

口永良部島火山における火山性地震観測

京都大学防災研究所 井口 正人・山本 圭吾

高山 鉄朗

北海道大学大学院理学研究科

前川 徳光

東北大学大学院理学研究科 西村 太志・橋野 弘憲

鹿児島大学理学部 八木原 寛・平野舟一郎

1. はじめに

口永良部島火山は、屋久島の西方 14km にある安山岩質の活火山島である。島の中心には新岳、古岳などの中央火口丘を有する。記録に残されている最古の噴火は 1841 年である。1933 年 12 月から 1934 年 1 月にかけて比較的規模の大きい噴火が発生し、この噴火は新岳南東の七釜集落において死者 8 名、負傷者 26 名の被害をもたらした。その後、口永良部島火山は 1945 年、1966 年、1980 年と頻繁に、新岳火口内あるいはその東に形成されている割れ目から水蒸気爆発を繰り返してきた。1966 年 11 月の噴火の 3 ヶ月前には地震観測が行われたが、火山性地震はほとんど観測されなかった¹⁾。京都大学防災研究所桜島火山観測所(現:火山活動研究センター)は、火口近傍での連続観測の必要性を顧みて、1991 年 12 月に発見された新岳の噴気異常を契機に、新岳火口の西方 0.4km の地点において火山性地震の常時観測を行ってきた^{2, 3, 4)}。新岳山腹の地震観測点から山麓まで無線テレメータにより地震の信号を伝送し、パソコンを用いたトリガー方式により地震波形を記録した後、桜島火山観測所まで加入回線を用いて波形を伝送している⁵⁾。1995 年以前は、火山性地震の月別発生頻度は 20 回程度であったが、1996 年 3~6 月には約 80 回/月と火山性地震が新岳火口周辺に頻発した。また、5 月末から 6 月はじめにかけて口永良部島の北東海域において地震が多数発生した⁶⁾。その後、火山性地震の活動はしばらく静穏化した。1999 年 8 月から再び活発化し、10 月には 321 回の火山性地震が観測された。また、12 月には屋久島と口永良部島との間の海域において、1996 年の活動と同様に地震活動が活発化した。その後も火山性地震活動の活発な状態が続いている。口永良部島では 1980 年の噴火を最後に、約 20 年間、噴火が発生していないが、火山性地震活動は活発化の傾向にあり、火山噴火予知計画に基づいて、2000 年度の集中総合観測が口永良部島火山において実施された。そのうち、地震観測は京都大学、北海道大学、東北大学、鹿児島大学によって 2000 年 11 月末から 2001 年 3 月まで行われた。

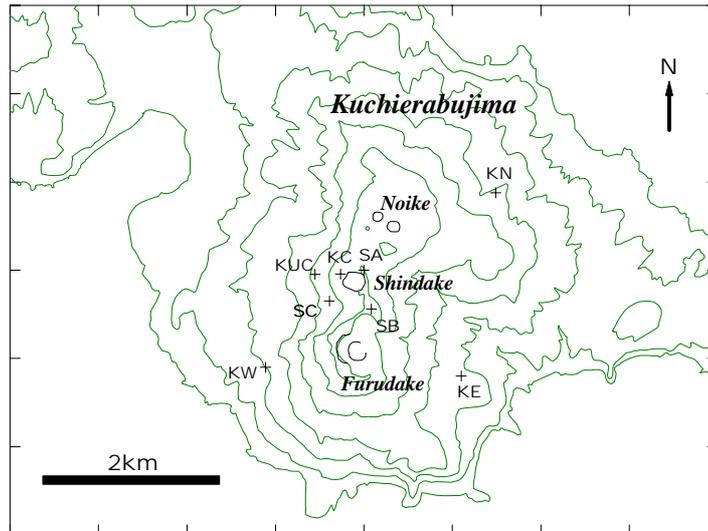


図 1. 地震観測点位置図。地震計の位置を十字で示した。観測点 KUC は、常時観測点である。

口永良部島において発生する地震については、構造性地震に類似し、P 波および S 波位相が識別できるものは A 型地震とみなされてきたが、それ以外の S 波位相が不明瞭な地震は、10Hz 以上の高周波が卓越する高周波地震、2~4Hz の低周波からなる低周波地震、その両者が混合している Hybrid 型、長いコーダをもち単色波的な様相を呈す Monochromatic 型に分類されている⁴⁾。火山性地震の震源位置は、3 点観測網により推定されてきたが、火山性地震の到来方位は新岳方向に決められている^{1, 7-10)}。1996 年の火山性地震の活動の活発化に際し、山本・他(1997)⁶⁾は、火山性地震の震源決定精度を向上させるため、口永良部島の山体を取り囲むように、山麓および西山腹に地震計を配置し、火山性地震の震源を新岳火口周辺の海水面付近の深さに求めた。また、低周波地震およびモノクロマティック微動の初動分布から、その発生メカニズムが通常の構造性地震とは異なっていることを示した。今回の集中総合観測では、高周波地震の高精度震源決定とメカニズムの推定を目的として、山麓だけでなく、新岳火口を取り囲むように地震計を設置した。また、広帯域地震計などを設置してモノクロマティック微動の周波数特性を調べた。本稿では、口永良部島火山において観測された高周波地震およびモノクロマティック微動の特性について述べる。

