメカニズム等を分析した。

その結果、今般の潮位変化は大規模噴火に伴う気圧波の伝播等によって生じたことが分かった。このうち最も伝播速度が速い気圧波は約 300m/s の速度で伝わったラム波と考えられ、これに伴う潮位変化が日本では最初に発生したと考えられる。また、伝播速度が約 200m/s の大気重力波も伝わった可能性があるものの、それがどの程度潮位変化に寄与したかは不明であった。

現在もメカニズムは十分に解明されていないものの、大規模な噴火が発生した場合の潮位変化に関する情報のあり方については、さらに本検討会において議論することとした。

(2) 情報発信における当面の対応

本検討会で情報のあり方の方向性が示されるまでの当面の対応として、令和4年2月8日から気象庁は、海外で大規模噴火が発生した場合や、大規模噴火後に日本へ津波の伝わる経路上にある海外の潮位観測点で潮位変化が観測された場合に、「遠地地震に関する情報」を活用し、火山噴火等による潮位変化が日本でも観測される可能性がある旨を発表し、その後の国内各地の潮位変化に応じて、津波警報等の仕組みを活用して津波警報や津波注意報を発表することとした。

また、勉強会の報告を踏まえ、令和4年4月7日より気象庁は、当面の対応をさらに改善し、火山噴火等により発生した気圧波(ラム波)の伝播速度を仮定した場合の津波の到達予想時刻を「遠地地震に関する情報」に記載することとした(資料3)。

(3) 情報及びその発信の検討

本検討会は、勉強会の報告を踏まえ、防災対応に資するため、大規模噴火の発生から潮位変化に至るまでの一連の情報をどのように発信すべきか、そして発信する情報において、今般の潮位変化をどのように呼称すべきか、という観点から、

- (課題1) 勉強会で判明したメカニズムから、火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化に対しては、どのような情報により注意警戒を呼びかけるべきか。
- (課題2) 防災対応に資する観点から、発信する情報において、今般のような潮位変化をどのように呼称すべきか。
- (課題3) 海外における大規模噴火の発生から日本で潮位が変化するまでの間、防災対応に資する観点から、どのような内容の情報を、どのようなタイミングで発信すべきか。

について具体的な検討を行った。

なお、本検討会では、気圧波以外の、山体崩壊といった火山現象が直接の原因となる潮位変化に対してどのような対応ができるのかについても、現時点の状況を整理した。さらに、監視・評価に資する技術開発等、中長期的に取り組むべき課題への対応方針についても議論を行った。

3. 気象庁が発表する潮位変化に関する情報について

本検討会は、まず、気象庁が発表している潮位変化に関する情報を整理した(資料4)。

気象庁は、潮位変化の成因やとるべき防災対応等に応じて、津波警報・注意報、高潮警報・注意報、副振動に関する潮位情報等により情報提供を行っている(資料5)。また、これらの情報に基づく防災対応は、内閣府による「避難情報に関するガイドライン」に記載されている。

火山噴火に伴う潮位変化については、当面の対応として「津波警報・注意報を活用して情報発表を行う」こととした。火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化については、その特徴(浅水長波、周期数分から数十分等の性質を持つ)は津波とほぼ同じである。

これらの場合においても、潮位変化により住民の身体財産が危険に晒されるおそれがあることには変わりがないため、「遠地地震による津波の場合と同様の対応をとる」旨が、内閣府・消防庁より各都道府県宛てに通知されている¹。

遠地津波、高潮、副振動とトンガ諸島の火山噴火に伴う潮位変化について、被害の観点から比較したものが資料6である。現象によっては、より大きな潮位変化が発生した事例もあるが、ここでは比較のため、潮位変化量の似た事象を例として挙げている。トンガ諸島の火山噴火に伴う潮位変化は、平成 22 年のチリ中部沿岸の地震による津波(遠地津波)のように日本国内の広域にわたって被害が発生する一方、高潮は台風等の通過した地域、副振動は主に地方・都道府県単位といった比較的狭い地域で被害が発生する事象といえる。

このように、海外での火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化は、地震による津波と発生源や伝播範囲などの共通点が多く、猶予時間等の観点から防災対応も共通点が多い。

¹ 令和 4 年 3 月 8 日付内閣府・消防庁発各都道府県宛て通知「津波における避難指示発令等について」

4. 火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化に関して入手可能なデータ・情報と活用可能性

火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化に関して、気象庁において入手可能なデータ・情報とその活用の可能性について検討した。これらについて、火山噴火からの時間経過に沿って述べる。

(1) 大規模噴火の覚知

海外における大規模噴火を覚知するためには、全世界の火山噴火に関する情報を速やかに収集する必要がある。現在利用可能な情報としては、航空路火山灰情報（VAA）²がある。この情報に含まれる噴火発生時の時刻と噴煙高度に関する情報を活用することで、潮位変化を伴う可能性がある大規模噴火の覚知に活用することが可能である。

特に気象庁は、東京 VAAC の運用を担っており、主に気象衛星ひまわりの情報を利用して責任領域内の火山の噴火を監視し、VAA 等を発表している。その他の領域については、他 VAAC から入手している VAA の活用が可能である。

(2) 「気象衛星ひまわり」の輝度温度画像

トンガ諸島の火山噴火後の気象衛星ひまわりの画像を時間差分処理した画像により、地球規模で同心円状に広がる明瞭な波動の伝播³が捉えられた。これは、気圧を直接観測しているものではなく、気圧変化に伴う輝度温度の時間的な変化を可視化したものである（資料7）。

