



2022年1月のトンガ火山噴火に伴う気象津波

関 澤 悠 温*

1. 大気の波がつくる海の波

2022年1月15日午後1時すぎ(日本時間), 日本から約8,000km離れた南太平洋上の島国トンガにある海底火山, フンガ・トンガ=フンガ・ハアパイ火山が大規模な噴火を起こし, その噴煙は高度30~40kmにまで達しました(例えば, Carr *et al.* 2022). この噴火は, 固体地球から電離層まで至るところで多様な興味深い現象を引き起こし, 多くの地球科学者の関心を集めています(例えば, Witze 2022). 世界各地で観測された津波のような潮位変動もその一つです. 日本においても多くの検潮所で数十cmほどの潮位変動が観測され, 奄美など最大波が1mを超えた地点もありました(気象庁 2022a). 日本では死傷者は出ませんでした, 漁船や養殖施設への被害が報告されています(Imamura *et al.* 2022).

通常, 津波は $\sqrt{gH}$ (g : 重力加速度, H : 水深) の速さで伝播します. トンガ・日本間の平均水深は4,500m程度ですから, 伝播速度は約200m/s, 約8,000kmを伝わるのにおよそ11時間かかる計算です. ところが, 日本において潮位変動が始まったのは, 噴火から約8時間後の午後9時頃でした(第1図a).

実はこの噴火によって, 海の波だけではなく, ラム波や重力波など様々な大気の波も生じ, 潮位変動は主に大気波に伴う気圧変化により引き起こされたと考えられています(例えば, Kubota *et al.* 2022). 実際, 潮位変動が始まる少し前に, 日本各地で2hPaほどの気圧変化が観測されました(第1図b). これは, 大気中をほぼ音速(約310m/s)で水平に伝播し, 減衰が比較

的小さい性質をもつラム波(Bretherton 1969; Lindzen and Blake 1972; Nishida *et al.* 2014)によるものと考えられます. 気象衛星ひまわり8号も, 噴火によって生じたラム波が地球を何周も伝播する様子を捉えています(Otsuka 2022).

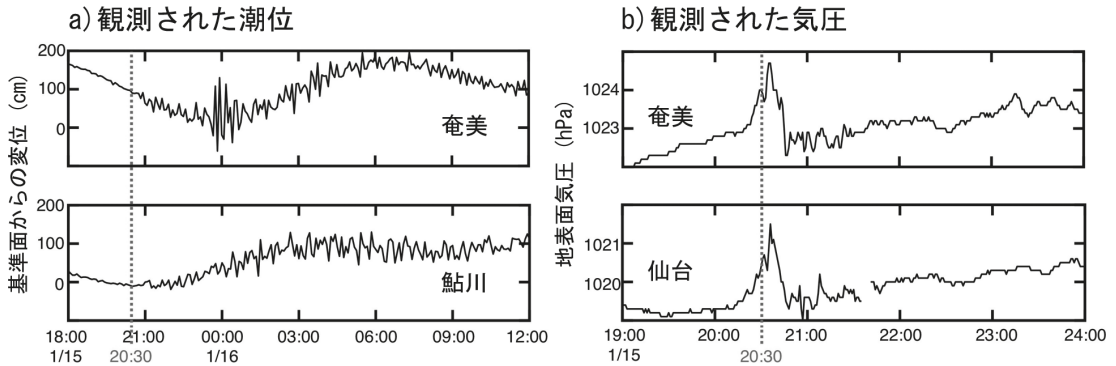
気圧変化が強制する潮位変動は, 副振動やあびきとよばれる現象にもみられ, 気象津波ともよばれます(Hibiya and Kajiura 1982; Monserrat *et al.* 2006; 高野 2014). ただし, 一般的な気象津波は, 前線やスコールラインなど比較的小規模な大気擾乱により強制され, 潮位変動の広がりも限定的です. それと比べると, 今回の気象津波は, 大気波も潮位変動も全球的に同時に観測されたことや, ラム波のような速い大気波が海面変位の強制に関わったことが特徴的だと言えるでしょう.

