

諏訪之瀬島火山において2003年11月に発生した噴火地震の初動解析

為栗 健・井口正人・八木原 寛*

* 鹿児島大学理学部南西島弧地震火山観測所

要 旨

諏訪之瀬島火山は御岳山頂火口においてブルカノ式～ストロンボリ式噴火を活発に繰り返している。山頂火口周辺に広帯域地震計を4点設置し、連続観測を行っている。2003年11月2日に数分の間隔で繰り返し発生した噴火に伴う地震動(噴火地震)の初動部分について以下のことが明らかになった。噴火地震の初動は全観測点において、上下動はdown、水平動は引きである。P波初動到達の0.2～0.3秒後に、上下動が卓越するパルス状の押し波が見られる。振動軌跡は、初動は火口方向へ直線的に引いており、パルス状の押し波はほぼ鉛直下方から到達していることを示している。初動部分の明瞭な8例の噴火地震について、各観測点の着震時を用い、初動およびパルス状の押し波の震源決定を行った。初動の引きを励起した震源は火口周辺の深さ200～300m付近、また、パルス状の押し波を発生させた震源の位置は火口直下の深さ400～600mであった。初動の引きは火口直下浅部における体積収縮、パルス状の押し波は、初動の震源よりやや深い場所における体積膨張によって励起されている可能性が高い。

キーワード: 諏訪之瀬島火山, 小規模噴火, 広帯域地震計, 噴火地震, 震源

1. はじめに

諏訪之瀬島は鹿児島市の南南西約250kmに位置する安山岩質の火山島である。1813～1814年、1884～1885年にはそれぞれ島の西岸および東岸に達する溶岩流を伴う噴火が発生している。1957年以降は、御岳山頂のカルデラの中央火口丘においてブルカノ式～ストロンボリ式噴火を繰り返し、この活動は1995年ごろまで続いた。その後、噴火活動の静穏期にあったが、2000年12月にこれまで噴火を繰り返していた中央火口丘の北北東側に新たな火口を形成し、噴火活動を再開した。それ以降、両方の火口において数週間程度の間隔で噴火活動を繰り返している(例えば、福岡管区気象台・鹿児島地方気象台、2003)。

桜島火山観測所(現:火山活動研究センター)では

1989年以降、山頂から南南西に3.3kmの場所において、地震動および空気振動の連続観測を行ってきた(Iguchi, 1991)。諏訪之瀬島火山で発生する噴火について、この観測点において片振幅 $10\mu\text{m/s}$ 以上の地震動と10Pa以上の空気振動を伴うものを「爆発」、地震動および空気振動振幅がそれ以下のものを「微噴火」と分類している。このうち「爆発」については、1989年に行われた集中総合観測において、複数の地震観測点が設置され、爆発地震の震源決定、初動の押し引きによる震源メカニズムの推定、波形の特徴などが調べられた(西ら, 1993; 沢田, 1993)。西ら(1993)は、爆発地震の初動の押し引き分布は全点で押しの場合、全点で引きの場合、押し引きが混在する場合などがあることを示しているが、桜島火山において見られるような全点において初動が押しで観測される(例えば、

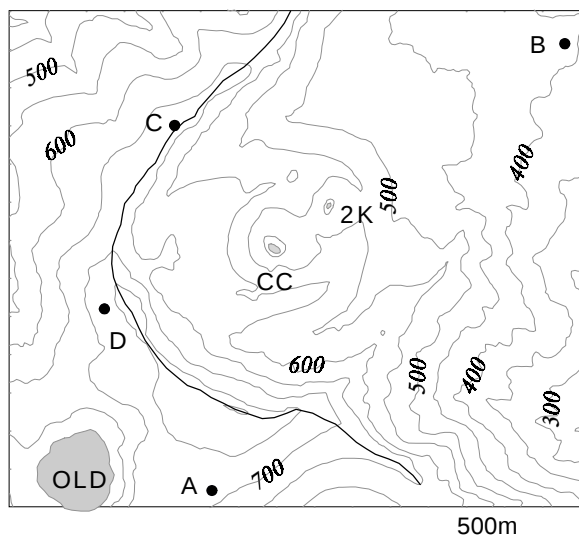


Fig. 1. Seismic observation network around the summit crater at Suwanosejima volcano. Broadband seismometers are installed at stations A, B, C and D. “CC” is central crater and “2K” is a new crater formed in December 2000. Bold curve represents caldera rim.

