津波工学研究報告第30号 (2013)

海底火山噴火に伴う
マグマ水蒸気爆発やカルデラ陥没による津波の生成

柿沼　太郎*・山下　　啓*・松本　　洸**

1．序　　論

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と言えよう。過去の例としては，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，津波が押し寄せたという記録が存在する（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。ところが，海底噴火では，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である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。そして，この指標の値を設定し，桜島近傍を対象として，マグマ水蒸気爆発により生成される津波の伝播解析を実施する。

また，火山噴火の際には，マグマの放出等に伴い，カルデラが形成される場合がある（Maeno ら，2006）。ここでは，桜島近傍で，海底噴火によりカルデラ陥没が生じる場合を想定し，鹿児島湾内における津波の伝播解析を行なう。

*鹿児島大学大学院理工学研究科
**株式会社東光コンサルタンツ

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℃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 ≒ 1,261 倍となる。また，圧力が p (Pa) であるとき，温度が τ(℃) の気体の体積 V は，0℃の気体の体積を V_0 として，Boyle・Charles 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 (℃) 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。

$$\alpha = V / V_w = 1{,}261 \times 10^5\,(1 + \tau/273)\,/\,p \quad (1)$$

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る。また，他のパラメタは，一般に，次のような値をとる（谷口，1996）。

［マグマの諸量］
マグマの密度 $\rho_m = 2{,}400$ kg/m^3
マグマの温度 $\tau_m = 973$ K
マグマの定圧比熱 $c_{pm} = 1.2 \times 10^3$ J/kgK
マグマの熱伝達率 $k_m = 1.2$ W/mK

［水の諸量］
水の密度 $\rho_w = 1{,}000$ kg/m^3
水の温度 $\tau_w = 273$ K
水の定圧比熱 $c_{pw} = 4.2 \times 10^3$ J/kgK
水の熱伝達率 $k_w = 0.61$ W/mK

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。

$$\tau_i = 649\ \mathrm{K} = 376℃ \quad (3)$$

ところで，水は，温度が上昇すると，液体の状態を保てなくなり，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，大気圧下と比較して 10 K 程度しか上昇しない。従って，算出された式(3) の界面温度は，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。

２．３　水の体積膨張率と水深の関係

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 m/s^2 として，次式で表わされる。

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

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 を代入することにより，次式を得る。

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

式(5) は，水の体積膨張率と，噴火口位置の静水深の関係を表わしている。例えば，噴火口位置の静水深が $h = 3{,}000$ m であれば，水の体積膨張率は，$\alpha = 10.2$ に，また，h=50 m であれば，$\alpha \fallingdotseq 6.1 \times 10^2$ になる。

２．４　海底噴火の規模と津波初期波形の関係

海底噴火によってマグマ水蒸気爆発が生じ，体積 V_w の海水が鉛直上向きに瞬時に膨張すると仮定する。海底（海底面）においてマグマが海水に接する部分が，半径 r の円形の水平面であるとすると，水蒸気の全体の形状は，底面の半径 r の円柱形となる。そして，こ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である津波初期波形が形成されるとする。この円柱の高さが η_0 であるとき，水蒸気の体積は，$V = \pi r^2 \eta_0$ 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。

$$V_w = \pi r^2 \eta_0 h / 30{,}600\ \text{(unit of length: m)} \quad (6)$$

式(6) は，静水深 h の水域の海底において，体積 V_w の海水を水蒸気に変える海底噴火により，底面の半径 r，高さ η_0 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．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

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（都司，1997）。この地点の静水深は，約 50 m であるから，式(6) に，η_0 = 9 m 及び h = 50 m を代入する。

また，火口の半径 r (m) は，噴出量を V_e (m^3) として，式(7) により推定することができる（Sato and Taniguchi，1997）。

$$r = 0.97 V_e^{0.36} \quad (7)$$

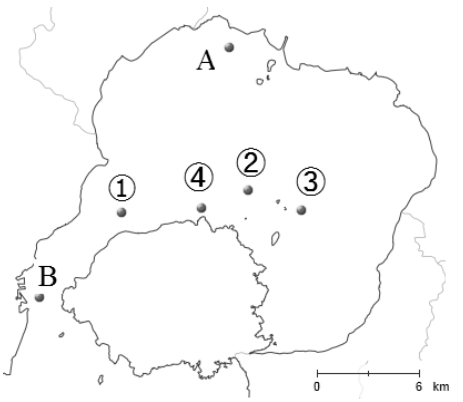
ここで，火山爆発指数 VEI が，平均規模 VEI＝2 より大きな規模である VEI＝3 の場合を想定すると，V_e の範囲は，10^7 m^3 < V_e < 10^8 m^3 となる（Newhall and Self，1982）。従っ