2. 1次元浅水波モデルによる再現

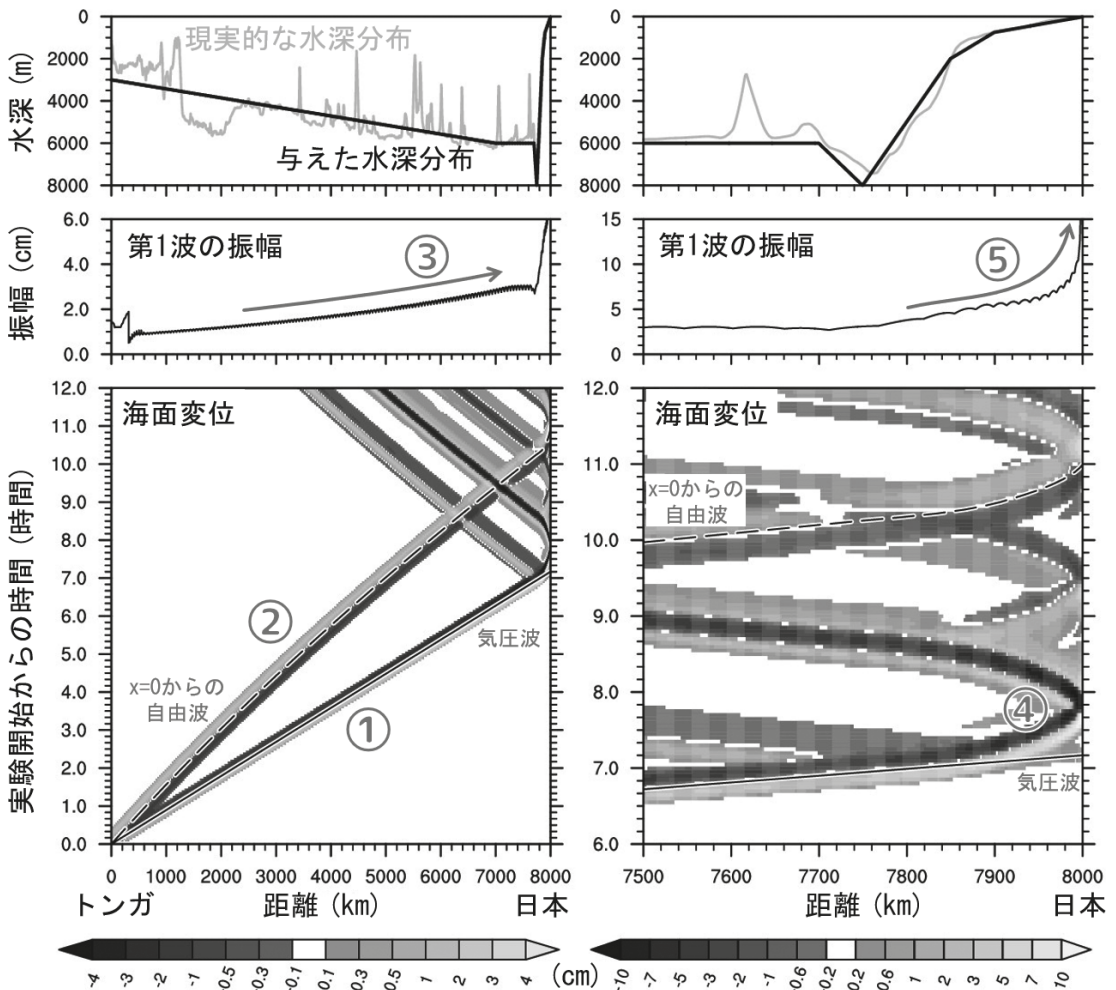
Sekizawa and Kohyama (2022) は1次元浅水波モデルを用いて, この気象津波, 特にラム波が強制した第1波の性質をできるだけシンプルに説明することを試みました. 第2図は, トンガ・日本間の水深分布を単純化した海洋に, ラム波を模した310m/sで移動する振幅2hPaの気圧波を与えた実験で再現された海面変位です. まず, $V=310\text{m/s}$ で気圧波に追従する第1波(図中①)と, $c=\sqrt{gH}$ で伝播する自由波(図中②)の二つの波が生じます. 第1波の振幅は, 一様水深での理論上の強制波の振幅 $\eta_0/(1-V^2/c^2)$ (Proudman 1929)にしたがって, 日本に近づき水深が増すとともに大きくなります(図中③). ここで η_0 は気圧強制 P に対応する定常的な海面変位 $-P/\rho g$ (ρ : 海水の密度)で, 2hPaに対して約2cmの大きさです. 気圧波の伝播速度 V が自由波の伝播速度 c に近づく, 二つの波の位相関係がほぼ固定され, 海面変位が時間とともに線形に増加するブラウドマン共鳴が生じます

* 東京大学先端科学技術研究センター,
〒153-8904 東京都目黒区駒場4-6-1,
shion@atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp

© 2023 日本気象学会



第1図 トンガ火山噴火に伴って観測された (a) 潮位と (b) 気圧の例. Sekizawa and Kohyama (2022) Fig. 1 より引用, 一部改訂.