山里, 1987) といった統一的な爆発地震の押し引き分布は得られていない。この原因としては、観測点が火口から 0.9 ~ 3.0 km と離れているため減衰が大きいこと、また、初動が長周期である場合、短周期地震計では周波数帯域が不十分であることが可能性として挙げられる。また、爆発地震の震源の深さは海面下 1 km より浅いと報告されているが、詳細な震源の深さを得るためには火口近傍における観測が必要であると思われる。

そこで、本研究では中央火口丘を取り囲むように、420 ~ 820 m の距離に 4 点の広帯域地震計を設置することにより、噴火に伴う地震の初動を明瞭に捉えることを試みた。2003 年 11 月 2 日に 47 個の噴火が繰り返し発生した。その際の空気振動の振幅は最大で 4.6 Pa であった。これは、先の定義によれば「微噴火」に相当する。ここでは「微噴火」に伴う地震動を「噴火地震」と呼ぶこととし、初動付近の明瞭な 8 例の噴火地震について震源決定および初動部分の押し引き分布の解析を行ったので、それについて報告する。

2. 観測

2003 年 5 ~ 10 月にかけて諏訪之瀬島御岳山頂火口周辺において 4 台の広帯域地震計 (STS-2) を設置した (Fig. 1 の A ~ D 点)。観測点 A には噴火の発生を検知するために低周波マイクロフォン (ACO7144) を設置した。地震計および低周波マイクロフォンの信号はデータ変換装置 (LS-7000XT) により分解能 20bit および 24bit、サンプリング周波数 100Hz で A/D 変換された後、

Eruption earthquake (Vertical)

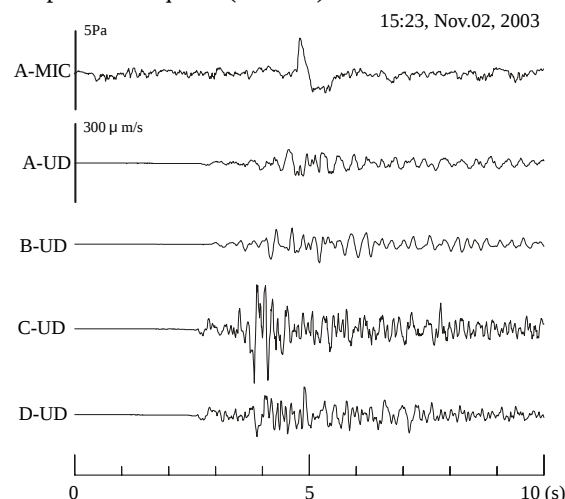


Fig. 2. Velocity seismograms and infrasonic records associated with eruption earthquake.

無線テレメータにより、観測点 A と D については南西に 20km 離れた悪石島、また、観測点 B と C については、北東へ 27km 離れた中之島、そこからデジタルアクセス 64 専用回線で火山活動研究センターへ伝送される。

3. 波形の特徴

Fig. 2 に各観測点の噴火地震の上下動速度波形記録と観測点 A における空気振動記録を示す。今回解析した噴火地震の継続時間は 20 ~ 30 秒程度である。火口に近い観測点 C で初動が最も早く到達しており、振幅も大きい。観測点 A では、初動から約 1.5 秒後に空気振動によって励起されたとされる振幅の大きな位相が見られる。Fig. 3 に各観測点の初動部分の拡大図を示す。水平動については火口から離れる方向 (RAD) とそれに直交する方向 (TRA) に座標変換してある。噴火地震の初動はゆるやかに始まり、上下動は down、水平動は引きである。初動到達の 0.2 ~ 0.3 秒後に、ゆるやかな引きの中に上下動が卓越するパルス状の押し波が見られる。これらの特徴は 4 観測点で共通に見られる。初動の引きを P1 相、0.2 ~ 0.3 秒後に現れるパルス状の押し波を P2 相と呼ぶことにする。Fig. 4 に観測点 A、D の振動軌跡を示す。P2 相の特徴を見るために、波形にはフィルター処理を施していない。P1 相は火口方向へ直線的に引いており、P2 相はほぼ観測点の直下から到達していることを示している。これらの特徴から P1 相および P2 相は P 波であると思われる。火口からの距離が 560 m と 700 m の観測点間でありながら、P1 相の振動軌跡の傾きは、火口に近い観測点 D の方が観測点 A より急であるため、震源の深さは浅いと推測される。さらに、P2 相の振動軌跡の傾きは両観測点