同じ手法にて気象衛星ひまわり8号の運用開始（平成27年7月7日）以降に発生した大規模噴火⁴時の画像を確認したところ、福徳岡ノ場の噴火（令和3年8月13日）やベズィミアニ（ロシア）の噴火（令和4年5月28日）で、トンガ諸島の火山噴火後と同様の同心円状の輝度温度の変化を確認した。一方、その円が明瞭に見えるのは噴火地点の周辺のみで、円の広がりや継続時間も短いものであり、トンガ諸島の火

² 航空路火山灰情報（VAA：Volcanic Ash Advisories）：噴火による火山灰が航空機の運航に与える影響を回避するために発表される、航空路上の火山灰情報（火山灰の分布や拡散予測）。国際民間航空機関（ICAO）の指名を受けて世界に9か所設置されている航空路火山灰情報センター（VAAC：Volcanic Ash Advisory Centre）が発表する。気象庁は、この9か所のVAACの1つ（東京VAAC）として、東アジア・北西太平洋及び北極圏の一部に対する監視と情報提供を担当している。

³ ひまわり8号が10分毎に観測したフルディスク画像のうち、対流圏上中層の水蒸気に感度のあるバンド10の画像の輝度温度について、時間差分の差分（2階微分に相当、輝度温度の時間的な変化を強調）をして作成した画像。時間変化を±2.0Kの範囲で階調割当（正が白、負が黒）。（「津波予測技術に関する勉強会」報告書 図表集 図2）

⁴ 噴煙高度約15,000m（50,000フィート）以上の噴火のうち、「ひまわり」の観測範囲の20件。

山噴火で生じたような、明瞭なまま地球を1周するような規模ではなかった(資料8)。

このような解析と同様の衛星画像の時間差分データは、広範囲に広がる気圧波を検知するための非常に有効なツールとして期待できる。しかし、現時点では、潮位変化の発生の可能性の高まりを判断する目的で、火山噴火に伴う気圧波に対応する明瞭な変化を解析するには、特定の時刻の衛星画像だけではなく、一連の時系列データから時間差分した画像を複数枚作成し、同心円状の変化が、噴火した火山近傍で消滅せずに広がり伝播していくことを確認する必要があること等から、解析には火山噴火後概ね数時間程度の時間が必要と想定されること、また、処理画像には気圧波以外の擾乱も見られ、見極めに一定のスキルを要することにも留意する必要があり、今後の技術開発が必要である。

(3) 海外の気圧データ

海外の気圧データについては、世界気象機関(WMO⁵)等の枠組みにおいて、国際的に交換されている地上気象観測データ(SYNOP⁶、METAR⁷等)があるが、通報間隔や観測データのサンプリング間隔が30分より長く、周期が10分から30分程度の火山噴火に伴う詳細な気圧変化を捉えることができず、火山噴火に伴う気圧変化の監視に利用することは難しい(トンガ諸島の火山噴火の事例で、国内の気圧波(ラム波)による気圧変化の周期は30分程度)。

(4) 海外の潮位データ

海外の潮位データについては、WMO及びユネスコ政府間海洋学委員会(IOC⁸)の枠組みにより、沖合観測データも含め太平洋全域の津波観測データが国際的に交換されており、リアルタイムで入手可能である。遠地地震による津波では、海外の潮位観測点で観測された津波の高さについて情報提供を行っており、火山噴火等においても、海外の潮位データを用いて潮位変化を監視し、地震による津波と同様、情報提供に利用することは可能である(資料9)。

(5) 国内の気圧データ

国内の気圧変化については、155か所の気象官署等において、サンプリング間隔10分以下の間隔でデータを観測している。観測データはリアルタイムで監視することが可能で、明瞭な気圧変化を観測した場合には、情報提供することが可能である。

一方、気圧は気象状況でも変化することから、火山からの伝播と説明できる時間帯

⁵ WMO : World Meteorological Organization : 世界気象機関

⁶ SYNOP : 地上実況気象通報式(通報間隔の短い地点で正時毎)

⁷ METAR : 定時飛行場実況気象通報式(正時毎又は正30分毎)

⁸ IOC : Intergovernmental Oceanographic Commission : ユネスコ政府間海洋学委員会

に、気象の要因で気圧変化が生じているかどうかの確認も必要である(資料 10)。

(6)国内の潮位データ

国内には沿岸・沖合合わせて約 400 地点の潮位観測点があり、現時点においても、それらの観測点の潮位データはリアルタイムで監視することが可能で、津波を観測した場合には、津波警報・注意報の発表判断に活用するほか、津波観測に関する情報として速やかに発表することが可能である(資料 11)。

5. 火山噴火等による潮位変化に関する情報のあり方

5-1. 火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化に関する情報のあり方

前章までの整理を踏まえ、火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化に関する情報のあり方に関し、課題としていた以下の3点について、検討結果をまとめた。

(課題1)勉強会で判明したメカニズムから、火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化に対しては、どのような情報により注意警戒を呼びかけるべきか。