2. 観測

図 1 に地震観測点の配置を示す。常設観測点 KUC に加え、2000 年 11 月 29 日から 2001 年 3 月 18 日まで、7 観測点を新たに設置し観測を行った。観測点 KUC には固有周波数 1Hz の 3 成分速度型地震計が設置されている。地震計からの信号は、これまでイベントリガー方式

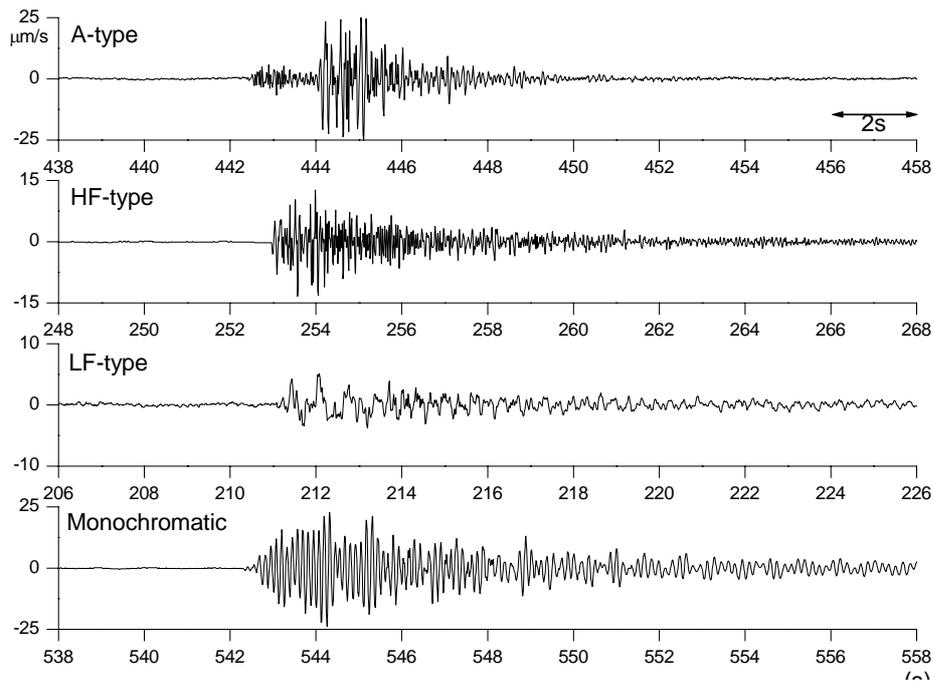


図 2. 集中総合観測中に観測された典型的な波形の例。観測点 KUC において観測されたものを示す。

により記録されていたが、集中総合観測の期間中はパソコンに連続収録した。新岳の火口周辺における火山性地震の震源位置を精度よく決定するために火口を取り囲む SA, SB, SC 観測点には固有周期 2Hz の速度型地震計(上下動)を設置した。地震計からの信号は特定小電力簡易無線テレメータにより、本村集落まで伝送し、データロガー (LS8000WD) に連続収録した。新岳火口西縁の KC には、加速度計 3 成分 (Akashi, 6A3) を設置し、データロガーに連続収録した。また、山麓の KW, KE の観測点には広帯域地震計 (STS-2) を、KN には加速度計 (6A3) を設置し、それぞれデータロガー (LS8000WD および LS8000SH) に連続収録した。いずれの観測点でも 30Hz の low pass filter を施した後、100Hz でサンプリングした。

3. 波形の特徴

集中総合観測中に記録された典型的な地震波形の例のうち、常時観測点 KUC において観測された地震波形の例を図 2 に示す。これまで知られているような A 型地震、高周波地震、低周波地震およびモノクロマティック微動が観測された。観測された火山性地震の 90% は高周波地震であった。これらの地震の初動から 10.24s 間のスペクトルを図 3 に示した。A 型地震は、8 ~ 10Hz 付近にピークをもち、それよりも高周波側の 25Hz 付近まで大きな振幅を有する。高周波地震は、A 型地震よりも更に高周波成分が卓越しており、6Hz から 30Hz 付近までほぼフラットなスペクトル構造をもつ。なお、地震波形の観測に際し、30Hz の low pass filter を施しており、30Hz よりも

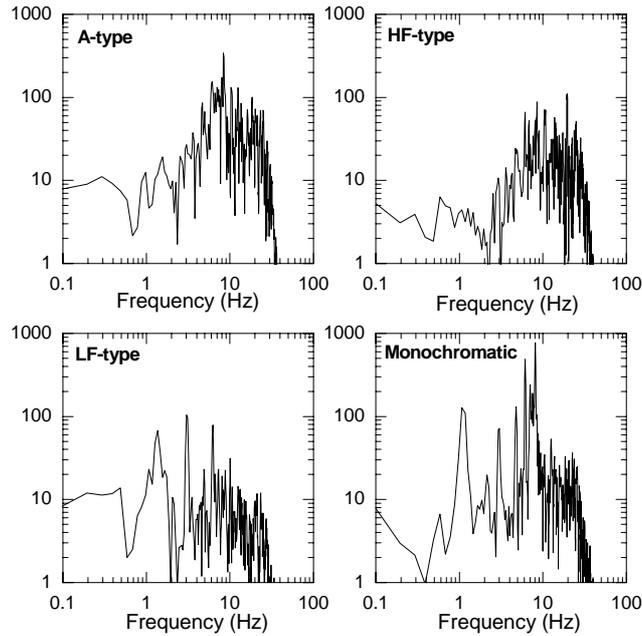


図 3. 火山性地震の速度スペクトル。地震波形は図 4 に示した。スペクトルは FFT により初動から 10.24s の記録を用いて計算した。

高周波側まで帯域が延びている可能性がある。一方、低周波地震は低周波成分が卓越しており、図 3 の例では 1.3Hz, 3Hz, 6.5Hz の周波数にピークがみられる。7Hz 以上の高周波成分は欠如している。モノクロマティック微動では、8.0Hz に最も卓越したピークが存在するが、それ以外に 1.1, 3.0, 6.2Hz にもピークがみられる。