First part of eruption earthquake

15:23, Nov.02, 2003

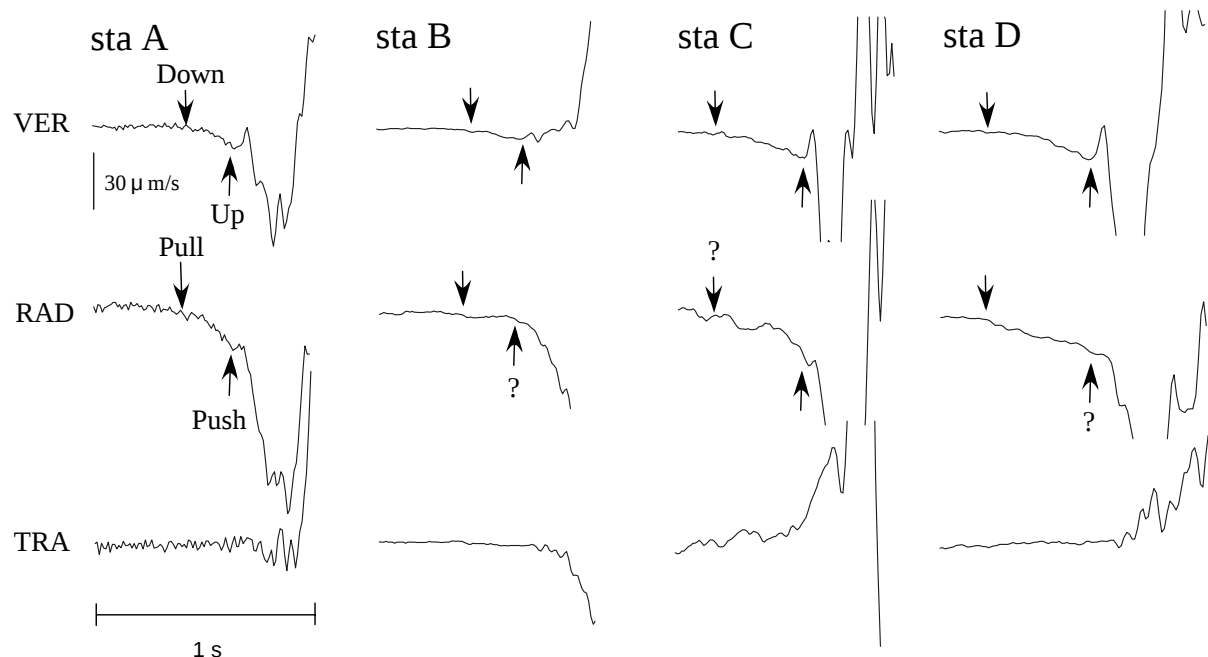


Fig. 3. First part of eruption earthquake. Three traces represent vertical (VER), radial (RAD) and transverse (TRA) components from top to bottom.

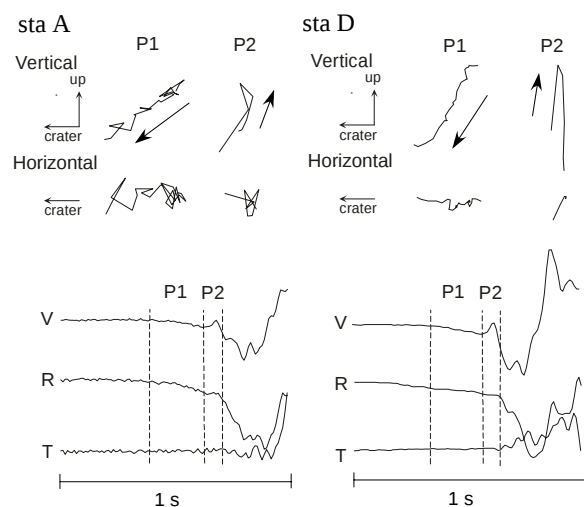


Fig. 4. Particle motions on vertical cross-section in the radial direction and horizontal plane (top) and velocity waveform (bottom) observed at stations A and D.