- 避難等の防災対応を促す等の警戒を呼びかけるものであるから、副振動に関する潮位情報のような「情報」ではなく、「警報・注意報」を用いることが適切である。
- 潮位変化に関する警報・注意報には「津波警報・注意報」、「高潮警報・注意報」、もしくは新たに創設する「警報・注意報」を用いることが考えられる。防災情報全体として、情報の種類は少なくシンプルであることが望ましいとされていることから、発生頻度の低い現象に対して新たに「警報・注意報」を創設するのではなく、既存の情報体系を用いて発表することが適切である。
- トンガ諸島の火山噴火に伴う潮位変化による被害は、注意報クラスの津波の被害形態と矛盾しないものであった。火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化は地震に伴う津波と発生源や伝播範囲などの共通点が多く、防災対応の時系列も共通点が多い。
- また、火山噴火等による潮位変化は、気圧波に起因するもの以外に、地形変化による津波も同時に発生するおそれがあり、これらの津波が複合的な事象となって分離できない可能性がある場合、この潮位変化と津波の両方に対して同時に警戒を呼びかける必要がある。

以上のことから、当面の対応の通り、「津波警報・注意報」の仕組みを活用して注意警戒を呼びかけることが適切である。

(課題2)防災対応に資する観点から、発信する情報において、今般のような潮位変化をどのように呼称すべきか。

- 火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化は、学術的な分類としては気象津波に分類される(高野,2014)が、一般的にはこの言葉は理解しづらい。
- 今般の潮位変化の特性は、地震に伴う津波と同等(浅水長波、周期帯(数分から数十分程度))であり、小型船舶の転覆、養殖被害といった状況は、津波(注意報クラス)の被害形態と矛盾しない。

- 情報文中の呼称は、住民や防災関係機関等が適切な防災対応を行うため、理解のしやすさを重視すべきである。
- 津波警報・注意報の仕組みを活用して注意警戒を呼びかける。

以上のことから、同様の現象については「遠地地震に関する情報」から津波警報・注意報等の一連の情報発信の中では「津波」と呼ぶことが適切である。

(課題3) 海外における大規模噴火の発生から日本で潮位が変化するまでの間、防災対応に資する観点から、どのような内容の情報を、どのようなタイミングで発信すべきか。

噴火した火山の位置によっては、大規模噴火の発生から日本で潮位が変化するまで、一定の猶予時間がある。この猶予時間中に、沿岸住民が潮位変化発生の可能性を引き続き認識し、地方自治体等が防災対応の準備の判断を行うことができるようにするため、噴火から津波警報・注意報の発表までの、途中段階での情報提供を充実させることが重要である。また、予測が難しく、警報・注意報が、潮位の観測値を基に発表される現象であることから、防災上の準備のために、この猶予時間を活用して十分な情報発信や解説等を行うべきである。

なお、課題1を踏まえて津波警報・注意報の仕組みを活用して注意警戒を呼びかけることから、この間に発表する情報については、新たな情報を作るのではなく、当面「遠地地震に関する情報」を用いることが適当である。

この猶予時間中に提供すべき情報の内容及び発表タイミング等の考え方は以下の通り。

(1) 大規模噴火が発生した際の情報

まずは、津波への防災対応が必要となる可能性があることを伝えることが重要である。このため、気圧波等に起因する潮位変化を発生させる可能性のある大規模噴火を覚知した場合には、その旨の情報を提供すべきである。

また、気圧波にはラム波や(大気重力波の一つである)内部重力波などの波があるが、大きな潮位変化を励起するのがどの気圧波であるかは現段階では不明であることから、防災対応のタイミングの想定のために、最も速い気圧波(ラム波)の到達時刻を、潮位変化が発生する可能性のある時刻(津波の到達予想時刻)として情報提供することが適当である。

津波到達までの時間が長い場合には、今後の情報収集の目安となるよう、続報を発表する時刻の目安等を併せて周知することも、防災対応のための心構えを継続させるのに効果的であると考えられる。

(情報提供内容)

- ・大規模噴火の発生時刻
- ・気圧波(ラム波)の伝播速度に基づく津波の到達予想時刻
- ・次回の情報発表目安時刻

(情報発表条件)

今般のような気圧波に起因する潮位変化を発生させる可能性のある大規模噴火の発生を早期に把握するには、4.(1)で示したVAAに基づく噴煙高度情報を用いる他にない。また、令和4年1月のトンガ諸島の火山噴火の際のVAA第1報は約16,000m(52,000フィート)であり、気圧波に起因する潮位変化を発生させた大規模噴火のうち、近年の衛星観測が開始されて以降初めての事例であること、過去に気圧波に起因する潮位変化が発生した3事例(資料12)ではいずれも約15,000m(50,000フィート)以上であったことを踏まえ、これと同等程度の火山噴火を捉えられるよう、気象庁は、噴煙高度海拔約15,000m(50,000フィート)以上の火山噴火が発生した場合に情報提供を行うことが適当である。この場合、火山噴火の発生からVAAの入手、その後の情報発表までに1.5時間～2時間程度を要する。

(2)火山噴火等の発生から国内で潮位変化を観測するまでの間の情報

津波警報・注意報が潮位の観測値に基づいて発表される前に、情報の受け手が事前の対応の必要性をできるだけ検討できるよう、日本へ至る経路上の気圧や潮位等の観測値を基に、日本への潮位変化の可能性が高まったかどうかについて情報提供することが望ましい。また、第1報発表以降も引き続き後続の情報へ注意を向けることができるよう、観測状況に変化が無くても定期的に情報提供すべきである。

