

# 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

綿田辰吾

わただ しんご

東京大学地震研究所(地震学・津波) watada@eri.u-tokyo.ac.jp

フンガ噴火では、全世界に音速で大気波動が広がり、海域では津波が発生した。通常の津波の速度を超えた津波が遠地まで到達したのは、1883年インドネシア・クラカタウ火山噴火以来である。日本沿岸では津波初動から2~6時間遅れて最大振幅の津波が到来している。火山噴火に伴う大気波動起源の津波予測に向けて、この遅れた最大波高の発生メカニズムの解明が急がれる。

2022年1月15日14時30分(協定世界時UTC、以下同じ)頃に発生したフンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山の大規模噴火(以下、フンガ噴火)により、津波が発生して太平洋全域で観測された。通常の巨大地震や海底地滑りで発生する津波と異なり、日本に到来した津波は、気象庁が想定していた到来よりも3時間以上早かった。また、最大波高は最初に到来した津波から2~4時間遅れて到来し、その振幅が奄美と久慈では1mを超えた<sup>1</sup>。

Delayed peak amplitude of the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption tsunami  
Shingo Watada

トンガから日本への経路上にある南太平洋の島々での潮位を監視していた気象庁は、1mを超えるような津波がないため、津波注意報を津波到達前に発令しなかった。1883年インドネシア・クラカタウ火山噴火時にも同様の津波が発生したことが知られている。本稿では、観測事例を紹介しつつ、過去に提唱された大気波動起源の津波の発生の原理を紹介する。

## フンガ噴火による気圧波の発生

フンガ噴火では、2022年1月15日に発生した大規模噴火時刻の前後にあたる4時14分15秒にM5.8地震(米国地質調査所による)が発生した。日本の静止気象衛星ひまわり8号はフンガ噴火の最初の映像を4時10分に撮影している。ただし衛星画像には10分以下の時間分解能はない。火山灰を含んだ噴煙傘は、高度30kmまで上昇、直径400kmまで拡大し、4時50分には一部が高度50km超の成層圏上部まで達した<sup>2</sup>。噴火により発生した気圧波は地球を周回し、その様子は

地上気圧計によって計測された<sup>3,4</sup>。Yuenらは世界に分布する500を超える気圧計記録から気圧波到達時刻と最大振幅時刻を読み取り、回帰分析により、その伝播速度(314 m/s)を決定し、直近(距離756 km)の観測点の気圧波形から、大気音波は4時2分から発生し始め、大気ラム波(後述)の出現時刻は4時15分、最大振幅のラム波を発生させたと考えられる大規模噴火は4時30分にピークを迎えたとした<sup>5</sup>。最初の大気音波の発生時刻は遠地震記録の最初の地震P波読み取り時刻とも合致する<sup>5</sup>。大気ラム波伝播シミュレーションと観測された圧力波形を比較し最大波の発生時刻を4時30分としたAmoresらの結論<sup>4</sup>とも整合的である。また、Themensら<sup>6</sup>は世界に分布する4000台以上で記録された全球測位システム(Global Navigation Satellite System, GNSS)信号から大規模電離層擾乱が電離層伝播する速度を推定し、最大電離層擾乱発生時刻を4時32分と推定している。

## 津波を引き起こした大気波動

フンガ噴火前後の合成開口レーダー画像を比較すると、噴火後に直径1 kmを超えるフンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山島(南緯20.536度、西経175.382度、米国スミソニアン自然史博物館ホームページ、2022による)が消失している<sup>7</sup>。火山島の大規模火山噴火により津波が発生し、近隣のトンガタブ島内北西部では波高15 mに達する津波が到来した。この津波が海域を伝って伝播するよりも早く、噴火により発生した大気圧力波がほぼ310 m/s(成層圏・対流圏の平均温度の音速)で伝わった<sup>8</sup>(図1)。この大気圧力波は海面や地面に沿って伝わる境界波の一種で、ラム波と呼ばれる。

