

噴火に伴う複数の気圧波によって生成・増幅される津波に対する海底地形の影響

鹿児島大学学術研究院理工学域 正会員 柿沼 太郎

1. 研究の目的: 2022年1月15日13:00 (JST) 頃に発生した Hunga Tonga-Hunga Ha'apai 火山の大規模噴火に伴い、太平洋沿岸の広範囲において津波が観測された。図-1に、2022年1月15日19:00～16日2:00の奄美における検潮記録を示す。ここで、23:40頃に周期10分程度の顕著な水面変動が開始しており、これは、Proudman共鳴¹⁾で増幅された津波と考えられる²⁾。噴火に伴う微気圧変動による津波に関して、1883年 Krakatau 火山噴火津波^{3,4)} や、1956年 Bezymianny 噴火津波⁵⁾ 等の研究がある。ところで、噴火に伴う気圧変動では、大気 Lamb 波より低速で進行する数多くの大気重力波等が観測されているが、気圧波列による津波生成機構は、明らかでない。そこで、複数の気圧波に伴う津波の生成・増幅過程に対して、海底地形が及ぼす影響を調べた。

2. 数値解析の手法及び条件: 非粘性・非圧縮性流体の非回転運動を対象とした。水面変動を $\eta(\mathbf{x}, t)$ 、底面位置を $b(\mathbf{x})$ 、そして、速度ポテンシャルを $\phi(\mathbf{x}, t)$ として、水面に作用する圧力 $p(\mathbf{x}, t)$ を考慮した非線形浅水方程式が $\partial\eta/\partial t = \partial b/\partial t - \nabla[(\eta - b)\nabla\phi]$ (1) 及び $\partial\phi/\partial t = -(\nabla\phi)^2/2 - g\eta - p/\rho$ (2) と表わされる。ここで、 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ は、水平方向の微分演算子である。また、重力加速度 g は、 9.8 m/s^2 とし、水の密度 ρ は、 1030 kg/m^3 とした。本研究では、 x 軸方向の1次元伝播問題を対象とし、空間に中央差分、時間に前進差分を用いて、上式を有限差分法によって解いた。計算格子間隔 Δx は、 500 m 、計算時間間隔 Δt は、 0.7 s とした。

図-2に示す定常な気圧波列が、一定速度 v_p で x 軸の正の方向に移動すると仮定する。気圧波としては、火山噴火によって生じた大気重力波等を想定し、いずれの気圧波も、進行速度 v_p を 250 m/s とした。また、いずれの気圧波も、波形が、正の圧力を有する、変形しない二等辺三角形形状であるとし、この二等辺三角形の底辺の長さ λ を 10 km 、高さ、すなわち、気圧の最大値 p_{\max} を 2 hPa とした。気圧波の間隔を δ とし、初期時刻 $t = 0 \text{ s}$ における気圧波 W_n の岸側端の位置を x_n とする。図-3に示す海底地形を対象とし、沖側及び岸側の静水深をそれぞれ $h_{\text{off}} = 5000 \text{ m}$ 及び $h_{\text{on}} = 2000 \text{ m}$ とした。速度ポテンシャルの初期値 $\phi(x, 0 \text{ s})$ は、 $0 \text{ m}^2/\text{s}$ とした。

3. 気圧波が既存の津波を追い越す場合: 先行した大気 Lamb 波によって生成され、自由波として伝播している津波 T_L を気圧波が追跡する場合を考える。津波 T_L は、 $t = 0 \text{ s}$ における $60 \text{ km} \leq x \leq 70 \text{ km}$ の水面変動を $\eta = 0.06 \text{ m}$ として与える。海底地形を図-3左図に示す階段状地形とし、浅い水域の開始位置を $x_{\text{on}} = 170 \text{ km}$ とする。図-2に示す、 $x_1 = 55 \text{ km}$ の気圧波 W_1 が津波 T_L に追い付いた場合の時刻 $t = 1050 \text{ s}$ の水面形を図-4の右図に示す。津波高さが大きくなったときに、津波が浅い水域に進行したため、増幅された津波が伝播している。また、海底地形を図-3右図に示す一様勾配斜面のある地形とし、斜面及び浅い水域の開始位置をそれぞれ $x_{\text{slope}} = 20 \text{ km}$ 及び $x_{\text{on}} = 500 \text{ km}$ とする。図-2に示す、 $\delta = 5 \text{ km}$ 及び $x_1 = 55 \text{ km}$ の三つの気圧波が津波 T_L を追い越す場合の $t = 2380 \text{ s}$ の水面形を図-5に示す。津波 T_L の津波高さが、気圧波列の作用によって増幅された。