提供すべき情報と利用上の留意点は次の①～④の通り。

① 海外の潮位変化

発生要因を問わず、海外の潮位観測点で潮位変化が観測された場合には、観測されない場合と比較して、潮位変化が日本にも伝わる可能性が高まったといえることから、観測した旨を情報提供すべきである。

一方、トンガ諸島の火山噴火の事例のように、気圧波に起因する潮位変化では日本へ至る経路上の潮位観測点での潮位変化は小さかったが、日本付近で有意に大きくなったほか、太平洋各国の状況や、島の有無等により、観測点の配置には偏りがあるうえ、データが欠測することもあることに留意が必要である。

② 気象衛星ひまわりによる解析

気象衛星ひまわりによる解析において明瞭な同心円状の輝度温度の変化が伝播していることが解析された場合は、解析されない場合と比較して、気圧波に起因する潮位変化が発生する可能性が高まったといえることから、その旨を情報提供すべきである。

一方、輝度温度変化と気圧変化の量的な関係が明らかではないことから定量的な利用ができないことや、気象や画像データの条件によっては同心円状の変化の広がりが確認できない可能性もあることから、常に利用できるとは限らないことに留意が必要である。

③ 国内の気圧変化

国内の観測点で、火山噴火に伴う気圧波に対応すると考えられる気圧変化が観測された場合は、気圧波に起因する潮位変化が発生する可能性が高まったといえることから、その旨を情報提供すべきである。

一方、気圧波(ラム波)に対応すると考えられる気圧変化が観測されていなくても、その後に気圧波(ラム波)と比較して速度の遅い別の種類の気圧波(内部重力波)が到達する可能性があることから、「気圧波に起因する潮位変化が発生する可能性は低くなった」と言及するためには、気圧波(内部重力波)もしくはそれに起因する潮位変化が発生していないことを確認する必要がある。

④ 国内の潮位変化

国内の潮位観測点で潮位変化が観測された場合、その事実は避難を逡巡している人等に対して避難を促す有効な情報であるため、すみやかに情報発表する必要がある。またその場合は、潮位の観測値に基づき津波警報・注意報を発表することとし、(3)に後述する。

一方、気圧波(ラム波)の到達予想時刻を過ぎて以降も潮位変化が観測されていない場合には、その旨を情報提供すべきである。

(情報内容)

前述の①～④による観測結果を提供する。この中には、観測されていない場合の情報提供も含まれる。ただし、国内の潮位変化が観測された場合については(3)に後述する。

気圧波に対応する気圧変化や潮位変化が観測されない場合の情報提供は、「津波の心配はない」といった安心側のメッセージを含みうるが、情報を伝えないことよりも、観測結果を伝えたいうえで、潮位変化の可能性への注意の継続を促すことと合わせて情報提供を行うべきである。

また、火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化は稀な現象であることから、津波の発生に関係が深い通常と異なる潮位変化や気圧変化等の観測結果が得られた場合には、情報発表だけではなく、記者会見や報道発表といった報道機関を通じた解説や、自治体へのホットライン、SNS 等も活用するなど、その時点での状況を丁寧に解説すべきである。また、時々刻々と観測状況は変化するため、情報の内容が時間を追って更新されることや、一連の情報発信の流れも合わせて説明することが適当である。

(3) 国内の潮位変化観測後

住民等に避難等の防災行動を促すため、潮位変化を観測した際には、津波警報・注意報を発表する。

(発表タイミングと発表対象の津波予報区)

津波警報・注意報の発表タイミングと対象予報区については、以下の観点を考慮する必要がある。

- ・通常の地震による津波警報・注意報は、事前のシミュレーションによる各地の津波の高さの予測に基づき、高さの基準に応じて、津波予報区ごとに発表する。一方、火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化は高さの予測ができない。
- ・(2)の通り、津波警報・注意報発表タイミングよりも前から、潮位変化が発生する可能性がある旨を情報提供することが可能である。
- ・津波警報・注意報を発表した際の住民のとるべき行動は、通常の津波と同様とすることが適切。
- ・津波警報・注意報自体の信頼性を損なうような発表方法は避ける。
- ・科学的根拠に基づいた上で、住民の防災行動に資する内容とする必要がある。

これらを踏まえると、津波警報・注意報は、防災対応を行う時間を確保する観点からは事前に発表されることが望ましいものの、根拠のないまま発表しても受け手に受け入れられないことが想定される。また、避難等の行動を求める津波警報・注意報はしっかりと根拠に基づいて発表されるべきである。

このことから、以下のようにすることが望ましい。

- ・津波注意報の発表前の段階で、(2)のように十分な情報提供、解説を行った上で、
- ・津波注意報の発表基準(0.2m)の潮位変化を観測した場合に当該津波予報区に津波注意報を、津波警報の発表基準(1m)の潮位変化を観測した場合に当該津波予報区に津波警報を発表することを基本とする。
- ・ただし、気圧波の到達予想時刻に合わせて明瞭な気圧変化を観測し、それに整合するタイミングで明瞭な潮位変化を観測した場合等、その時点で得られている津波の要因となる観測結果と矛盾しない明瞭な潮位変化を観測した場合には、津