3.1. 高周波地震

新岳火口周辺の SA, SB, SC, KC および KUC の 5 観測点における P 波初動の着震時を用いて高周波地震の震源位置を求めた。口永良部島の深さ 4km までの平均的な P 波速度は 3.3km/s と求められているが、新岳周辺の浅い部分については $V_p=2.0 \sim 2.2\text{km/s}$ が妥当な速度とされている⁶⁾。今回の震源決定では $V_p=2.0\text{km/s}$ の半無限均質構造を仮

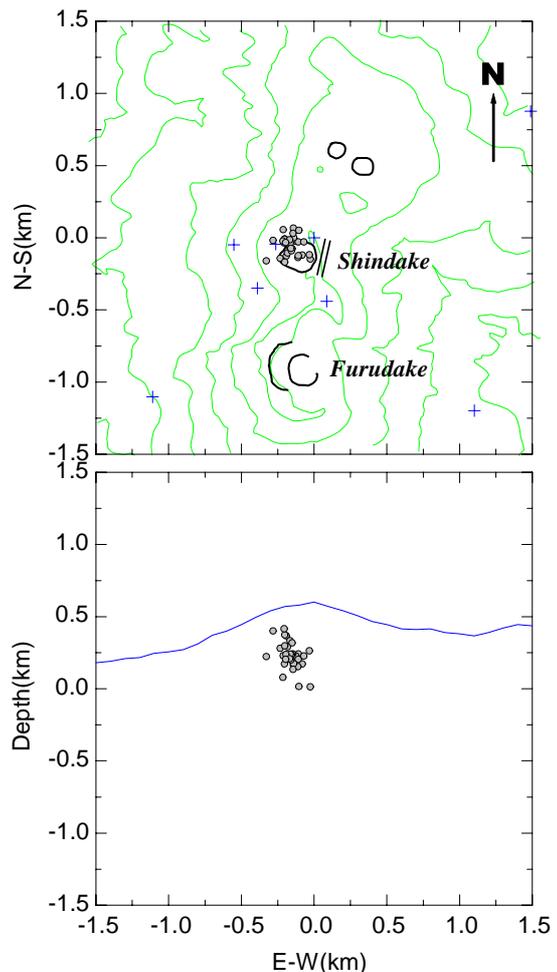


図 4. 高周波地震の震源分布。十字は観測点を示す。上: 震央分布。下: 東西断面における震源分布。

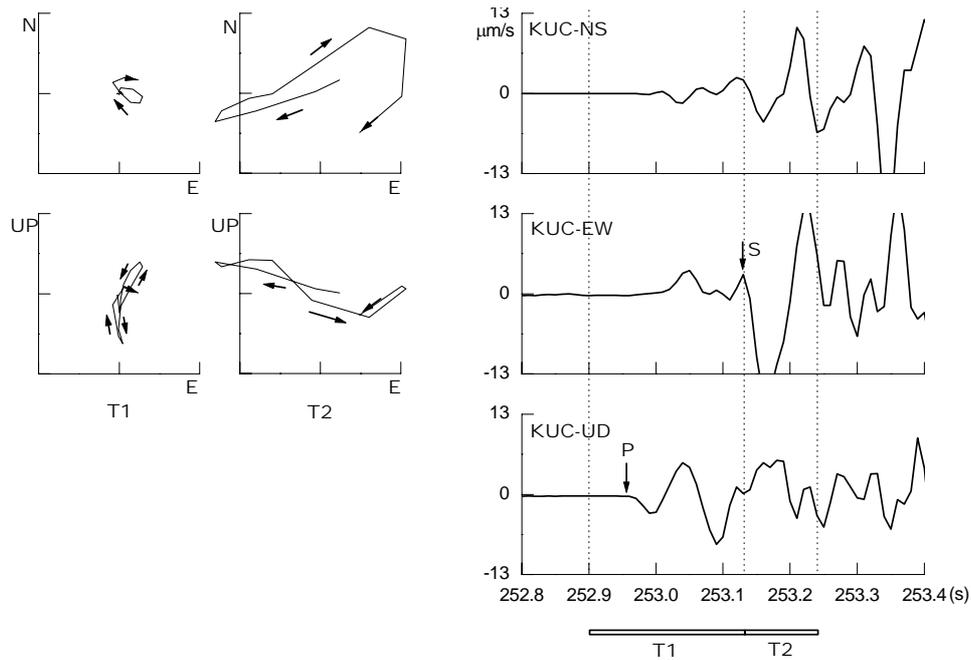


図 5. 高周波地震の初動付近の振動軌跡。振動軌跡は水平面および東西断面に投影した。右側に 3 成分の速度記録を示した。“P”および“S”は、それぞれ P 波、S 波初動を示す。