ラム波は圧縮性があり音速で伝わるが、純粋な音波ではなく、重力下で水平境界に沿ってのみ存在する。地球の大気と海の場合、ラム波の伝播速度は津波の速度よりも速い。海面の圧力擾乱の伝播速度が、水深から決まる津波速度よりも速い場合、海面の圧力擾乱の移動とともに海面上昇が同じ速度で追従することが知られている<sup>9</sup>。実際、

深海底に設置された津波計では、ラム波と同じ速度でトンガから広がる海面高変化を測定している(図2)。海面(陸上)と深海底の圧力変動の振幅は、海底での圧力変動の方が2倍以上大きい。これはラム波と接する海面が盛り上がっていることを意味する。通常の高気圧・低気圧のようなゆっくりと移動する気圧変動では海面補償が働き、気圧の増大分を打ち消すように水位が下がり、海面高変化は海底圧力計測式の津波計に記録されない。風吹により生じる海面の波は、水深と比べてずっと短波長のため、海底まで届かずやはり深海洋津波計に記録されない。

図3では東日本周辺を例にとり、深海域の津波計記録と沿岸の潮位計記録、さらにラム波を記録している気圧計記録を同じ時間軸で比べている。津波計記録にある↓は、トンガから到来する通常の津波の到達予測時刻である。日本へは予測より3時間以上前に津波が到達している。深海域では、津波初動は海面気圧変動とほぼ同じ波形をしているが、大きさが2倍以上違うことが確認できる。沿岸に設置されている潮位計で測定すると、沿岸では津波初動はラム波到達から30分から1時間程度遅れて到達している。このことは、深海域でラム波とともに伝わってきた初動津波は浅海域に入ると急速に遅くなることを示している。

気圧波形では、大振幅のラム波以後は、地球を周回するようなラム波を除き(図1)、ラム波に匹敵する気圧波は見られない。一方、深海域の津波波形はラム波の到着後もほぼ同様な振幅の変動を繰り返し、沿岸潮位計記録では津波初動振幅を超えるような津波が初動から2~6時間経過後に到来している。津波を予測し津波被害軽減につなげるには、この遅れてくる最大振幅波の発生メカニズムを解明する必要がある。

沿岸潮位を世界的に見ると、津波初動到達時刻は海陸分布に関係なく、フンガ火山から307 m/sの速度で伝播している<sup>10</sup>(図4a)。津波初動の振幅はフンガ火山近傍を除き、特定の地域特性は見られない(図4b)。最大波高は環太平洋沿岸やトンガ付近、いくつかの諸島で大きくなっている(図4d)。

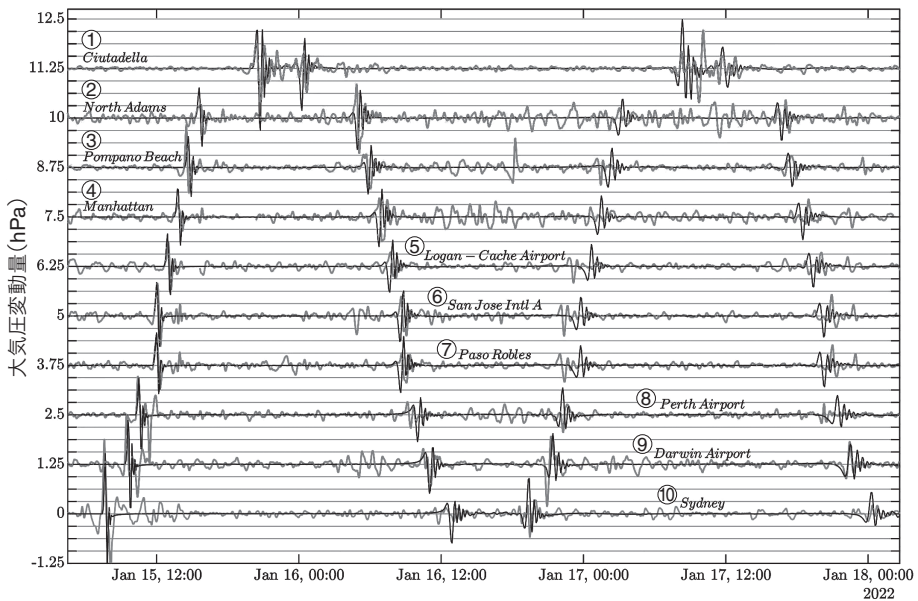
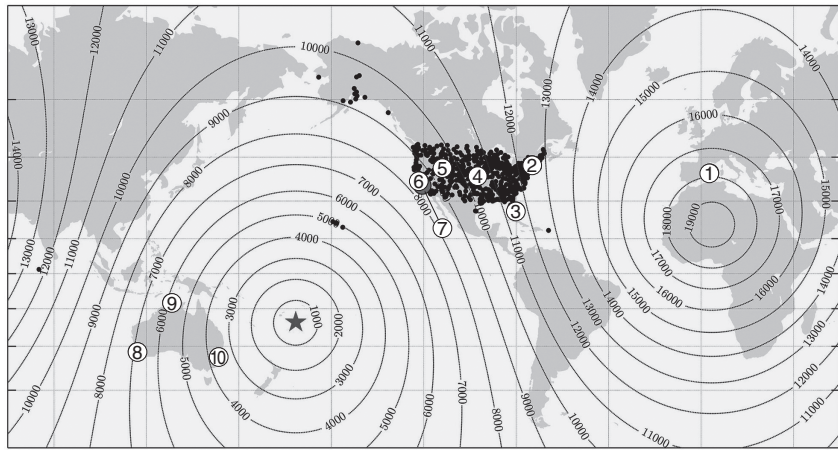