て，321 m < r <736 m となるから，ここでは，火口半径を r = 700 m と設定する。

すると，津波に対する海底噴火の規模を表わす指標の値は，式(6) より，V_w = 2.3×10^4 m^3 となる。

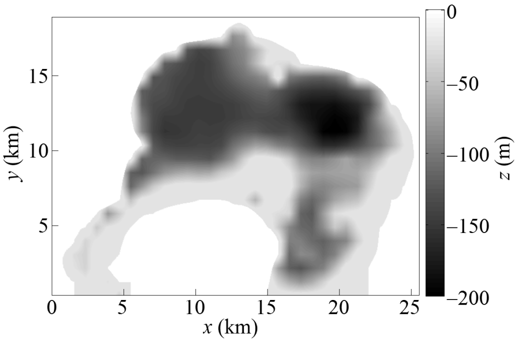
このときの，鹿児島湾内における津波の伝播過程をシミュレートする。数値解析には，山下ら（2012）で浅水条件を仮定した場合の数値モデルを適用する。ここでは，噴火口の位置が**図－1** に示す次の地点①，②，または，③である 3 通りの場合を対象とする。

地点①（31°37’57.7” N，130°37’34.3” E）
地点②（31°38’38.7” N，130°42’14.0” E）
地点③（31°37’59.9” N，130°44’28.7” E）



図－1　鹿児島湾北部における各地点の位置

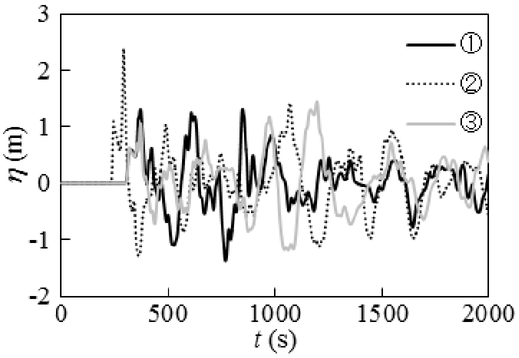
また，鹿児島湾北部の水深分布を**図－2** に示す。ここで，静水位から測った海底の位置 z が描かれている。



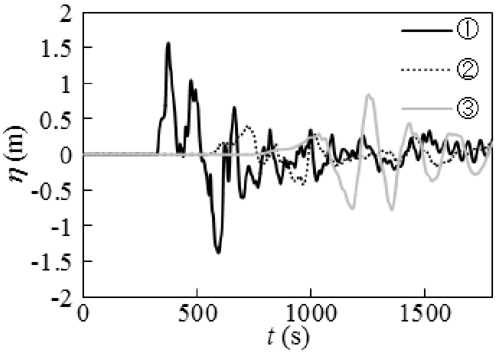
図－2　鹿児島湾北部における海底の位置

図－1 に示す次の 2 地点における水面変動の計算結果をそれぞれ**図－3** 及び**図－4** に示す。

地点 A（31°43’13.1” N，130°41’34.1” E）
地点 B（31°35’ 3.8” N，130°34’33.6” E）

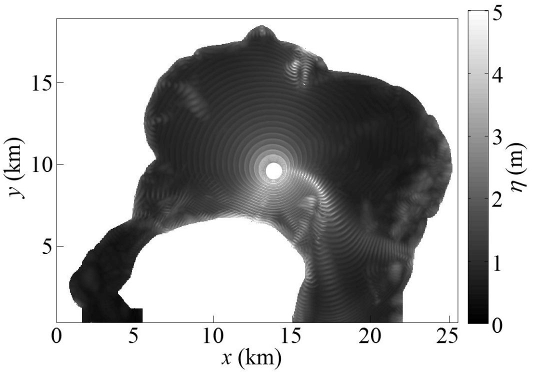


図－3　噴火口位置が**図－1** の地点①～③である場合の**図－1** の地点 A における水面変動



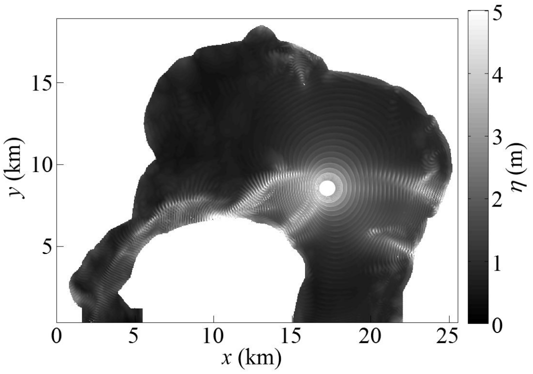
図－4　噴火口位置が**図－1** の地点①～③である場合の**図－1** の地点 B における水面変動