定して震源決定を行った。震源位置を図 4 に示す。震源の多くは、新岳の西側の火口縁付近に集中して分布する。震源の位置の標高は 100 ~ 400m であり、深さは 100m ~ 400m と極めて浅い。高周波地震の P 波初動は、必ず、KC、SA または SC、SB、KUC の順に到達し、求められた震源位置は妥当なものと考えられる。1980 年 9 月 28 日の水蒸気爆発は、新岳の東の割れ目において発生したが、今回の観測では新岳火口の東部分には、震源は求まらなかった。また、古岳において発生する地震は観測されなかった。

図 5 に KUC 観測点における初動から 0.3s 間の振動軌跡を示す。初動はほぼ真下から入射しているが、後続の P 波の到来方向は、KUC 観測点からみてほぼ東南東であり、求められた震源域の方向を示す。P 波初動の 0.2 秒後に水平動の東西成分に振幅の大きな位相が現れる。振動軌跡の鉛直断面では、ほぼ水平方向に振動し、P 波初動と直交している。また、水平面でも振動軌跡は P 波初動と直交して北東 - 南西方向に振動しており、この位相は、S 波と考えられる。Vp/Vs を 1.73 と仮定すると、S-P 時間 0.2s から震源距離は 550m となり、求められた震源の深さは妥当なものと考えられる。

次に、高周波地震の発震機構を求めるため、初動の押し引き分布を調べた。初動の押し引き分布を上半球等積投影し、可能なメカニズムを求めた(図 6)。火口周辺の 5 観測点では、初動はすべて引きであるか、震央に近い観測点において引き、やや離れた観測点では押しであることがわかる。押し引きが混在する場合があること、particle motion からは S 波が確認できることから考えて等方的な力源は考えにくく、構造的な地震と同様に 4 象限型の初動分布を示すものと考え

たほうがよさそうである。図 6 に composite mechanism 解を示した。4 象限型の発震機構をもつとすれば、震央に近い KC 観測点で初動は常に引きで、震央から遠い観測点においては初動が押しで観測されることから考えて、正断層型のメカニズム解が最も妥当と思われる。図 6 の composite mechanism からは、断層面の走向はほぼ南北方向で、張力軸は東西方向とした場合が、もっとも初動分布をうまく説明できる。

高周波地震は特徴的な発生様式を示す。単発的に発生することもあるが(図 3)、図 7 に示すように 2~4s 前に、1~2 個の前駆地震をしばしば伴う。観測された高周波地震の約 40% が前駆地震を伴った。前駆地震は、main shock よりも常に振幅が小さく 1/5~1/10 程度である。しかも、2 個の前駆地震を伴うときは、振幅が順次、増加していくことがわかる。前駆地震の震源位置は、main shock と同様に、新岳火口の西縁の浅い場所に決まるが、前駆地震と main shock では波形が異なることから、隣接した別の場所において発生しているものと思われる。図 8a に 2 つの前駆地震と main shock について、初動から 1.5s 間のスペクトルを示した。スペクトルの構造は互いに類似しており、いずれも高周波地震に特徴的な 6~30Hz の高周波成分が卓越している。比較のために図 3 に示した A 型地震では、P 波初動の約 1.8 秒後に顕著な S 波が観測されているが、S 波は P 波に比べ 8Hz 付近の低周波成分が卓越していることがわかる(図 8b)。高周波地震の 2 つの位相は互いに類似していることから、P 波と S 波ではなく、独立した 2 つのイベントが連続して発生したものと思われる。また、図 7 の最下段に示すように、初動は明瞭でなくゆるやかに始まり微動に類似した波形を示すものもある。この高周波微動のスペクトルも高周波地震のスペクトルと同様に 6~30Hz の帯域をもち、高周波地震の連続的な発生である可能性が高い。