波注意報の発表基準(0.2m)に達していなくても当該津波予報区に津波注意報を発表する。

その後、潮位変化の観測状況に基づき、津波警報・注意報の基準を下回る状態が続いた場合に、津波警報から津波注意報への切替や、解除を行う。

なお、根拠が得られれば、事前に発表されることが望ましいことから、今後の科学の進展により、火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化についても、予測に基づく津波警報・注意報の発表を行うことが可能となるよう期待する。

(1)～(3)にかけて、どのような内容の情報を、どのようなタイミングで発信すべきかについて述べてきた。これら一連の情報発表の流れを資料 13 に示す。また、これを踏まえた情報発表例を資料 14 に示す。

なお、噴火した火山と日本との距離によって、火山噴火から最も早い到達予想時刻までの時間が変わることから、途中からの情報発表となるなど、情報発表の流れは変わる場合があることに留意が必要である。

5-2. 火山噴火や地震に起因する様々な潮位変化に関する情報と普及啓発

(1) 火山噴火や地震に起因する潮位変化に関する情報等の整理

5-1で検討した気圧波に起因するもの以外にも、火山噴火による地形変化や、火山の山体崩壊、海底噴火等の火山現象によっても潮位変化が発生する場合がある。このような火山現象による潮位変化について、地震による津波と比較しつつ、リードタイム⁹の長短、日本の陸地での揺れの有無に応じて、それぞれの現象の予測可能性と発表すべき情報内容や情報発表の困難さ、防災上の留意事項等を四つの場合に整理した(資料 15)。この分類に基づいて、全体を通じた留意事項等について後述する。

<1>リードタイムが短く、日本陸地での揺れがある現象

ア) 日本近海を震源とする地震による津波

<現象の検知と予測可能性>

- ・地震波形解析により、即時に現象の検知が可能。
- ・地震の震源の位置・規模から、津波の高さや到達時刻を予測可能。

<情報発表>

- ・地震発生後3分を目標に津波警報・注意報を発表、記者会見で呼びかけ。

<防災上の留意事項>

- ・地震の揺れを感じたり、津波警報等を見聞きしたりしたら直ちに避難。

イ) 日本の沿岸付近、島嶼部の火山活動による山体崩壊、海底噴火等に伴う津波

<現象の検知と予測可能性>

- ・常時観測火山においては、監視カメラの映像や、地震、空振をもとに津波を引き起こす可能性のある火山現象を検知できることがある(ただし、想定火口から離れた位置の場合や悪天候等、観測状況により困難であることも多い)。
- ・常時観測火山以外の火山においては、衛星画像により噴火による噴煙を検知できる可能性があるが、噴煙の下で発生している山体崩壊等の検知は困難(発生時刻が特定できないと、到達時刻の予測も困難)。
- ・津波の高さや到達時刻を予測できない。

<情報発表>

- ・潮位変化が観測される前の情報発表は極めて困難。
- ・津波の原因となる火山現象等を観測できた場合、原則として国内の潮位観測値に基づき津波警報・注意報を発表、記者会見で呼びかけ。

<防災上の留意事項>

⁹ リードタイム：本報告書では、潮位変化の成因となる現象、又はそれに起因する潮位変化が検知されてから、日本沿岸に潮位変化が到達するまでの時間を指す。

- ・地震の揺れや山体崩壊等を覚知したり、津波警報等を見聞きしたりしたら直ちに避難。

<2>リードタイムが短く、日本陸地での揺れない現象

ア) 海底地すべりによる津波、日本の沿岸付近や島嶼部の火山噴火による地形変化・海底噴火等に伴う津波¹⁰

<現象の検知と予測可能性>

- ・常時観測火山においては、監視カメラの映像や、地震、空振をもとに潮位変化を引き起こす可能性のある火山現象を検知できることがある(ただし、想定火口から離れた位置の場合や悪天候等、観測状況により困難であることも多い)。
- ・常時観測火山以外の火山においては、衛星画像により噴火による噴煙を検知できる可能性があるが、噴煙の下で発生している現象の検知や推定は困難(発生時刻が特定できないと到達時刻の予測も困難)。
- ・海底地すべりは、発生自体の検知が困難。
- ・津波の高さや到達時刻を予測できない。

<情報発表>

- ・潮位変化が観測される前の情報発表は、極めて困難。
- ・津波の原因となる火山現象等を観測できた場合、原則として国内の潮位観測値に基づき津波警報・注意報を発表、記者会見で呼びかけ。

<防災上の留意事項>

- ・津波警報等を見聞きしたら直ちに避難。

<3>リードタイムが長く、日本陸地での揺れない現象

ア) 遠地地震による津波

<現象の検知と予測可能性>

- ・地震波形解析により、即時に現象の検知が可能。
- ・地震の震源の位置・規模から、津波の高さ、到達時刻を予測可能。

<情報提供>

- ・地震発生後 30 分程度で、大きな地震が発生したことや、日本への津波の有無(調査中含む)について発表。
- ・海外の潮位観測点で潮位変化が観測された場合等に、続報を発表。
- ・日本への津波到達の2時間程度前を目途に津波警報・注意報を発表、記者会見で呼びかけ。
- ・日本への津波の影響がないことが分かった場合は、その旨を発表。