4. 階段状地形上の水域において気圧波列により生成される津波: 図-3左図に示す階段状地形で、 $x_{\text{on}} = 300 \text{ km}$ とする。図-2に示す、 $x_2 = 40 \text{ km}$ の二つの気圧波 W_1 及び W_2 が伝播する場合の、時刻 $t = 1400 \text{ s}$ の水面形を図-6に示す。ここで、気圧波の間隔 δ を 0 km 、 5 km 、または、 10 km としている。最低水位は、 $\delta = 0 \text{ km}$ で第3谷、 $\delta = 10 \text{ km}$ で第2谷で現れ、津波波形が気圧波の周期に依存することがわかる。また、図-3左図に示す階段状地形で、 x_{on} を 400 km 、または、 170 km とする。図-2に示す、 $\delta = 5 \text{ km}$ 及び $x_1 = 55 \text{ km}$ の三つの気圧波が伝播する場合の、時刻 $t = 2100 \text{ s}$ の水面形を図-7に示す。気圧波による生成・増幅過程に津波が静水深の異なる水域に進行する場合、そのタイミングによって、図-7が示すように、進行する津波の波形が異なり得る。

5. 斜面上の水域において気圧波列により生成される津波: 図-3右図に示す海底地形で、斜面及び浅い水域の開始位置をそれぞれ $x_{\text{slope}} = 20 \text{ km}$ 及び $x_{\text{on}} = 300 \text{ km}$ とする。図-2に示す、 $\delta = 5 \text{ km}$ 及び $x_1 = 55 \text{ km}$ の三つの気

キーワード 津波, 気圧波, 噴火, 海底地形, Proudman 共鳴, 気象津波

連絡先 〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40 鹿児島大学学術研究院理工学域 Phone: 099(285)8467

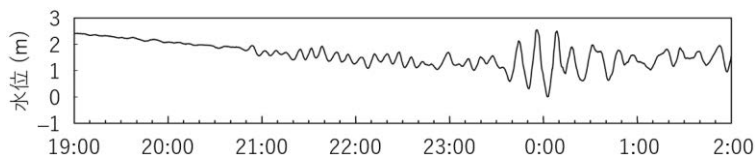


図-1 2022年1月15日19:00~16日2:00 (JST) の奄美における検潮記録 (気象庁保有の情報を利用している.)

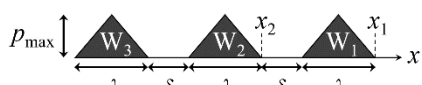


図-2 x軸の正の方向に進行する気圧波列の波形

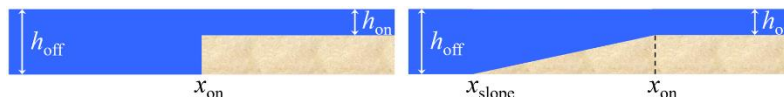


図-3 海底地形 (左: 階段状地形, 右: 一様勾配斜面のある地形)

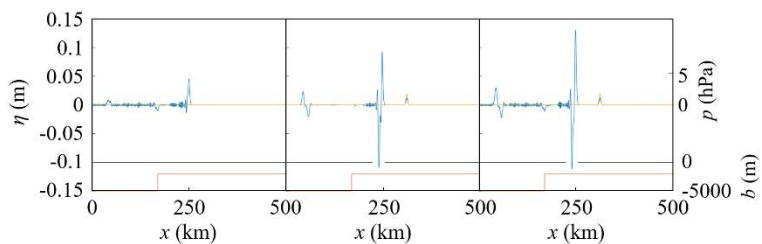


図-4 時刻 $t = 1050$ sにおける水面形 (左: Lamb波, 中: 気圧波, 右: Lamb波+気圧波; $x_{on} = 170$ km, $x_1 = 55$ km)

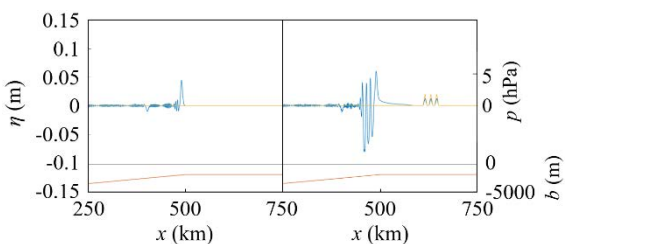


図-5 時刻 $t = 2380$ sにおける水面形 (左: Lamb波, 右: Lamb波+気圧波; 斜面勾配 $\beta = 6.25 \times 10^{-3}$, $\delta = 5$ km, $x_1 = 55$ km)

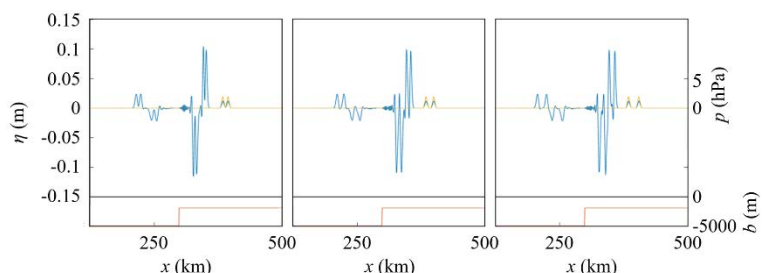


図-6 時刻 $t = 1400$ sにおける水面形 (左: $\delta = 0$ km, 中: $\delta = 5$ km, 右: $\delta = 10$ km; $x_{on} = 300$ km, $x_2 = 40$ km)