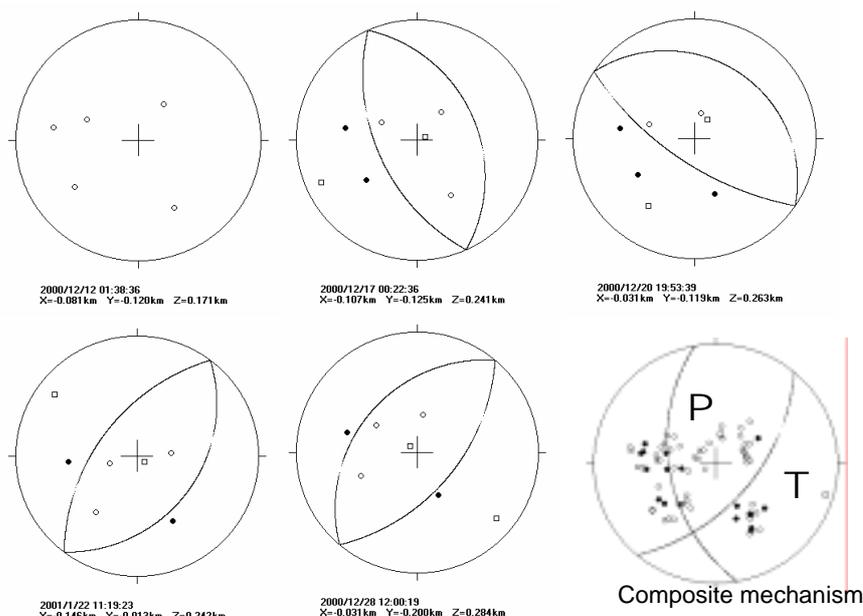


図 6. 高周波地震の P 波初動分布。上半球に等積投影した。黒丸および白丸はそれぞれ初動の押しおよび引きを示す。右下の図は composite 解を示す。

3.2. モノクロマティック微動

観測点 KC, SA, SB, SC, KUC, KW, KE におけるモノクロマティック微動の地震波形を図 9 に示した。観測点 KC には、加速度計が設置されているので、図 9 には積分した速度波形を示した。また、初動から 20.48 秒間のスペクトルを図 10 に示した。6.2Hz あるいは 8.0Hz のピークが卓越し、それ以外にもいくつかのピークが見られる。ピークの振幅は各観測点によって異なるが、1.1, 3.0, 4.8, 6.2, 8.0Hz のピークはすべての観測点に共通して見られる。1.1, 3.0, 4.8, 6.2Hz のピークは狭い周波数帯域にエネルギーが集中しているが、8.0Hz のピークでは 7Hz から 9Hz にかけて帯域が広がっており、この特徴はすべての観測点にみられる。このことから、これらの周波数の波は、震源において発生しているものと考えられる。図 10 の最上段に KC における加速度スペクトルを示した。加速度領域では、28Hz 付近まで周波数帯域が伸びていることがわかる。6Hz よりも高周波側では、ピーク幅が広がっている。

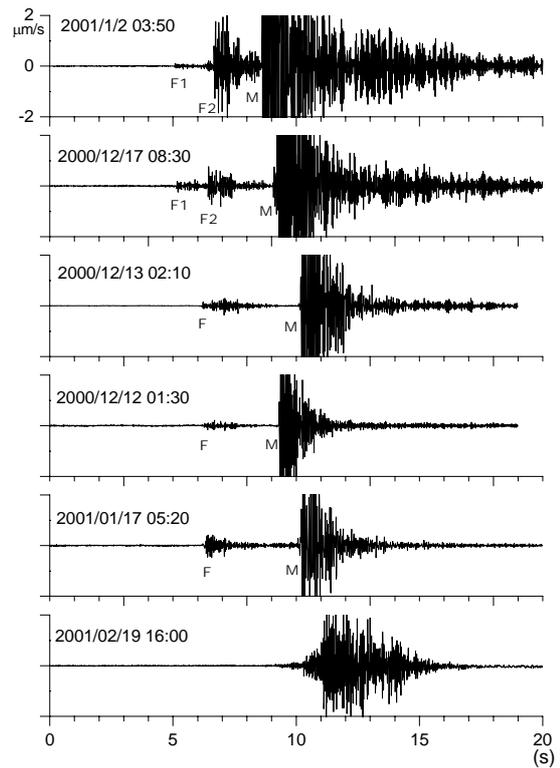


図 7. 前駆地震を伴う高周波地震の例。“M”は主震，“F”または“F1”および“F2”は前駆地震を示す。前駆地震は、主震の 2-4 秒前に発生する。最下段に微動に類似した高周波地震を示した。

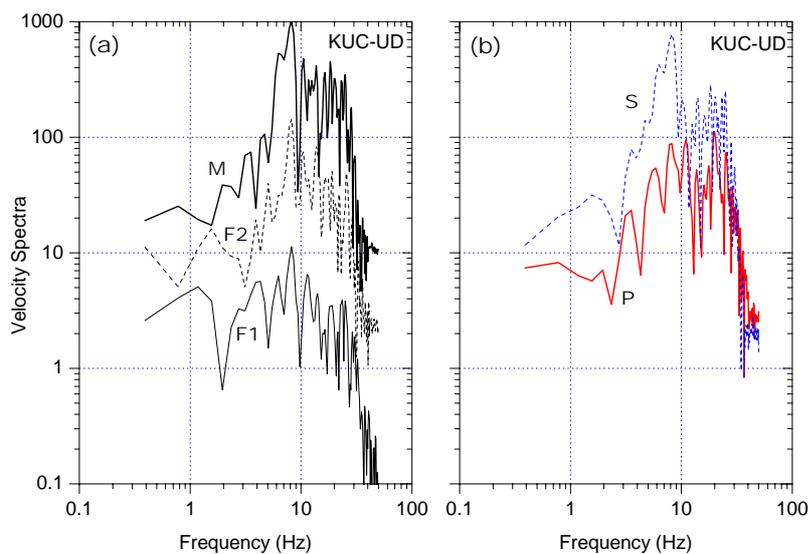


図 8. (a) 高周波地震の前駆地震と主震のスペクトルの比較。地震波形は、図 9 の最上段に示した。スペクトルは、前駆地震と主震の初動から 1.5 秒間の記録から求めた。(b) A 型地震の P 波および S 波のスペクトル。