図－3 より，地点 A では，噴火口位置が地点②である場合に，津波高さが最大となっている。噴火口位置が地点②である場合の，湾北部における最大水位分布を**図－5** に示す。



図－5　噴火口位置が図－1 の地点②である場合の鹿児島湾北部における最大水位分布

他方，図－4 より，西桜島水道に位置する地点 B では，地点②で海底噴火が生じた場合よりも，より遠い地点③で海底噴火が生じた場合に，津波高さが大きくなっている。これは，桜島の海岸に斜めに，または，平行に入射した津波が，桜島の海岸に沿って西向きに進行するためである。噴火口位置が地点③である場合の，湾北部における最大水位分布を図－6 に示す。



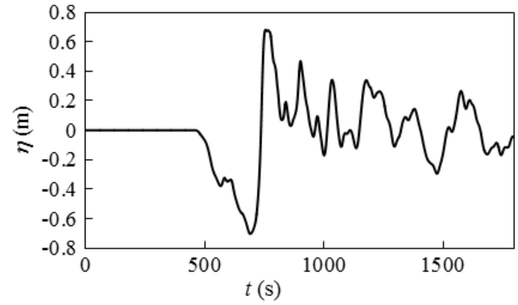
図－6　噴火口位置が図－1 の地点③である場合の鹿児島湾北部における最大水位分布

なお，図－3 及び図－4 より，噴火口位置が図－1 に示す地点①～③のいずれの場合においても，ここで想定したマグマ水蒸気爆発による津波では，地点 A 及び B とも，押し波が先行している。また，地点 A では，第 2 波，または，第 3 波の津波高さが 1 m を越えており，地点 B よりも，振動が減衰するために長時間を要する。この原因の一つとして，桜島北岸で反射した津波が，湾北奥に伝播することが挙げられる。

4．カルデラ陥没により生成される津波の伝播解析

火山噴火によりマグマ溜りのマグマが放出されると，カルデラ陥没が発生する可能性がある。鹿児島湾内における，1780 年 11 月 8 日の海底噴火では，カルデラ陥没により，海底が 1.5 ～ 3m 沈下した（都司，1997）。そこで，陥没の平面形が，中心が図－1 に示す地点④（31°38'5.3" N，130°40'45.5" E）にあり，半径が 1,500 m である円形であり，陥没域における海底が 3 m 沈下する場合を想定する。

この場合の，図－1 の地点 B における水面変動を図－7 に示す。



図－7　カルデラ陥没域の中心位置が図－1 の地点④である場合の図－1 の地点 B における水面変動

図－7 より，地点④を中心としてカルデラ陥没が発生する場合，西桜島水道に位置する地点 B では，引き波が先行することがわかる。

5．結　　論

海底噴火に伴うマグマ水蒸気爆発により生成される津波に対する，海底噴火の規模を表わす指標として，水蒸気に変化する海水の体積 V_w を提案した。そして，指標 V_w の値を設

定し，水蒸気に変化する際に海水が鉛直上向きに瞬時に膨張するという仮定のもとに，桜島近傍を対象として，マグマ水蒸気爆発により生成される津波の伝播解析を実施した。

その結果，西桜島水道では，海底噴火に伴うマグマ水蒸気爆発が，桜島北北東沖で発生する場合よりも，北東沖で発生する場合の方が，津波高さが大きくなることがわかった。また，鹿児島湾の北奥では，水面の振動が減衰するために，比較的長時間を要する傾向がある。

また，桜島北沖でカルデラ陥没が発生する場合を対象として，津波の伝播解析を行なった。そして，西桜島水道に，引き波が先行することが得られた。

謝　　辞

独立行政法人防災科学技術研究所の都司嘉宣客員研究員に，火山活動と津波の発生に関する資料を頂戴致しました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) 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.

2) 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.

3) 山下　啓・柿沼太郎・山元　公・中山恵介: マッハ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.

4) Fauske, H. K.: On the mechanism of uranium dioxide-sodium explosive interactions, Nucl. Sci. Eng., Vol. 51, pp. 95-101, 1973.

5) Maeno, F., Imamura, F., and Taniguchi, H.: Numerical simulation of tsunamis generated by caldera collapse during the 7.3 ka Kikai eruption, Kyushu, Japan, Earth Planets Space, Vol. 58, pp. 1013-1024, 2006.

6) 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.

7) 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.