とも P1 相より鉛直に近く、P2 相を励起した震源の深さは P1 相を励起した震源より深いと考えられる。

4. 震源位置

4 観測点における位相の着震時を使用して、P1 相と P2 相を励起した震源の位置を求めた。その際、P 波速度 2.4 km/s (西ら, 1993) の半無限均質構造を仮定し

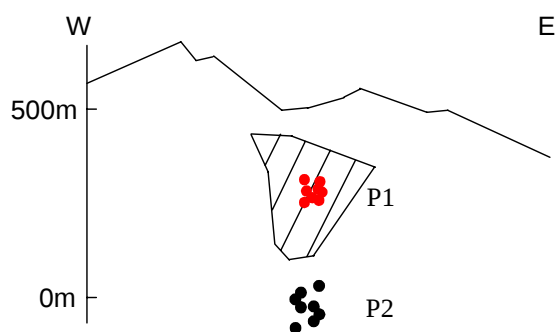
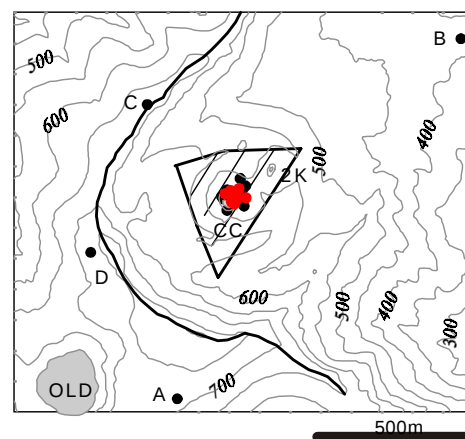


Fig. 5. Hypocenters of sources exciting P1 and P2. Hatched area indicates the hypocenters area of the P1 determined by pick error with ± 0.05 s of arrival time.

た。震源決定の結果、P1 相を励起した震源は火口直下の深さ 200 ~ 300 m 付近、P2 相を励起した震源は火口直下の深さ 400 ~ 600 m 付近であった。P1 相についてはゆるやかな引きで始まるため、着震時の読取精度が悪い。そこで、各観測点の読み取り値に ± 0.05 秒の幅を持たせた場合の震源領域も求めてみた。Fig. 5 にその結果を示す。斜線の部分が読み取り値に ± 0.05 秒の幅を持たせた場合の震源領域である。読み取り誤差を考慮しても P1 相より P2 相を励起する震源の方が深さは深い。

5. 押し引き分布

Fig. 6 に今回解析したすべての噴火地震の各観測点における P1 相および P2 相の押し引き分布と P2 相の片振幅を示す。8 例すべてについて、P1 相は全点で引き、P2 相は全点で押しであった。P2 相の振幅分布については、震央距離が短いほど振幅が大きい結果が得られた。

6. 議論

今回の解析で、数は少ないものの、噴火地震の初動の明瞭なものについては、いずれも P1 相は引き、P2 相は押しで始まることが分かった。西ら (1993) は諏訪之瀬島火山において、今回解析した噴火地震よりも振幅が大きく、強い空気振動を伴う爆発地震を解析したが、初動の押し引き分布は全点で押しの場合、全点で引きの場合、押し引きが混在する場合があるとしている。一方で、観測点が火口の南側に偏っている上、火口からの距離が遠く、初動が不明瞭な場合も多かったと述べられている。このような初動の押し引きにばらつきがある原因として震源と観測点間の距離が遠く、初動部分の減衰が大きいことが可能性として挙げられる。また、固有周波数 1Hz の短周期地震計を用いて観測を行っているため、今回、観測されているようなゆるやかな引きで始まる初動を検知できていなかった可能性がある。西ら (1993) は爆発地震の初動の押し引きはばらつきがあるものの、噴火活動の初期から最盛期の直後にかけて初動が引きとなる割合が多いとしており、数の上でも初動が引きで始まる爆発地震が圧倒的に多い。今回の結果と比較すると、恐らく、噴火活動の活発な時は地震動の初動が明瞭であり、初動は引きで始まっていたと考えられる。更に、押し引きが混在するとしている地震も火口近くで引き、遠方で押しとなる分布を示しており (西ら, 1993 の図 11), 遠方では初動が明瞭に検出できなかった可能性がある。しかしながら、今回解析した噴火地震は数時間のうちにまとまって発生したものであり、今後、火山活動によ