図1—ラム波の伝播とシミュレーション(Burt<sup>3</sup>の図を改変)

上図はフンガ火山の位置を星印で、気圧観測点の位置を小さい黒丸と丸数字で示す。下図は、地球を周回するラム波を、上図の丸数字の観測点のシミュレーション(黒線)と観測値(太めの灰色の線)と比較。縦軸はフンガ火山からの距離(一番下はゼロ、一番上は地球半周)。トンガから伝播したラム波が地球の裏側を回って戻り、さらに地球を1周している様子が見て取れる。

津波初動と最大波高の到達時刻差は最大10時間もある(図4c)。Carvajalら<sup>10)</sup>は、太平洋域で最大波高が大きいことと、太平洋域の最大振幅の到達時刻が太平洋を伝播する津波の平均速度198 m/sでおおよそ説明できることから、最大波高生成にフンガ火山近傍からの寄与があるのではないかと考えている。図3を見る限り、フンガ火山近傍からの最大波高生成への寄与は明瞭ではない。

## 1883年クラカタウ火山噴火津波との類似性

1883年に発生したインドネシアのスダ海峡にあるクラカタウ火山島の大規模噴火では、島のほとんどが吹き飛ばされ、その後クラカタウから遠く離れた地域で津波が観測された<sup>11)</sup>。今回の2022年トンガ津波と1883年クラカタウ津波は

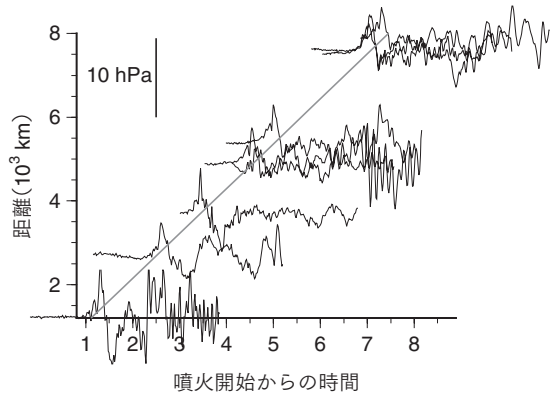
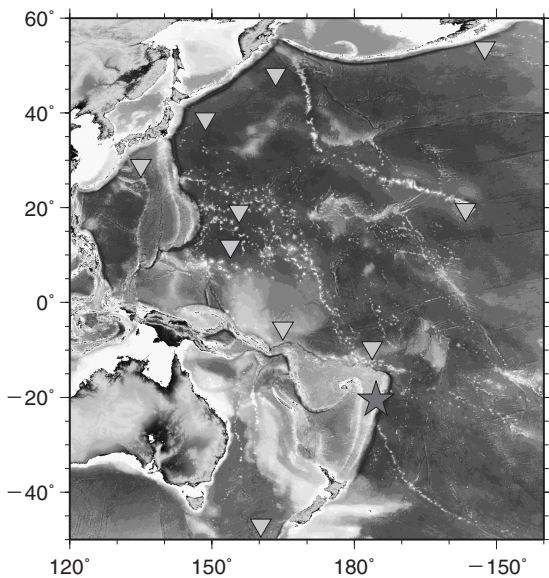