¹⁰ 噴火中のため、揺れでの覚知が困難な山体崩壊などを含む。また、海底噴火なども場所により揺れを感じない場合もある。

＜防災上の留意事項＞

- ・津波警報・注意報よりも前の情報に留意し、避難の心構えと準備。
- ・津波警報等が発表されたら直ちに避難。

イ) 海外の火山噴火による地形変化や気圧波に伴う津波、海外の火山の山体崩壊等や海底地すべりに伴う津波

＜現象の検知と予測可能性＞

- ・VAA 等により、火山噴火や山体崩壊等、津波の原因となる現象の発生時刻が分かれば、津波の到達時刻は予測可能。
- ・津波の高さを予測できない。

＜情報発表＞

- ・火山噴火や山体崩壊等の発生時刻が分かる場合には、到達予想時刻や津波の原因となる火山現象等の観測の状況について随時発表。
- ・津波の発生に関係が深い通常と異なる観測結果等が得られた場合には記者会見等で解説。
- ・津波の原因となる火山現象等を観測できた場合、原則として国内の潮位観測値に基づき津波警報・注意報を発表、記者会見で呼びかけ。

＜防災上の留意事項＞

- ・発生時刻が分からなければ、潮位変化が観測される前の情報発表は困難なことがある。
- ・津波警報・注意報よりも前の情報に留意し、避難の心構えと準備。
- ・津波警報等が発表されたら直ちに避難。

以上から、火山現象や地震による潮位変化に関する防災上の留意事項は以下のように整理できる。

- ・リードタイムが短い事象には、海や川の河口近くで揺れを感じたら（火山の山体崩壊や海底噴火を覚知したら）、又は津波警報等を見聞きしたら、直ちに避難することが重要である（＜1＞、＜2＞）。
- ・リードタイムが長い事象のうち、予測が一部でも可能な現象については、情報が随時更新されることを認識し、最新の情報を入手して避難などの準備を行い、津波警報等を見聞きしたら、直ちに避難することが重要である（＜3＞）。

(2) 火山現象や地震により発生する潮位変化に関する普及啓発・解説

火山現象による津波には、気圧波に伴う津波をはじめ様々な事象が存在するが、発生頻度は地震による津波に比較して低い。また、事象の発生から津波到達までの時間が極めて短い場合もある。大規模噴火による地形変化や気圧波に伴う津波等の

稀な現象の具体について、住民等が平時から理解することは困難である。このことを踏まえ、平時の普及啓発及び現象発生時の丁寧な解説が重要である。

<平時の普及啓発>

火山現象による津波についても、基本的には、住民が最終的にとるべき行動は地震による津波の場合と変わらず、繰り返し、次のように普及啓発を実施することが望ましい。

- ・地震による津波以外にも、火山現象による津波といった、様々な要因で発生する津波があることを周知。
- ・津波に対する情報発表のシナリオのうち、典型的なもの(資料 16)について解説・情報提供を実施。
- ・これまでの津波からの避難(※)に関する普及啓発活動を継続的に実施。

※ 海や川の河口近くで揺れを感じたら(情報がなくとも)直ちに避難

(揺れを感じなくても)津波警報等を見聞きしたら直ちに避難

- ・ただし、火山現象による津波は予測できないものも多く、突発的に発生し、事前の情報提供が困難なことが多いこともあわせて周知。

特に、山体崩壊等の火山現象から津波到達までの時間が極めて短い国内の火山では潮位変化の発生前の情報提供が困難なことが多い。しかしながら、海や湖等の地理的条件や海外を含めた類似火山での発生事例などを参考に、火山現象による津波発生の可能性について、事前に評価することが可能な場合もある。津波発生の可能性が高い火山、火山現象から津波到達までの時間が極めて短い火山では、津波発生の可能性についての平時からの普及啓発等が特に重要であり、このような火山周辺の地域では、現象発生時にとるべき行動を事前に検討しておくことが望ましい。

<事象発生時の解説>

現象の発生が覚知できリードタイムが長い場合には、情報発表のほか、類似の典型的なシナリオを示すなどして、以下のようなさまざまな方法で、丁寧な解説、情報提供を行うことが重要である。

- ・記者会見や報道発表など、報道機関を通じた解説
- ・自治体へのホットラインによる解説
- ・自治体に災害対策本部が立ち上がる等の場合に自治体に派遣される JETT(気象庁防災対応支援チーム)による自治体支援
- ・SNS 等を活用した情報提供

特に、津波の高さや到達時刻の予測が困難な現象については、現象発生から津波注意報等を発表する前までの間に行う情報発表や解説が重要である。

6. 中長期的な課題

最後に、今後解決すべき中長期的な課題について検討した結果を述べる。

(1)「遠地地震に関する情報」の情報名称の変更

現在は、大規模噴火の発生や気圧波(ラム波)の伝播速度を仮定した津波の到達予想時刻を含め、「遠地地震に関する情報」を用いて、火山噴火等に伴う潮位変化が観測される可能性がある旨を発表している。しかし、「遠地地震に関する情報」という名称は、津波関連の情報であると理解されにくい。また、火山噴火であっても、情報文に「地震が発生」という文言が含まれるのは、誤解を招く。また、火山噴火等により発生する潮位変化についても、遠地地震により発生する津波についても、とるべき防災行動は変わらないことから、シンプルに1つの情報で発表されることが望ましい。

以上のことから、受け取った住民や自治体が何のための情報なのかがわかりやすいよう、「津波に関するその他の情報」等といった「津波」の文言が含まれる情報となるように、「遠地地震に関する情報」の名称を変更し、火山噴火等による潮位変化のほか、遠地地震により発生する津波についても同じ情報で発表できる形とすべきである。一方で、情報名称の変更は、情報の受け手側のシステム改修を強いることになるため、中長期的に検討していくことが望ましい。