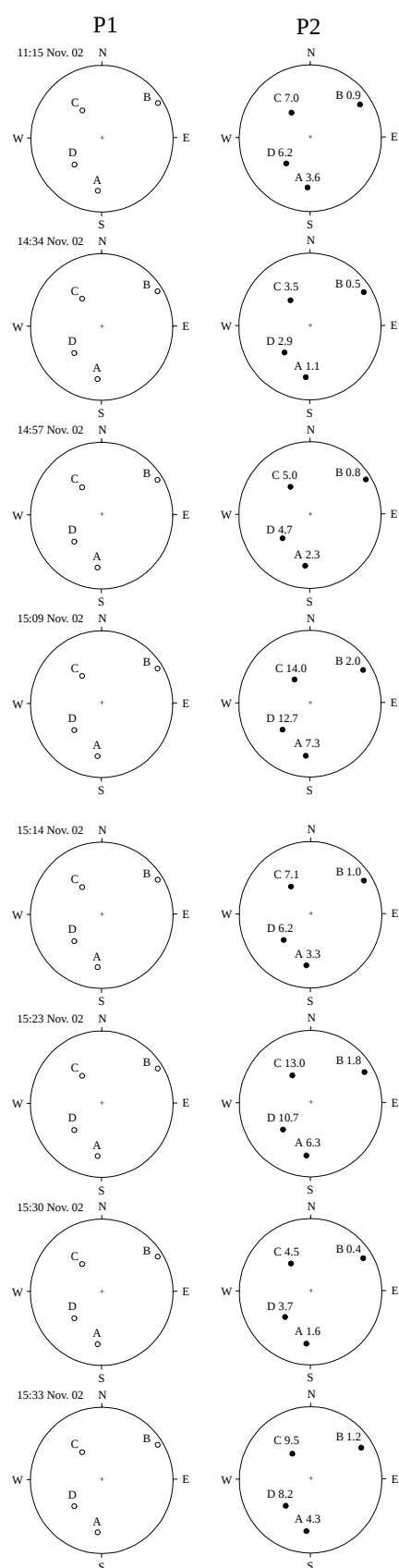


Fig. 6. Distributions of P1 and P2 phases projected on the equal area and upper hemisphere, and amplitude distribution of P2. Open and solid circles indicate down and up, respectively. Unit of amplitude is μ m/s.

っては、初動の押し引き分布が変化する可能性があるかもしれない。

西ら(1993)は火口から0.9~3.0 kmの距離にある観測点の初動の着震時を用いて、爆発地震の震源決定を行ったところ、震源の深さは海面下1 kmより浅いとしている。震源の深さが浅い場合、深さの精度を上げるためには震源に近い位置に観測点網を設置する必要がある。今回、中央火口丘を取り囲むように、火口中心から420~820 mの距離に4点の広帯域地震計を設置することにより、震源決定の精度向上を計ったところ、たしかに震源の深さは海面下1 kmよりも浅く、P1相を励起する震源は火口周辺の深さ200~300 m付近、また、P2相を励起する震源は火口直下の深さ400~600 mであることが分かった。

発震機構については、本研究ではまだ押し引き分布しか検討していない段階であり明確なことは言えないが、井口ら(2004)は今回解析した噴火地震の長周期成分の変位から、火口直下において茂木モデルで説明できる体積収縮が発生していること、また、桜島における爆発地震のメカニズム解(Tameguri et al., 2002)から類推すると、初動のゆるやかな引きは体積収縮、パルス状の押し波は体積膨張によって励起されている可能性が高い。今後、波形インバージョン法を用いてメカニズム解を求めていく予定である。