図2—深海津波計で捉えたラム波と共に伝播する津波 (Matoza ら<sup>13</sup>の図を改変)

太平洋域で分布している深海津波計(左図の▽)で観測した水圧変化(右図)。フンガ火山(左図の★)からほぼ300 m/sで伝播している。ピーク振幅の到達時刻を回帰分析すると振幅ピークの原点はほぼ4時30分。海面の気圧変化と水位変化による水圧変化をともに計測していることに注意。

以下の類似点がある。第1の類似点は、津波初動が海域を伝わる理論津波よりも早く到達したこと。第2の類似点は、遠地での津波の最大波高が、最初の津波の到着後、たとえばサンフランシスコでは5時間程度遅れて発生したこと。第3の類似点は、海域を経由した津波では考えられないような地域で潮位変化が発生したこと。クラカタウ津波では大西洋岸や欧州で、トンガ津波ではカリブ海や地中海など、ほぼすべての海域で発生している(図4)。これら通常の津波とは異なる特徴が共通しているため、1883年クラカタウ津波の再来とも言える。

Press & Harkrider<sup>12</sup>はこれらの特徴を、大気・海洋結合系の波動現象として理論的に解明することを試みた。彼らは現実に近い構造をもつ大気中の長周期音波、ラム波、内部重力波に相当する大気自由振動モードを求め、火山噴火による各モードの励起と伝播問題を定式化し、火山噴火のような波源から生ずる大気波動シミュレーション手法を開発した。彼らの手法では、海洋層を大気層の一部として拡張して扱うため、大気から海洋へ、また海洋から大気への波動伝播が自動的に考慮さ

れる点が優れている。その理論によれば、ラム波は分散性をもたず、津波よりも高速の大気音波速度で伝播し、津波の分散曲線と交差しないためカップリングが起きず、ラム波の圧力変動は単に静水圧変動程度の海面変動を生じる。一方、大気中には複数の大気重力波が存在し、位相速度が周期に依存する分散性を示し、位相速度が100~280 m/s程度の通常の津波の位相速度と同じになる大気重力波が存在する。火山噴火によりそのような大気重力波が励起されると、大気中の振幅は小さくても、波長と周期が一致するため津波と共鳴する。その結果、気圧変動から期待される静水圧変動に比べて海面変動が数十倍から数百倍大きくなる。その共鳴を起こした津波はラム波起源の初動津波から遅れて到着することを示し、上で述べた3つの特徴を説明した。

2022年フンガ噴火津波の遅れてくる最大波高はPress & Harkriderが提唱するメカニズム<sup>12</sup>で説明できるのか、あるいは他のメカニズムで説明できるのか、多くの研究者が現在研究を進めている。

