

マグマ水蒸気爆発を伴う海底噴火により生成される津波

鹿児島大学大学院理工学研究科 正会員 柿沼太郎
鹿児島大学工学部 松本 洸
鹿児島大学大学院理工学研究科 学生会員 山下 啓

1. 研究の背景・目的

海底火山の噴火に伴う津波に関しては、その発生頻度が比較的低いこともあり、研究があまり進んでいないのが現状であると言える。例えば、鹿児島湾内で、1780 年 9 月 9 日に海底噴火が生じ、噴火地点付近で 9 m 程度の高さの水柱が現れた後、ある浜辺に約 6 m の津波が押し寄せたという記録が見られる（都司, 1997）。海底噴火においても、地上における火山噴火と同様に噴出物が放出され、これによって海水の運動が発生し、津波が引き起こされることが予想される。しかしながら、海底噴火では、こうした噴出物の放出のみならず、水中における噴火に特有な現象として、マグマ水蒸気爆発の発生が考えられる（谷口, 1996）。海水が、高温のマグマに接触し、瞬時に気化して体積が爆発的に増大するマグマ水蒸気爆発により、津波が発生する可能性がある。そこで、本研究では、海底火山噴火によるマグマ水蒸気爆発と、それに伴う津波初期波形の関係に関して考察し、津波に対する海底噴火の規模の指標を提案することを試みる。

2. 津波に対する海底噴火の規模の指標

2.1 気化する水の体積膨張率

液体の水 1 mol の質量及び密度は、それぞれ、18 g 及び 1 g/cm^3 であるから、水 1 mol の体積は、18 ml である。他方、気体の標準状態を STP、すなわち、温度 0°C 及び気圧 10^5 Pa (1 bar) とすると、水蒸気の場合、理想気体 1 mol は、22,700 ml であるから、標準状態において、水が水蒸気に変化すると、体積は、 $22,700/18 \div 1,261$ 倍となる。また、圧力が p (Pa) であるとき、温度が τ ($^\circ\text{C}$) の気体の体積 V は、 0°C の気体の体積を V_0 として、ボイル・シャルルの法則より、 $V = V_0 (10^5/p) (1 + \tau/273)$ となる。従って、体積 V_w の水が、体積が V である、温度 τ ($^\circ\text{C}$) 及び圧力 p (Pa) の水蒸気に変化するときの体積膨張率 α は、次式で表わされる。

$$\alpha = V / V_w = 1261 \times 10^5 (1 + \tau/273) / p \quad (1)$$

2.2 マグマ水蒸気爆発における水の体積膨張率

マグマが水に接触した直後、マグマと水の各パラメタの間で、次式が成立する（Fauske, 1973）。

$$(\tau_m - \tau_i) / (\tau_i - \tau_w) = (\rho_w c_{pw} k_w / \rho_m c_{pm} k_m)^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 τ_i は、マグマと水の界面温度であり、各パラメタの値は、一般に、次のような値をとる（谷口, 1996）。

$$\begin{aligned} \text{マグマの密度 } \rho_m &= 2,400 \text{ kg/m}^3, & \text{水の密度 } \rho_w &= 1,000 \text{ kg/m}^3, \\ \text{マグマの温度 } \tau_m &= 973 \text{ K}, & \text{水の温度 } \tau_w &= 273 \text{ K}, \\ \text{マグマの定圧比熱 } c_{pm} &= 1.2 \times 10^3 \text{ J/kgK}, & \text{水の定圧比熱 } c_{pw} &= 4.2 \times 10^3 \text{ J/kgK}, \\ \text{マグマの熱伝達率 } k_m &= 1.2 \text{ W/mK}, & \text{水の熱伝達率 } k_w &= 0.61 \text{ W/mK} \end{aligned}$$

式(2) にこれらの値を代入して、界面温度 τ_i が次式のように得られる。

$$\tau_i = 649 \text{ K} = 376^\circ\text{C} \quad (3)$$

ところで、水は、温度が上昇すると、液体の状態ではなくなり、突然、沸騰を起こす。この現象は、水があたかも自ら核を形成したかのような振る舞いをするため、自発核生成と呼ばれている（谷口, 1996）。このときの温度を自発核生成温度と言い、水の場合、大気圧下において、約 583 K である。また、水の自発核生成温度に対する圧力の影響は、僅かであることがわかっている。例えば、圧力が 2 MPa の場合、水の自

発核生成温度は、10 K 程度しか上昇しない．従って、算出された式(3) の温度は、自発核生成温度を超えており、この界面温度が水蒸気爆発を発生させるための条件を満たしていると言える．

海底火山の噴火口が、水面下 h (m) の場所にあるとする．すると、この噴火口における水圧 p は、重力加速度を $g=9.8 \text{ m/s}^2$ として、次式で表わされる．

$$p = \rho_w g h = 9,800 h \text{ (Pa)} \quad (\text{unit of length: m}) \quad (4)$$