7. おわりに

諏訪之瀬島火山において、山頂火口に近接した4点の広帯域地震計を用いた観測を行い、噴火地震の初動部分について以下のことが明らかになった。

1. 噴火地震の初動はゆるやかな引きで始まり、初動の0.2~0.3秒後にパルス状の押し波が現れる。
2. ゆるやかな引きを励起する震源は火口直下200~300 m付近、パルス状の押し波を励起する震源は火口直下400~600 m付近である。
3. ゆるやかな引きは体積収縮、パルス状の押し波は体積膨張によって励起されている可能性が高い。

謝 辞

観測にあたり、鹿児島県消防防災課、十島村役場、同諏訪之瀬駐在員伊東隆幸氏にご配慮頂くとともに、鹿児島県防災航空センターには機材の空輸についてお世話になりました。観測機器の設置にあたり、京都大

学防災研究所の高山鉄朗氏、神田径氏、鹿児島大学理学部の平野舟一郎氏、京都大学大学院理学研究科の大倉敬宏氏、吉川慎氏、森健彦氏、東北大学北東アジア研究センターの後藤章夫氏、中村一輝氏、東京大学地震研究所の綿田辰吾氏、及川純氏、市原美恵氏、嶋野岳人氏、インドネシア火山調査所のCahya Patria氏にご協力いただいた。本研究に要した経費の一部は科学研究費特定領域研究(2)課題番号14080205(代表者: 京都大学、田中良和)、特定領域研究(2)公募研究(課題番号15038210および15038214)、京都大学防災研究所一般共同研究15G-08によってまかなわれた。

参考文献

- 井口正人・為栗 健・森 健彦・高山鉄朗・八木原寛・平野舟一郎・大倉敬宏・吉川 慎(2004): 活動火口近接観測による噴火機構の研究: 諏訪之瀬島火山の小規模噴火地震に伴う長周期パルス, 文部科学省科学研究費特定領域研究火山爆発のダイナミクス平成15年度研究成果報告書, 印刷中。
- 沢田宗久(1993): 諏訪之瀬島火山で観測された火山地震の波形解析, 第2回諏訪之瀬島火山の集中総合観測 - 平成元年10月 -, pp.23-42.
- 西 潔・江頭康夫・井口正人・高山鉄朗・園田忠惟・西村祐一・浜口博之・西村武志・沢田宗久(1993): 諏訪之瀬島火山の地震活動 - 1989年10月 -, 第2回諏訪之瀬島火山の集中総合観測 - 平成元年10月, pp.3-11.
- 福岡管区気象台・鹿児島地方気象台(2003): 諏訪之瀬島の火山活動 - 2002年6月~2002年10月 -, 火山噴火予知連絡会会報, 83, pp.100-102.
- 山里 平(1987): 桜島爆発地震の初動分布, 火山, 32, pp.289-300.
- Iguchi, M. (1991): Geophysical data collection using an interactive personal computer system (Part 1), Bull. Volcanolo. Soc. Japan, 36, pp.335-343.
- Tameguri, T., Iguchi, M., and Ishihara, K. (2002): Mechanism of explosive eruptions from moment tensor analyses of explosion earthquakes at Sakurajima volcano, Bull. Volcanolo. Soc. Japan, 47, pp.197-215.

Analysis of Eruption Earthquakes Accompanied with Small-scale Eruptions at Suwanosejima Volcano in November, 2003

Takeshi TAMEGURI, Masato IGUCHI, and Hiroshi YAKIHARA*

* Nansei-Toko Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Faculty of Science, Kagoshima University

Synopsis

Suwanosejima is an andesitic volcano and repeats small-scale eruption from summit crater every few weeks. We determine hypocenters of eruption earthquakes accompanied with small-scale eruption and clarify characteristics of the first part of eruption earthquakes from seismograms recorded by broadband seismometers at near the active crater. The first motion of eruption earthquake is dilatational (down and toward the crater in the vertical and radial components, respectively). Compressional wave with sharp onset dominated by the vertical component appears 0.2-0.3 s after the arrival time of the first motion. Particle motion of the first dilatational motion is linearized in the direction to the crater. The compressional motion comes from beneath the station. P-wave polarities of dilatational and compressional first motion were down and up at all the stations, respectively. The hypocenters of the dilatational and compressional motions were located at depths from 200 to 300 m around the summit crater and located at depths from 400 to 600 m beneath the summit crater, respectively.

Keywords: Suwanosejima volcano, small-scale eruption, broadband seismometer, eruption earthquake, hypocenter