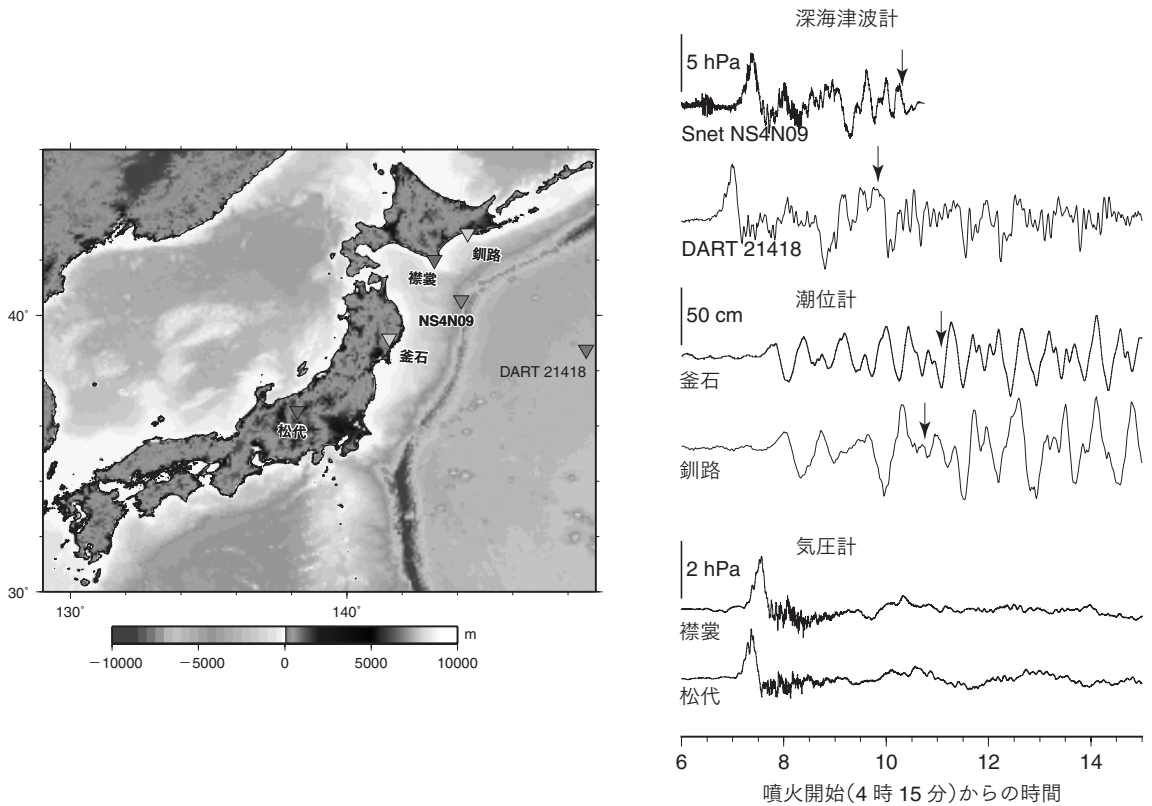


図3—東日本周辺で計測した津波と気圧変化(Matozaら<sup>13)</sup>の図を改変)

深海底の水圧変化(Snet NS4N09, DART 21418)と沿岸潮位変化(釜石, 釧路)と陸上気圧変化(襟裳, 松代)を比較すると, 深海底の津波初動は, 振幅は異なるがラム波の到達時刻と一致している。沿岸の津波初動はラム波の到達から30分に1時間程度遅れる。深海津波計では大振幅の後続波があり, 沿岸では最大潮位は初動から4~6時間後に出現している。津波計記録の途中の↓は, 4時14分15秒を発生時刻とするフンガ噴火から通常の津波が伝播したときの到達予測時刻。

## 今後への期待

2022年フンガ噴火津波では大量の固体地球・海洋・大気・電離層を含む高層大気データが取得された。これらのデータを解析してフンガ噴火の実態が今後明らかにされるだろう。また今回の短時間で終息した爆発的噴火により, 固体地球・海洋・大気・電離層の多層系から構成される地球系の, フンガ噴火を時間空間の入力点源とする,

**波の分散性とは**——波動の位相速度や群速度が波の周期(または波長)により変化すること。長周期の地震表面波やプールに投げ込んだ石が作る波紋には分散性があるが, 音波・地震のP波やS波, 長周期の津波はほとんど分散しない。

クリーンなインパルス応答を手に入れることができた。既存モデルの検証や新たな地球規模の現象の発見から, 地球系の理解が進む可能性がある。

ラム波の伝播速度は大気温度や風の影響を大きく受ける。図1の下図を見ると, 地球を1周回ってきたラム波の中には(例えば図中⑤⑥⑦の左から3番目のピーク)シミュレーションから2時間ほど早く伝播している場合があるのが見て取れる。火山・気象・津波の分野間連携が今回の津波現象解明に欠かせない。フンガ噴火津波を契機に, 全球的に時々刻々変化する風系や気温などの大気状態を考慮した, 大気と海洋の相互作用を含むような高度なシミュレーション手法が開発され, 大気波動起源の津波の発生予測に関する研究が進展することを期待したい。