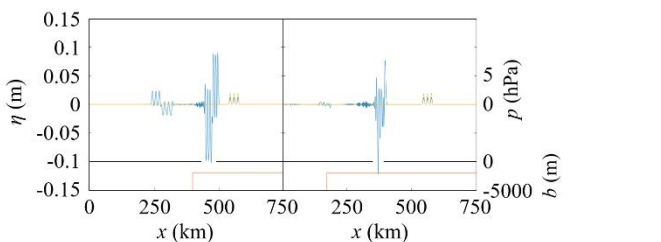


図-7 時刻 $t = 2100$ sにおける水面形 (左: $x_{on} = 400$ km, 右: $x_{on} = 170$ km; $\delta = 5$ km, $x_1 = 55$ km)

圧波が伝播する場合の水面形の時間変化を図-8に示す。自由波の津波の第1, 2及び3谷の最低水位をそれぞれ ζ_1 , ζ_2 及び ζ_3 として, $\zeta_1 > \zeta_2 > \zeta_3$ であり, 図-1に示す2022年1月15日

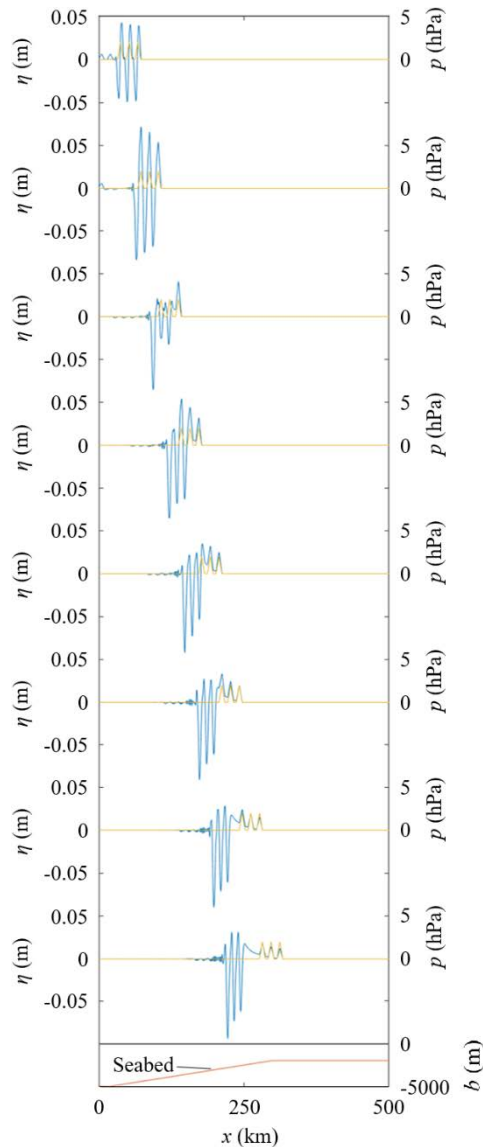


図-8 水面形の $70 \text{ s} \leq t \leq 1050 \text{ s}$ における140 s毎の時間変化 (水色: 水面変動 η , 橙色: 気圧 p , 赤色: 底面位置 b , 斜面勾配 $\beta = 1.07 \times 10^{-2}$)

23:35~16日0:10の水位変動と類似している。

謝辞: 本研究は, JSPS 科研費 JP17K06585 の助成を受けて行なわれた。また, 山下 啓氏 (原子力規制庁) との議論が有意義であった。

参考文献

- 1) Proudman, J.: The effects on the sea of changes in atmospheric pressure, *Geophysical Journal International*, **2(s4)**, 197–209, 1929.
- 2) 柿沼太郎: 気象や火山噴火がもたらす微気圧変動に伴う津波, 国際火山噴火史情報研究会講演要旨集, **2021-2**, 85–92, 2022.
- 3) Harkrider, D. and Press, F.: The Krakatoa air-sea waves: an example of pulse propagation in coupled systems, *Geophysical Journal International*, **13**, 149–159, 1967.
- 4) Yokoyama, I.: A scenario of the 1883 Krakatau tsunami, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **34**, 123–132, 1987.
- 5) 小林哲夫・柿沼太郎: 火山の爆発的噴火に伴う気圧波に励起され発生した津波: 1883年クラカタウ噴火と1956年ベズイミアニ噴火, 国際火山噴火史情報研究会講演要旨集, **2021-2**, 93–105, 2022.