第2図 左: 1次元浅水波モデル実験における水深分布 (上段), 第1波の振幅 (中段), 海面変位 (下段). 下段の実線と破線は, それぞれ気圧波と $x=0$ からの自由波の走時を表す. 右: 左図のうち7,500~8,000kmの部分拡大したもの. Sekizawa and Kohyama (2022) Fig. 4b および 5b より引用, 一部改訂.

(Hibiya and Kajiura 1982). しかし、310m/sに対応する水深は9,000m以上と非常に深く、ラム波に対しては共鳴にまで至らなかったと考えられます。それでも、ゆるやかに深くなる大洋底において、第1波は第2図では表現されないほどの微弱な自由波を出しながら徐々に増幅し、日本近海の6,000m級の大洋底では約3.2cmになります。なお、海溝は深いものの幅が狭いため、第1波の振幅にほとんど影響しないことが分かりました。

第1波は日本に近づいて大陸斜面に乗り上げると、気圧波に追従できなくなり、自由波として伝播しはじめます(図中④)。この自由波への変換は、海底地震津波観測網の水圧計でも実際に観測されており(Tanioka *et al.* 2022; Tonegawa and Fukao 2022)、潮位変動の開始が気圧波の到達に数十分遅れる傾向にあったことを説明できます。通常の津波と同様に、自由波として伝播する第1波は、浅くなるとともに増幅します(図中⑤)。振幅はグリーンの法則より水深の4乗根に逆比例しますから(Lamb 1932)、6,000m級の大洋底から水深20mの沿岸部までに約4.2倍大きくなります。この簡易モデルによる実験では、境界条件の影響も合わせて、岸では20~30cmの第1波が再現されます。また、より現実に近い複雑な水深分布を与えると、大洋底でも第1波が浅瀬に出くわすたびに自由波への部分的な変換が生じ、第1波に続く連続的な潮位変動を生み出すことも分かりました。

3. 1次元モデルの限界と今後の展望

Sekizawa and Kohyama (2022)の簡易モデル実験は観測された第1波の本質を捉えていると思われますが、もちろんこの気象津波の全ての側面を説明できるわけではありません。エネルギーフラックスの浅瀬への2次元的な収束や湾での共鳴、陸棚波との相互作用など、一般的な気象津波において重要とされるメカニズム(Hibiya and Kajiura 1982; Monserrat *et al.* 2006; Fukuzawa and Hibiya 2020)はこのモデルでは表現できませんが、観測された潮位変動の振幅や持続性に大きく影響した可能性があります。実際、観測された潮位変動の時系列解析から、それぞれの湾の固有振動が強化されたことを示す研究があります(Kataoka *et al.* 2022)。

今回の簡易モデル実験ではラム波に相当する気圧波のみを与えましたが、ラム波より遅く伝播する重力波がブラウドマン共鳴により効率的に海面変位を増幅さ

せ、この波も第1波に遅れて到達した可能性があります。重力波に対応する気圧変化は、通常の気圧観測では不明瞭ですが、インフラサウンド観測網が重力波や音波に伴う気圧変化を捉えたことが報告されています(Nishikawa *et al.* 2022)。1883年のクラカタウ火山噴火でも、通常の津波より速く到達する第1波とそれに遅れて到達する最大波が観測され(Press and Harkrider 1966)、大気と海洋の波の結合プロセスの重要性が示されており(Harkrider and Press 1967)、今回の事例と非常によく類似しています。

以上のように、トンガ火山噴火に伴う気象津波は多くの研究者の関心を惹きつけ、1年も経たないうちに非常に多くの研究が行われてきました。また、メカニズムの解明と合わせて、海底水圧計のデータ同化を通して非地震性津波の予測に生かす研究も進められています(Wang *et al.* 2022)。この噴火と潮位変動を受けて、気象庁は研究会等(気象庁 2022b, c)を実施して、防災情報の改善に取り組んでいます。

大規模な火山噴火による気象津波は非常に稀な現象です。このような珍しい現象に研究者として立ち会えたことを大変貴重に思うとともに、今回なされた数々の研究の成果が、またいつの日か同様の現象が発生したとき、人々に思い出され、さらなる科学の発展や防災に生かされることを心から願っています。