式(1) の τ に、式(3) の τ_i の値を代入し、また、式(1) の p に、式(4) の p を代入して、次式を得る．

$$\alpha = V / V_w = 30,600 / h \quad (\text{unit of length: m}) \quad (5)$$

2.3 海底噴火の規模と津波初期波形の関係

海底噴火によって水蒸気爆発が生じ、瞬間的に、その水蒸気が海底面上で半径 r の半球状に広がると仮定する．この半球の中心は、噴火地点にあるとする．その際に、この半球状の水蒸気が、海水を鉛直上向きに上昇させ、形状及び大きさがこの水蒸気と同一の津波初期波形が形成されるものとする．すなわち、津波初期波形は、海面の最高点が静水面上 r にある半球面とする．このとき、水蒸気の体積 V は、 $2\pi r^3/3$ であるから、式(5) より、水蒸気に変化した海水の体積は、次式となる．

$$V_w = 6.8 \times 10^{-5} h r^3 \quad (\text{unit of length: m}) \quad (6)$$

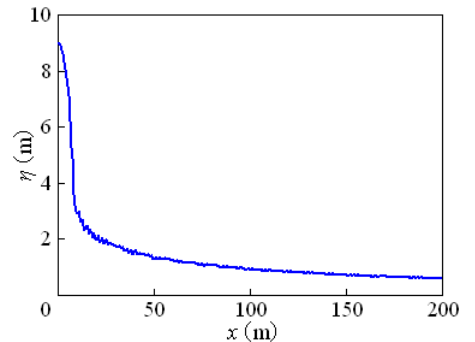
式(6) は、式(7) のように書き換えられる．

$$r = 24 \sqrt[3]{V_w / h} \quad (\text{unit of length: m}) \quad (7)$$

式(7) は、水深 h の水域の海底面において、体積 V_w の海水を水蒸気に変える海底噴火により、半径 r の半球面の津波初期波形が形成されることを示している．すなわち、生成される津波に対しては、マグマ水蒸気爆発により水蒸気に変化する海水の体積 V_w が、海底噴火の規模を表わすパラメタとなる．上述した、鹿児島湾内における 1780 年 9 月 9 日の海底噴火では、噴火地点付近で 9 m 程度の高さの水柱が現れたとされているが、この地点の水深は、約 200 m であるから、式(6) に、 $h = 200 \text{ m}$ 及び $r = 9 \text{ m}$ を代入して、このときの津波に対する海底噴火の規模のパラメタの値は、 $V_w = 9.9 \text{ m}^3$ となる．

3. マグマ水蒸気爆発を伴う海底噴火により生成される津波の伝播解析

水域の静水深が 200 m で一様と仮定すると、津波初期波形が半径 9 m の半球面であるとき、この半球の中心からの水平距離 x と津波高さ η の関係は、非線形浅水方程式系 (e.g. 柿沼, 2006) を基礎方程式系とする数値解析により、右図のように得られる．本図より、 $\eta = 6 \text{ m}$ となるのは、 $x = 6.7 \text{ m}$ の地点である．ただし、浅水変形等を経て、より遠い地点で $\eta = 6 \text{ m}$ となる可能性がある．



従って、以上の仮定のもとで、このときの海底噴火は、津波に対する規模が $V_w = 9.9 \text{ m}^3$ の噴火であり、噴火地点から約 6.7 m 離れた地点で 6 m の津波高さが現れたことになる．

なお、津波に対する規模が同様に $V_w = 9.9 \text{ m}^3$ の噴火が発生する場合、噴火が一様静水深 4,000 m の水域の海底面で生じるとき、式(5) より、発生する水蒸気の体積が $V = 76 \text{ m}^3$ となり、津波初期波形の最高点の水面からの高さ r は、その形状を半球と仮定したとき、式(7) より、 $r = 3.2 \text{ m}$ となる．また、その噴火が一様静水深 10,000 m の水域の海底面で生じるとき、 $V = 30 \text{ m}^3$ となり、 $r = 2.4 \text{ m}$ と減じる．

参考文献

- 柿沼太郎: 津波地震がもたらす幾つかの地変形態を対象とした津波形成過程の数値解析, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 191-195, 2006.
- 谷口宏充: 高温流紋岩質溶岩流－水接触型マグマ水蒸気爆発の発生機構, 地質学論集, 第 46 号, pp. 149-162, 1996.
- 都司嘉宣: 火山活動と津波の発生, 火山とマグマ (兼岡一郎・井田喜明編), 東京大学出版会, pp. 194-206, 1997.
- Fauske, H. K.: On the mechanism of uranium dioxide-sodium explosive interactions, Nucl. Sci. Eng., Vol. 51, pp. 95-101, 1973.