(2)潮位変化を生じさせる可能性がある火山噴火を絞り込む方策

海外機関から得られる情報が限られていることや即時的な判断の必要性に鑑み、現在気象庁は、5-1(1)で述べたとおり、火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化に注意を呼びかける対象として、VAA から得られる噴煙高度の情報のみを活用し約 15,000m(50,000 フィート)以上の火山噴火があった場合としている。この方法では、過去 10 年間で約 40 事例が当てはまることになる(資料 17)。一方、火山から遠く離れた場所で潮位変化が観測された事象は、判明している中では約 150 年で2~3回と発生頻度が低い。情報が年4回程度発表されるにも関わらず、その情報発表の約 200~300 回に1回程度しか日本に影響のある潮位変化が生じないということは、海外の火山で大規模噴火が発生し、津波が発生する可能性があるという情報への信頼性の低下が生じかねない。

潮位変化の可能性のある噴火を絞り込む方策としては、噴煙高度のより高度な計測(特に対流圏界面以上の高度)、噴煙継続時間、噴煙の大きさや拡大速度(火山噴火に伴う噴煙が傘型となっている領域の大きさ・速度)等の基準を活用することが考えられる。しかし、それらの基準を活用するためには、大規模噴火を短時間に評価する科学的な知見の蓄積と、必要な情報の入手手段の確保が課題となるため、さらなる調査研究や検討が必要である。

さらに、どの程度の気圧波が潮位変化を引き起こすのか、伝播速度の解析により

どの気圧波の種類が発生しているのか等、潮位変化発生判断の精度を向上させるため、気象衛星ひまわりの画像解析技術の高度化についても検討する必要がある。

(3) 沖合の海底水圧計等の活用方策

トンガ諸島の火山噴火に伴い、日本周辺の沖合の潮位観測点(海底水圧計、GPS波浪計)において、最大で0.1~0.2m程度の潮位変化が観測された(例えば、気象庁,2022や資料18)。しかし、第1波の観測値は極めて小さく、津波かどうかの判別が困難であった。特に、海底水圧計のデータは、気圧変化と潮位変化が混在している可能性があり、両者の識別が困難であると考えられる。また、潮位変化の詳細なメカニズム等が明らかでないため、地震による津波で用いている、沖合の海底水圧計等の観測値から沿岸の津波の高さを換算する関係式はそのまま用いることが適切か、検討が必要である。

一方、沖合の海底水圧計等を個々の観測点ではなく面的に活用することで、面的な潮位変化として捉えられる可能性があることから、今後、リアルタイムでの観測や予測への活用を目指して、調査や技術開発を進める必要がある。

(4) 新たな観測データの入手・活用

気圧波の監視には、通報間隔や観測データのサンプリング間隔が短く(10分程度以下等)、短周期の変動から長周期の変動まで観測可能な気圧データが必要である。海外機関が保有する気圧データのうち、この条件を満たす監視や情報に活用できるデータのリアルタイムでの入手方法について引き続き検討する必要がある。

海外機関が保有する気圧データのリアルタイムでの入手は現状では困難であるものの、まず予測や監視に有効に活用できるデータなのか、といったデータの特性等について調査・検討する必要がある。

(5) 発生している要因に関わらず地震や火山噴火による潮位変化に注意警戒を呼びかける方策

ここまでの地震や火山噴火による様々な要因で発生する津波があること述べてきた。今回議論した以外にも、実際に発生している潮位変化の成因が分からないものの、注意警戒が必要な事象が発生した際に、どのように呼びかけるかを継続的に検討していく必要がある。また、引き続き、津波予測精度の向上に取り組むほか、潮位変化を発生させるメカニズムの判明や、潮位変化を生じさせる可能性がある火山噴火の絞り込み等の科学の進展等があった際には、随時、情報内容の改善を検討していく必要がある。

7. まとめ

本検討会では、火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化に対して、大規模噴火の発生から国内における潮位変化に至るまでの一連の情報が、防災対応に資する観点からどのようにあるべきか、またその発信をどのように行うべきか検討し、本報告書としてとりまとめた。

今般の事例のような稀な現象の具体については、平時から理解を求めることは困難であることから、特に猶予時間がある場合には、より丁寧な解説や情報提供を行うことで、住民や自治体等の防災対応につなげていくことが最も重要である。

火山噴火により発生した気圧波に起因する潮位変化に対する情報提供の流れは、以下のとおりである。

- ・噴煙高度約 15,000m(50,000 フィート)以上の大規模噴火が観測された場合に、気象庁は、当面、「遠地地震に関する情報」を活用し、潮位変化を「津波」と呼称した上で、その発生可能性について情報発表する。
- ・気象衛星ひまわりによる解析で、明瞭で広範囲に伝播する気圧波が覚知された場合、気象庁は、「津波発生の可能性が高まった」という内容を含む情報を発表する。
- ・気象庁は、基本として、国内での潮位の観測値が津波警報や津波注意報の基準を超えたタイミングで、津波警報・注意報を発表する。ただし、明瞭な気圧変化を観測し、それに整合するタイミングで明瞭な潮位変化を観測した場合等、その時点で得られている津波の要因となる観測結果と矛盾しない明瞭な潮位変化を観測した場合には津波注意報を発表し、観測値が基準を超えたタイミングで津波警報を発表する。
- ・気圧波(ラム波)の到達予想時刻を超えた時刻に情報を発表する場合は、津波の観測結果を情報の内容に含める。その際、潮位変化が観測されていない場合は、引き続き注意を継続するよう呼びかけを行う。
- ・気圧波(内部重力波)によって生じる潮位変化が観測されなければ、津波の心配はないと言える(地形変化等による潮位変化の可能性は別途考慮する)。

