

海底噴火が伴うマグマ水蒸気爆発により生成される津波

鹿児島大学工学部

柳 雄大

鹿児島大学大学院理工学研究科 学生会員 山下 啓

鹿児島大学大学院理工学研究科 正会員 柿沼太郎

1. 研究の背景及び目的: 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。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9m程度の高さの水柱が現れた後、ある浜辺に約6m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)。すなわち、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。そして、海底噴火の規模の指標が異なる場合の、海底噴火が伴うマグマ水蒸気爆発により生成される津波の伝播解析を行なう。

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1molの質量及び密度は、それぞれ、18g及び 1g/cm^3 であるから、水1molの体積は、18ml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 10^5Pa (1bar)とすると、水蒸気の場合、理想気体1molは、22,700ml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、 $22,700/18 \approx 1,261$ 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583Kである。また、例えば、圧力が2MPaの場合、水の自発核生成温度は、10K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、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 z (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。

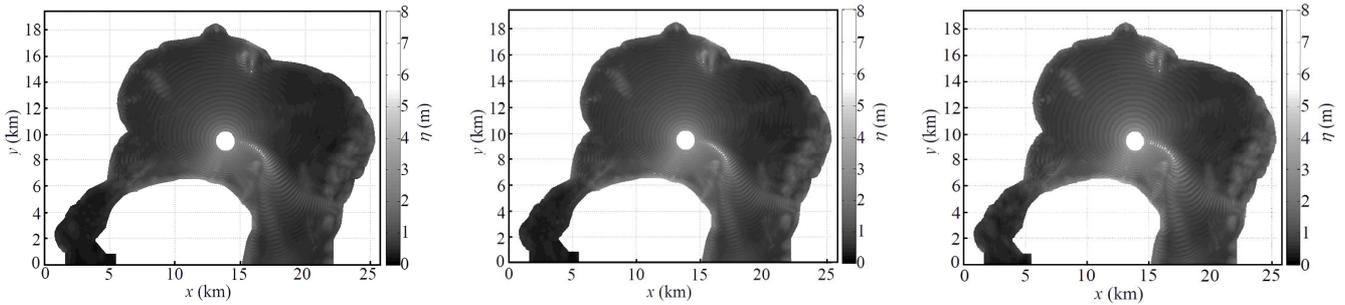


図1 $h = 6.0$ m の場合の最大水位分布 図2 $h = 7.0$ m の場合の最大水位分布 図3 $h = 8.0$ m の場合の最大水位分布

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

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。

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

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 の円柱状に広がると仮定する。そして、その際に、この円柱状の水蒸気が、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 h にある円柱であると仮定する。このとき、水蒸気の体積 V は、 $\pi r^2 h$ 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。

$$V_w = 1.0 \times 10^{-4} z h r^2 \quad (\text{unit of length: m}) \quad (6)$$

式(6) は、水深 z 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 、高さ h の円柱形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、マグマ水蒸気爆発により生成される津波に対しては、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指標となる。

3. 海底噴火が伴うマグマ水蒸気爆発により生成される津波の伝播解析: 火口半径 r (m) は、噴出量を V_e (m^3) として、 $r = 0.97 V_e^{0.36}$ (unit of length: m) により推定できる (Sato and Taniguchi, 1997)。ここで、火山爆発指数 VEI が、平均規模 VEI=2 より大きな規模である VEI=3 の場合を想定すると、 V_e の範囲は、 $10^7 \text{ m}^3 < V_e < 10^8 \text{ m}^3$ となる (Newhall and Self, 1982)。従って、 $321 \text{ m} < r < 736 \text{ m}$ と推定されるから、ここでは、火口半径 r を 700 m に設定する。そして、津波に対する海底噴火の規模を表わす指標の値が $V_w = 2.9 \times 10^4$, 3.4×10^4 及び 3.9×10^4 (unit of length: m) である海底噴火が、桜島の北方に位置する ($31^\circ 38' 38.7'' \text{ N}$, $130^\circ 42' 14'' \text{ E}$) の地点で発生すると仮定する。この地点の静水深 z は、約 100 m であるから、生成される半径 700 m の円柱状の津波初期波形の最高水位 h は、式(6) より、 V_w のそれぞれの場合に、約 6.0 m, 7.0 m 及び 8.0 m となる。

これらの津波初期波形を仮定し、山下ら (2012) で浅水条件を仮定した場合の数値モデルを適用して、鹿児島湾内における津波の伝播解析を行なった。最大水位、すなわち、津波高さの分布の数値解析結果をそれぞれ図1~3に示す。指標 V_w の値が大きいほど、津波初期波高が大きく、津波高さ η が概して大きい。波源東方で静水深が浅く、図3の場合、 η が 5 m 程度となるが、波源北東では、静水深が約 200 m と深く、 η が低減する。また、湾奥では、霧島市隼人沖の $(x, y) = (16 \text{ km}, 16 \text{ km})$ の地点付近で、静水深が比較的浅く、 η が大きい。津波高さ η が大きくなる地点は、 V_w の値にあまり依存せず、図1, 2 及び 3 の場合に、 η は、それぞれ、桜島の北岸域で 2 m, 3 m 及び 5 m, 湾奥の隼人沖で 3 m, 4 m 及び 5 m, そして、大隅半島の西岸域で 1~2 m, 2 m 及び 2~3 m 程度となっている。

参考文献

- 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.
 山下 啓・柿沼太郎・山元 公・中山恵介: マッハシステム形成過程の数値解析, 土木学会論文集 B2, Vol. 68, No. 2, pp. 6-10, 2012.
 Fauske, H. K.: On the mechanism of uranium dioxide-sodium explosive interactions, Nucl. Sci. Eng., Vol. 51, pp. 95-101, 1973.
 Newhall, C. G. and Self, S.: The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism, J. Geophys. Res., Vol. 87, No. C2, pp. 1231-1238, 1982.
 Sato, H. and Taniguchi, H.: Relationship between crater size and ejecta volume of recent magmatic and phreatomatic eruption, Geophys. Res. Lett., Vol. 24, pp. 205-208, 1997.