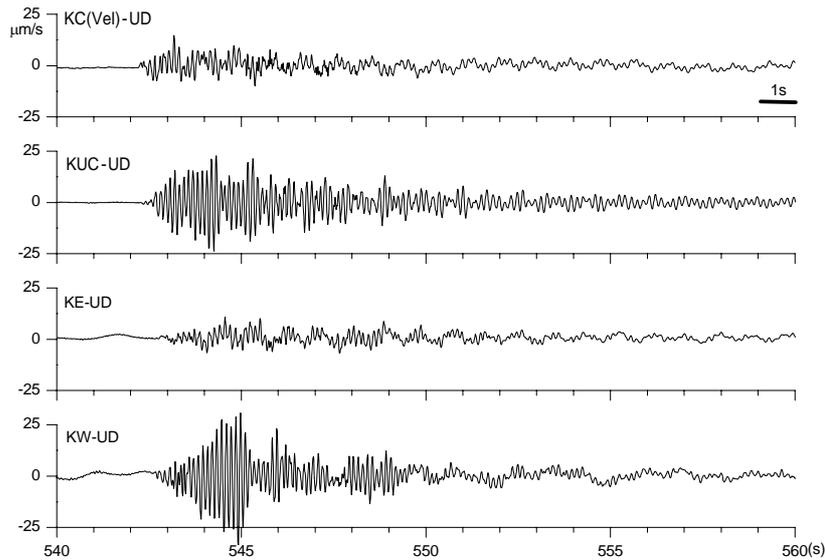


図 9. モノクロマティック微動の波形。最上段の記録は、KC 観測点において得られた加速度記録を積分して速度波形に変換したものである。

4. 議論

これまで、P 波、S 波の位相が明確に識別できるものを A 型地震、S 波の識別が困難であるものうち、高周波成分が卓越するものを高周波地震、2-4Hz の低周波成分が卓越するものを低周波地震として分類してきた。このうち、高周波地震については、(1)新岳火口の西縁の深さ 100 ~ 400m と極めて浅い場所に集中して発生していること、(2)P 波初動の押し引き分布から、高周波地震のメカニズムは、東西伸張の正断層が最も妥当な解である事がわかった。正断層型のメカニズム解が得られたこと、また、particle motion から P 波初動の 0.2s 後に S 波が同定できたことから、高周波地震は、A 型地震や構造性地震と同様に岩石のせん断破壊によって生じ、「非常に浅い」volcano-tectonic 地震に位置付けられるべきものである。高周波地震は、観測点から数百 m 以内の震源距離において発生しているため、

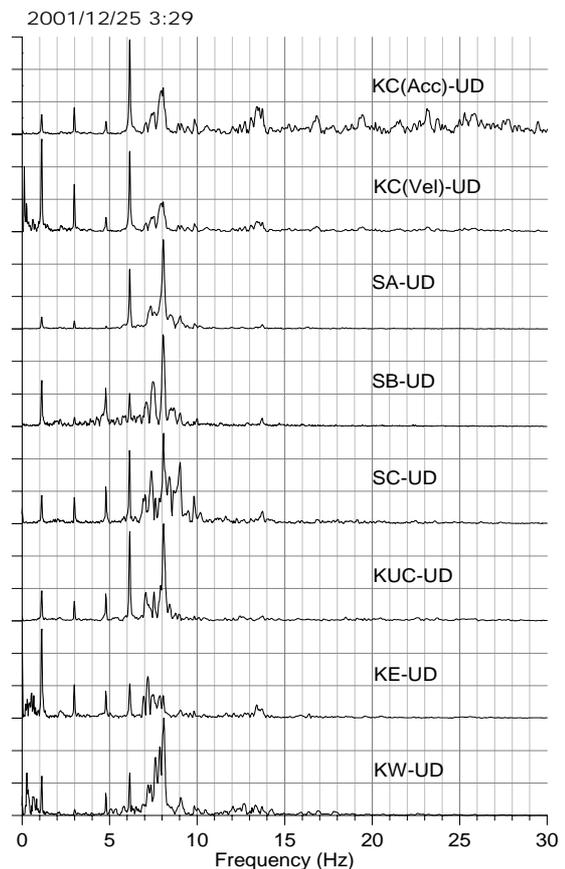


図 10. 全観測点におけるモノクロマティック微動のスペクトル。スペクトルは初動から 20.48 秒間の記録を用いて FFT により計算した。最大振幅で正規化して示した。最上段は KC 観測点における加速度スペクトルであり、2 番目はそれから計算した速度スペクトルである。

S-P 時間が 0.2 秒程度と短く、これまで、観測波形から直接、S 波を同定することが困難であったと思われる。震源距離数百 m 以内の高周波地震は、震源距離が 15km の口永良部島と屋久島間の A 型地震にくらべ、スペクトルの帯域がより高周波側に伸びているが(図 3)、震源に近接した観測点では高周波成分が減衰することなく観測されているため、このようなスペクトルの違いが生じたものと考えられる。

また、高周波地震の震央は、新岳火口の西縁付近に集中する。熱異常は、火口の北西～西～南西の縁およびそこから 100m 以内の領域に存在し、この領域では弱いながら多数の噴気が存在する¹¹⁾。高周波地震の震央分布は、この熱異常域にほぼ一致している。一方、1980 年に水蒸気爆発が発生した火口東側の割れ目には熱異常はなく、今回の観測ではこの地域に高周波地震は発生していなかった。高周波地震の震源域は、火口西部の熱異常域に一致しており、火口西側浅部での地熱活動あるいは熱水活動が高周波地震を引き起こしている可能性が高い。高周波地震は A 型地震と同様のメカニズムをもっており、地熱地域の岩石のせん断破壊によって発生しているものと推定される。高周波地震は、2～4 秒前に微小な前駆地震をしばしば伴うなど、連続的に発生する傾向がある。2-3 秒前に微小な前駆地震を伴う高周波地震は、Ruapehu 火山でも報告されている¹²⁾。また、White Island 火山では、高周波地震の連続的な発生によって生じると考えられる“Spasmodic burst”が頻発する¹³⁾。口永良部島火山において発生する高周波地震は、Ruapehu 火山や White Island 火山のように火口湖が存在し、浅部熱水系が発達している火山に発生する高周波地震と発生様式が類似している。