また、火山噴火による気圧波以外にも、山体崩壊等の火山現象により潮位変化が発生する場合があります。このような現象についても観測結果を基に津波警報・注意報を発表することから、火山現象や地震により発生する潮位変化に対する情報発表シナリオ及び防災上の留意事項の整理を行った。

このような発生頻度が低い稀な現象であっても防災対応につなげるためには、様々な要因で発生する津波があり、予測困難で突発的に発生することがあること、また、典型的な情報発表シナリオやとるべき行動について解説・情報提供するといった平時の普及啓発のほか、現象発生時には、現象の説明や典型的な情報発表シナリオを示すなどした記者会見等での丁寧な解説が重要である。

8. 終わりに

本検討会でとりまとめた内容は、現時点で判明しているメカニズムや利用可能なデータ等に基づいたものである。今般のトンガ諸島の火山噴火による潮位変化については、現在も大学、研究機関等によって調査・研究が行われているところであり、今後、新たな研究成果が発表されることが期待される。

気象庁は、中長期的に取り組むべき課題の解決に取り組むほか、そのような新たな研究成果を取り込んだ、より適切な情報のあり方を検討し続けることが重要である。また、気象庁の発表する情報が十分に理解されるよう、沿岸住民に対する普及啓発にしっかり取り組むことで、情報が有効に機能することを期待したい。

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 開催履歴

第1回検討会(令和4年5月10日開催)

議題:

1. 「津波予測技術に関する勉強会」の報告を踏まえた検討課題・論点の整理
2. 現在発表している情報や監視可能なデータ等の整理

第2回検討会(令和4年6月7日開催)

議題:

1. 火山噴火による潮位変化に関する情報内容の検討
2. 火山噴火の発生から潮位変化の発生までの間の情報内容の検討
3. 火山現象のうち、気圧波以外に起因する潮位変化に対する対応の整理

第3回検討会(令和4年6月28日開催)

議題:

1. 火山噴火等による潮位変化に関する情報のあり方について
2. 報告書(案)について

参考文献

- ・ 津波予測技術に関する勉強会:フンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山の噴火により発生した潮位変化に関する報告書. 2022
(https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/tsunami/tonga-houkokusho/houkoku_honbun.pdf)
- ・ 内閣府:「避難情報に関するガイドライン」(令和3年5月改定、令和4年6月更新)
(https://www.bousai.go.jp/oukyu/hinanjouhou/r3_hinanjouhou_guideline/)
- ・ 気象庁:令和4年1月 地震・火山月報(防災編)
(<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/gaikyo/monthly/202201/202201index.html>)

- ・ 国土交通省:災害情報, 令和 4 年 1 月 15 日 13 時頃のトンガ諸島付近のフンガ・トンガ - フンガ・ハアパイ火山の大規模噴火に伴う潮位変化について (第 6 報)
(<https://www.mlit.go.jp/common/001459742.pdf>)
- ・ 内閣府:チリ中部沿岸を震源とする地震による津波について (平成 22 年 4 月 23 日 16 時 30 分現在)
(https://www.bousai.go.jp/updates/pdf/100423_chile_tsunami08.pdf)
- ・ 高野洋雄 (2014) : 新用語解説 気象津波 (Meteo-tsunami) , 天気, 61 巻 6 号.
- ・ ウィンチェスター, サイモン; 柴田裕之 訳 (2004) : クラカトアの大噴火ー世界の歴史を動かした火山. 早川書房. ISBN 4-15-208543-6
- ・ 和田雄次:気浪及海浪ノ説『日本地震学会報告 第三冊』(明治 19 年発行)
- ・ 村山信彦 (1969) : 1956 年 3 月 30 日のベズイミヤン火山大爆発による気圧振動の伝搬と火山灰の移動, 験震時報, 33, 1-11.
(<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/kenshin/vol33p001.pdf>)
- ・ Lipman, P. W. & Mullineaux, D. R. (Eds.) (1981): The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1250, 844p., 1 plate.
(<https://pubs.usgs.gov/pp/1250/report.pdf>)
- ・ 野村・玉城 (1993) : ピナトゥボ火山噴火後に沖縄地方でみられた現象について, Journal of Meteorological Research Vol. 45, No. 6, 229-240.
- ・ National Geophysical Data Center / World Data Service: 「NCEI/WDS Global Historical Tsunami Database」
(<https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/runup-search>)
- ・ 渡辺 偉夫 (1983) : 改訂日本およびその周辺の津波の表, 地震 第 2 輯, 36 巻 1 号, 83-107.
- ・ Prime Minister's Office, Government of The Kingdom of Tonga: 「FIRST OFFICIAL UPDATE FOLLOWING THE VOLCANIC ERUPTION」 (2022-01-28)
(<https://pmo.gov.to/index.php/2022/01/28/first-official-update-following-the-volcanic-eruption>)