2022年フンガ噴火津波では数多くの研究が進

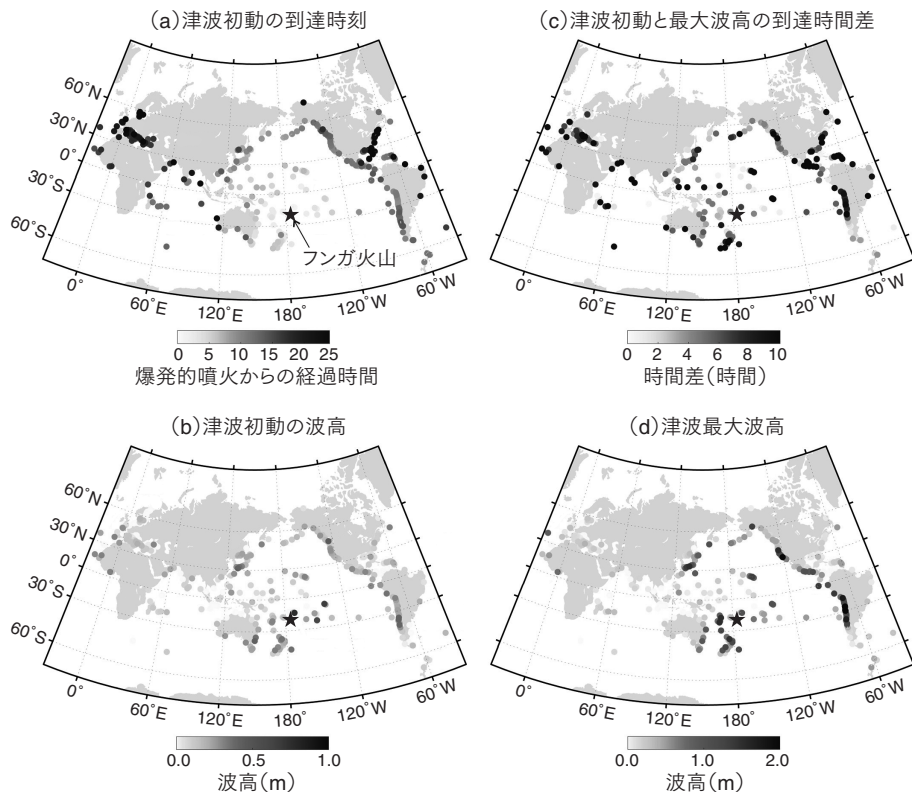


図4—世界の沿岸潮位計の津波初動波高と最大波高の分布 (Carvajal ら<sup>10</sup>の図を改変)

行中であり、数多くの論文がすでに投稿されている。それらの研究を引用できなかったことをお詫びしたい。

謝辞 防災科学技術研究所所管の Snet (<https://doi.org/10.17598/nied.0007>) を利用しました。また、釜石験潮記録は海上保安庁海洋情報部より提供いただきました。釧路験潮記録は気象庁大気海洋部より提供いただきました。

#### 文献

- 1—気象庁: 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)
- 2—D. Smart: *Weather*, **77**, 81(2022)
- 3—S. Burt: *Weather*, **77**, 76(2022)
- 4—A. Amores et al.: *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2022GL098240 (2022)
- 5—D. A. Yuen et al.: *Earthq. Res. Adv.*, 100134(2022)
- 6—D. R. Themens et al.: *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2022GL098158(2022)
- 7—宇宙航空研究開発機構: トンガ火山島衛星観測情報特設サイト, <https://earth.jaxa.jp/tonga-volcano/>(2022)
- 8—小玉祥司: *日経サイエンス*, **52**(4), 30(2022)
- 9—J. Proudman: *Geophys. Supp. Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **2**(4), 197(1929)
- 10—M. Carvajal et al.: *Geophys. Res. Lett.* **49**, e2022GL098153 (2022)
- 11—G. J. Symons ed.: *The Eruption of Krakatoa, and Subsequent Phenomena*. Trübner(1888)
- 12—F. Press & D. Harkrider: *Science*, **154**, 1325(1966)
- 13—R. Matoza et al., *Science*, accepted