高周波地震のメカニズムは、東西方向に伸張する正断層型の解が得られた。このことは口永良部島の火口周辺では、東西伸張の応力場が支配的であることを示唆する。新岳の東側の割れ目が南北に走行していること、また、野池～新岳～古岳などの火口列が、南北方向に並んで存在することは、東西伸張の応力場を反映しているのかも知れない。

口永良部島のモノクロマティック微動は、その波形の特性から浅間山や草津白根火山において発生する T 型地震¹⁴⁾あるいは N 型地震¹⁵⁾に類似している。その周波数特性を調べたところ、8Hz に卓越したピークが存在し、それ以外にも 1.1, 3.0, 4.8, 6.2Hz にピークが存在することがわかった。スペクトルに卓越したいくつかのピークをもつ微動としてハーモニック微動がよく知られている。例えば、桜島火山では、C 型微動とよばれ、基本周波数の整数倍にピークが存在する harmonic なスペクトル構造をもつ¹⁶⁾。このようなスペクトル構造をもつハーモニック微動は、Langila 火山¹⁷⁾や Sumeru 火山¹⁸⁾で観測される。一方、口永良部島の微動は、ハーモニック微動に比較して、スペクトル構造が複雑である。1.1, 3.0, 4.8Hz のピークは、1.8-1.9Hz の等間隔で存在するが、最も低周波のピーク 1.1Hz の整数倍ではない。また、6.2Hz のピークは 4.8Hz のピークからは 1.4Hz の間隔で等間隔ではなくなっている。口永良部島火山の微動のように、そのス

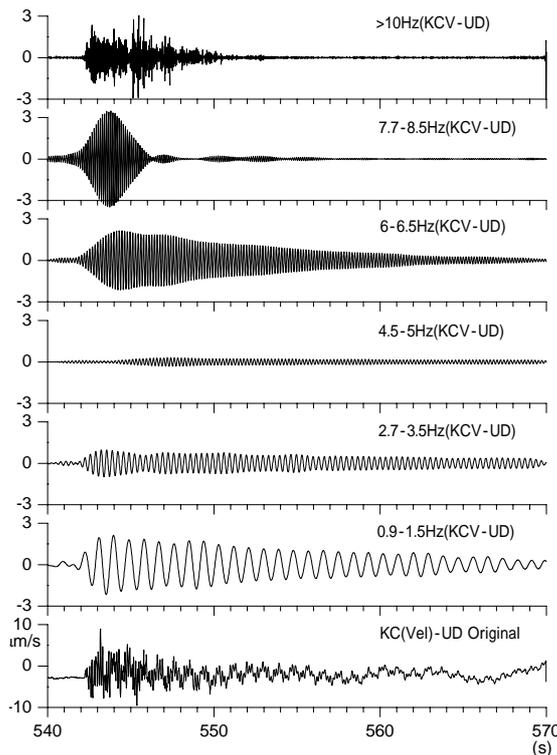


図 11. バンドパス・フィルターを施したモノクロマティック微動の波形。元波形は最下段に示した。この速度記録は、観測点 KC における加速度記録を積分して求めたものである。

流体の溜まりの振動を励起させるトリガー過程と考えられている²⁰⁾。口永良部島のモノクロマティック微動でも、7Hz 以上の高周波成分が、火山性微動の頭部に集中しており、トリガー過程を反映しているものと考えられる。そのスペクトルの特徴は、高周波地震のスペクトルに類似しており、高周波地震の発生が流体の振動のトリガーとなっているのかもしれない。高周波部分の波形は、典型的な高周波地震のように impulsive な波形ではなく、図 5 の下段に示したような微動に類似したものである。高周波地震は連続して発生する傾向があり、1つの高周波地震の発生によってモノクロマティックなコーダ部分が励起されるのではなく、高周波地震の連続的な発生が、resonator としての流体溜まりの振動を励起させたものと考えられる。

5. まとめ

- 1) 口永良部島火山に発生する高周波地震は、噴気を伴う地熱地帯である新岳火口の西縁の深度 100 ~ 400m の浅い場所に発生し、正断層型のメカニズムを持つことから火山浅部の地熱・熱水活動に伴う、周辺岩石のせん断破壊によって発生するものと考えられる。

ペクトルのピークが、低周波側では等間隔に近く現れるが、基本周波数の整数倍ではない例として、草津白根山の微動¹⁹⁾がある。更に、口永良部島のモニタリング微動の 7Hz よりも高周波側のピークでは、そのスペクトルは broad になっている。図 11 に 1.1, 3.0, 4.8, 6.2, 8.0Hz 付近の周波数帯域の band pass filter および 10Hz の high pass filter を施した波形を示す。1.1, 3.0, 4.8Hz, 6.2Hz の帯域の振動は、継続時間が長く、一定の割合で減衰していくことがわかる。これらのピークは、岩石の中の流体溜まりの固有振動によって励起されている可能性が高い¹⁹⁾。一方、7.7-8.5Hz の周波数帯域では初動から約 3 秒間に、10Hz よりも高周波側の帯域では、振動は初動から約 9 秒間にしかみられない。高周波成分が、モノクロマティックな微動の初動付近にみられる現象は、インドネシアの Kelud 火山でも観測されており、