参考文献

- Bretherton, F. P., 1969: Lamb waves in a nearly isothermal atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **95**, 754–757.
- Carr, J. L., Á. Horváth, D. L. Wu and M. D. Friberg, 2022: Stereo plume height and motion retrievals for the record-setting Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption of 15 January 2022. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2022GL098131, doi:10.1029/2022GL098131.
- Fukuzawa, K. and T. Hibiya, 2020: The amplification mechanism of a meteo-tsunami originating off the western coast of Kyushu Island of Japan in the winter of 2010. *J. Oceanogr.*, **76**, 169–182.
- Harkrider, D. and F. Press, 1967: The Krakatoa air-sea waves: An example of pulse propagation in coupled systems. *Geophys. J. Int.*, **13**, 149–159.
- Hibiya, T. and K. Kajiura, 1982: Origin of the Abiki phenomenon (a kind of Seiche) in Nagasaki Bay. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **38**, 172–182.
- Imamura, F. *et al.*, 2022: Preliminary observations and impact in Japan of the tsunami caused by the Tonga

- volcanic eruption on January 15, 2022. *Pure Appl. Geophys.*, **179**, 1549–1560.
- Kataoka, R., S. D. Winn and E. Toubert, 2022: Meteotsunamis in Japan associated with the Tonga eruption in January 2022. *SOLA*, **18**, 116–121.
- 気象庁, 2022a: 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2報).
<https://www.jma.go.jp/jma/press/2201/16b/202201161415.html> (2022.7.7閲覧).
- 気象庁, 2022b: フンガ・トンガ・フンガ・ハアパイ火山の噴火による潮位変化のメカニズム等の分析結果と情報発信の運用改善について.
https://www.jma.go.jp/jma/press/2204/07a/tonga_houkokusho.html (2022.7.7閲覧).
- 気象庁, 2022c: 「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」(第1回)の開催について.
https://www.jma.go.jp/jma/press/2204/27a/tongakentou01_20220427.html (2022.7.7閲覧).
- 高野洋雄, 2014: 気象津波 (meteo-tsunami). *天気*, **61**, 494–496.
- Kubota, T., T. Saito and K. Nishida, 2022: Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*, **377**, 91–94.
- Lamb, H., 1932: *Hydrodynamics* (6th ed.). Cambridge Univ. Press, 273–275.
- Monserat, S., I. Vilibić and A. B. Rabinovich, 2006: Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **6**, 1035–1051.
- Nishida, K., N. Kobayashi and Y. Fukao, 2014: Background Lamb waves in the Earth's atmosphere. *Geophys. J. Int.*, **196**, 312–316.
- Nishikawa, Y. *et al.*, 2022: Observation and simulation of atmospheric gravity waves exciting subsequent tsunami along the coastline of Japan after Tonga explosion event. *Sci. Rep.* **12**, 22354. doi:10.1038/s41598-022-25854-3.
- Otsuka, S., 2022: Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2022GL098324, doi:10.1029/2022GL098324.
- Press, F. and D. Harkrider, 1966: Air-sea waves from the explosion of Krakatoa. *Science*, **154**, 1325–1327.
- Proudman, J., 1929: The effects on the sea of changes in atmospheric pressure. *Geophys. Suppl. Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **2**, 197–209.
- Sekizawa, S. and T. Kohyama, 2022: Meteotsunami observed in Japan following the Hunga Tonga eruption in 2022 investigated using a one-dimensional shallow-water model. *SOLA*, **18**, 129–134.
- Tanioka, Y., Y. Yamanaka and T. Nakagaki, 2022: Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption. *Earth Planets Space*, **74**, 61, doi:10.1186/s40623-022-01614-5.
- Tonegawa, T. and Y. Fukao 2022: Wave propagation of meteotsunamis and generation of free tsunamis in the sloping area of the Japan Trench for the 2022 Hunga-Tonga volcanic eruption. *Earth Planets Space* **74**, 159, doi:10.1186/s40623-022-01727-x.
- Wang, Y., K. Imai, S. Kusumoto and N. Takahashi, 2022: Tsunami early warning of the Hunga volcanic eruption using an ocean floor observation network off the Japanese Islands. *Seismol. Res. Lett.*, doi:10.1785/0220220098.
- Witze, A., 2022: Why the Tongan eruption will go down in the history of volcanology. *Nature*, **602**, 376–378.

関澤 侃温

東京大学先端科学技術研究センター 気候変動科学分野 特任助教

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻修士 博士 (理学)

普段は熱帯から中高緯度への遠隔影響や、異常気象のメカニズムなどを研究しています。気象津波については、このトンガ火山噴火を受けて初めて興味をもち、調査を行いました。

ここで紹介した Sekizawa and Kohyama (2022) の簡易モデル実験は、もともと関澤が遊びのつもりで行ったものでした。Twitter に投稿した計算結果がお茶の水女子大学の神山翼氏に見つかり、「東の間のバズりで終わらせるのはもったいない、せっかくだから論文の形で後世に残そう」と持ちかけられたことが、この論文のきっかけです。SNS での情報交換から始まる共同研究は、イマドキらしい研究活動の一つのカタチかもしれません。