- 2) モノクロマティック微動のスペクトルは、いくつかのピークからなる。7Hz よりも低周波側のピークは鋭く、その振幅は時間とともにゆるやかに減衰する。8Hz よりも高周波側では、そのエネルギーはイベントの頭部に集中していることから、高周波地震の発生がトリガーとなって、低周波側にピークをもつ波を発生する resonator を励起したものと推定される。

口永良部島において発生する高周波地震やモノクロマティック微動は、火口湖が存在したり、地下熱水系が発達している火山において発生する火山性地震と類似した特長をもち、その活動は火山浅部の熱水、地下水と密接に関連していることが推定される。火山浅部の熱水、地下水の分布など流体を含めた構造を明らかにしていく必要がある。

謝 辞

口永良部島火山の集中総合観測を実施するにあたり、鹿児島県総務部消防防災課、上屋久町役場および同口永良部島出張所にご協力をいただきました。記してお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 吉川圭三・江頭庸夫・西潔(1968): 口永良部島の地球物理学的調査, 京都大学防災研究所年報, 第 11 号 A, 133-140.
- 2) 京都大学防災研究所(1992): 薩南諸島における火山活動(1991年1月~1992年5月), 火山噴火予知連絡会会報, 第 53 号, 101-107.
- 3) 京都大学防災研究所(1995): 薩南諸島における火山活動(1992年6月~1995年5月), 火山噴火予知連絡会会報, 第 62 号, 62-64.
- 4) 京都大学防災研究所(1996): 薩南諸島における火山活動(1995年5月~1996年5月) 口永良部島火山の地震活動の活発化, 火山噴火予知連絡会会報, 第 65 号, 123-127.
- 5) Iguchi, M. (1991): Geophysical Data Collection Using an Interactive Personal Computer System (part 1) -Experimental Monitoring at Suwanosejima Volcano-, Bull. Volcanol. Soc. Jpn., Vol.36, 335-343.
- 6) 山本圭吾・井口正人・高山鐵朗・石原和弘(1997): 1996年口永良部島火山の地震活動の活発化について, 京都大学防災研究所年報, 第 40 号 B-1, 39-47.
- 7) 角田寿喜・前野昌徳・樽木孝利(1971): 口永良部島の地震と火山活動, 鹿児島大学理学部紀要(地学・生物学), No.4, 43-52.
- 8) 西潔・石原和弘・高山鉄朗(1975): 口永良部島火山における臨時地震観測結果, 京都大学防災研究所年報, 第 18 号 B, 53-58.

- 9) 京都大学防災研究所・東京工業大学工学部・鹿児島大学理学部(1981):1980年(9月28日)の口永良部島新岳の噴火(概報),火山噴火予知連絡会会報,第20号,1-9.
- 10) 加茂幸介・江頭庸夫・西潔・石原和弘・高山鉄朗・中村貞美(1984):口永良部島火山1980年9月の噴火活動,鹿児島県の地震と火山,第13・15号合併号,37-43.
- 11) 井口正人・鍵山恒臣(2002):口永良部島火山における赤外線熱測定,薩摩硫黄島・口永良部島火山集中総合観測報告書,137-142.
- 12) Hurst, A.W. and McGinty, P.J. (1995): Seismicity of Ruapehu volcano recorded during the 1994 seismometer deployment, Institute of Geological & Nuclear Science Report, 95/45, 13p.
- 13) Nishi, Y., Sherburn, S., Scott, B. and Sugihara, M. (1996): High-frequency earthquakes at White Island volcano, New Zealand: Insights into the shallow structure of a volcano-hydrothermal system, Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 72, 183-197.
- 14) 浜田信生・神宮博・生本光二(1975):減衰の遅い終期微動を伴う火山性地震について,火山,21,167-183.
- 15) Sawada, M. (1998): The source mechanism of B-type and explosion earthquakes and the origin of N-type earthquakes observed at Asama volcano, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, Vol.73, 155-265.
- 16) 加茂幸介・古澤保・赤松純平(1977):桜島の火山性微動の性質について,火山,第22巻,41-58.
- 17) Mori, J., Patia, H., McKee, C., Itikarai, I., Lowestein, P., De Saint Ours, P., Talai, B. (1989): Seismicity associated with eruptive activity at Langila Volcano, Papua New Guinea, Jour. Volcanol. Geotherm. Res., Vol.38, 243-255
- 18) 石原 和弘・井口 正人・グデ スアンティカ・スクハール(1995):インドネシア Semeru 火山の火山性地震・微動,京都大学防災研究所年報,第38号B-1,161-171.
- 19) Fujita, E., Ida, Y. and Oikawa, J. (1995): Eigen oscillation of a fluid sphere and source mechanism of harmonic volcanic tremor, Jour. Volcanol. Geotherm. Res., Vol.69, 365-378.
- 20) Lesage, Ph. And Surono (1995): Seismic precursors of the February 10,1990 eruption of Kelud volcano, Java, Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 65, 135-146.

(Received on November 28, 2001)