

口永良部島火山で発生するモノクロマティック微動 — 2019年9月以降の古岳山体周辺における活動 —

Activity of Monochromatic Events at Kuchinoerabujima Volcano from September 2019

山田大志・井口正人・中道治久

Taishi YAMADA, Masato IGUCHI and Haruhisa NAKAMICHI

Synopsis

Monochromatic events (MNCs), also known as N-type, T-type, or LP events, are volcanic earthquakes observed at plenty of active volcanoes. The characteristic waveform feature of sinusoidal oscillations is often interpreted as the MNC activity related to volcanic fluid supply at shallow depths. To understand the relation with volcanic activity, we investigate MNCs at Kuchinoerabujima volcano in the South of Kyusyu island, Japan. Focusing on the activity from September 2019, we find two major MNC activities in 2020 and 2022 regarding the seismic energy of MNCs (E_{mnc}). The 2020 activity almost corresponds to an eruptive period at the Shindake cone. However, we find that most MNCs in the focused period occurred beneath the Furudake cone, about 1 km apart from Shindake. The 2022 activity is more intense with E_{mnc} and quality factor Q . Most events in the 2022 activity are hybrid events with superposing high-frequency signals on the sinusoidal oscillations, which suggests that the fluid supply and oscillations trigger small fractures in the vicinity of the MNC source. We interpret the 2022 activity as representing the fluid supply that may have triggered particular seismicity, continuous tremor amplitude increase, and new crater lake formation at Furudake crater from July 2023.

キーワード: 口永良部島火山, 火山活動, 火山性地震, モノクロマティック微動

Keywords: Kuchinoerabujima volcano, Volcanic activity, Volcano earthquakes, Monochromatic events

1. はじめに

活火山で発生する地震活動や地盤変動は、火山活動に伴う浅部地殻の応答現象である。構造性地震を主とする地震活動は蓄積された応力の解放（破壊現象）、地盤変動は地下の圧力の増減としてそれぞれ考えることができる。一方で、熱や火山ガス（温泉ガス）の観測量は、その起源であるマグマの直接的な振る舞いを反映する可能性があると言える。しかし地表付近では大気の大擾乱や浅部構造の影響を受け易く、地盤変動や地震動に比べると熱や火山ガスの高精度な連続観測は容易ではない。

火山性地震は波形的性質によって複数のタイプに分類される。中でも、モノクロマティック微動（以下モノクロ地震）、N型地震（Aoyama and Takeo, 2000）、T型地震（浜田ら, 1976）、LPイベント（Kumagai et al., 2002; Taguchi et al., 2021）等と呼ばれるイベントは、特定の基本モード周波数と場合によってはその倍音成分など卓越する特徴的な周波数構造を有し、振幅が緩やかに減衰振動するという波形的特徴が知られている。多様な呼称が反映するように多くの火山で報告されているが、とりわけ熱水系や水環境の発達した火山（もしくは時期）での観測例が多い（北海道大学理学部附属有珠火山観測所, 1989; Gomez et al.,

1997; Hagerty and Benites, 2003; Milluzzo et al., 2010). この特徴や数値モデルに基づいた解析などからは、その励起機構について流体の注入によるクラックの振動や内部共鳴が示唆されている (Kumagai and Chouet, 2000). こうした考えに基づけば、モノクロ地震の活動は間接的に火山性流体の浅部火山体への供給についての情報を反映すると期待できる.

口永良部島は九州南部の活火山島であり、記録に残る最古の噴火である1841年以降、1年から30年程度の間隔で噴火活動が繰り返されている. 過去の噴火では、主に放出岩塊によって周辺集落に損害が出ており、特に1933年12月24日の噴火では34名の死傷者を出す噴火災害が発生した (井口, 2021). 京都大学防災研究所は、1991年から口永良部島火山において連続地震観測を実施している. 新岳山頂域を中心に展開された観測網によって、火山性地震の種類、発生領域、震源機構や活動様式などが明らかにされてきた (山本ら, 1997; 井口ら, 2001; 井口ら, 2007; Triastuty et al., 2009). 地震活動は1999年以降段階的に活発化し、またそれに同期する山体の膨張 (井口ら, 2002; Hotta and Iguchi, 2017), 地磁気変化 (Kanda et al., 2010), 地熱活動の顕在化と火山ガス組成の変化 (平林ら, 2007) が捉えられている. 2014年8月3日の噴火は、約15年間のこうした一連の活発化の後に発生した. 翌年の2015年5月29日には噴煙到達高度が9 kmに達する噴火が発生したが、この噴火においても2014年12月以降に火山ガス放出量の増加、地盤の膨張、地震活動の活発化、地熱域の顕在化、噴火6日前 (5月23日) に新岳西側山麓下で発生した有感地震 (マグニチュード2.4) といった先行過程が捉えられている (井口, 2021).

2015年の噴火活動以降は火山活動がしばし小康状態にあったが、2017年10月頃からわずかに地震回数

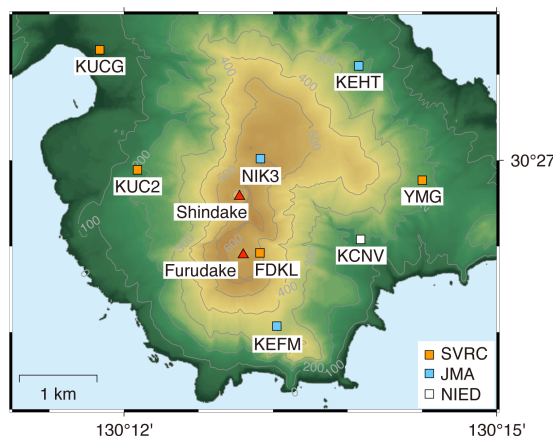


Fig. 1 Seismic station map at Kuchinoerabujima volcano. The red triangles are Shindake and Furudake craters.

が増加し始め、2018年8月15日には2015年5月23日の有感地震の震源に近い領域でA型地震が複数回発生した (京都大学防災研究所, 2018). 続く2018年10月21日から噴火活動が再開し、顕著な噴火は2019年1月29日まで続いた (京都大学防災研究所, 2019; Minami et al., 2022). 約1年後の2020年の1月から4月にかけても再び噴火活動が繰り返されたが、この2020年噴火活動は2019年12月頃を起点とする明確な山体の膨張を伴っており、地震活動も2018-2019年噴火活動と比べるより活発である (京都大学防災研究所, 2020). この特徴からは、2018-2019年噴火活動と比べると、2020年噴火活動は新たなマグマの貫入によって主に駆動されたものと見なせるかもしれない. この考えに基づき、本稿では2020年噴火に先立つ2019年9月以降の期間を対象とする. 当然ながら2018-2019年噴火活動やそれ以前を含む時系列の一貫した検討も重要であり、本稿とは別の機会に行うこととする.

以上の記録の残る噴火は、全て新岳山頂火口とその周辺に形成される割れ目火口で発生している. 新岳は野池と古岳の二つの山体の間に形成された最も若い山体である (下司・小林, 2006). 新岳北側の野池山での最新の噴火は、14,000~15,000年前の大規

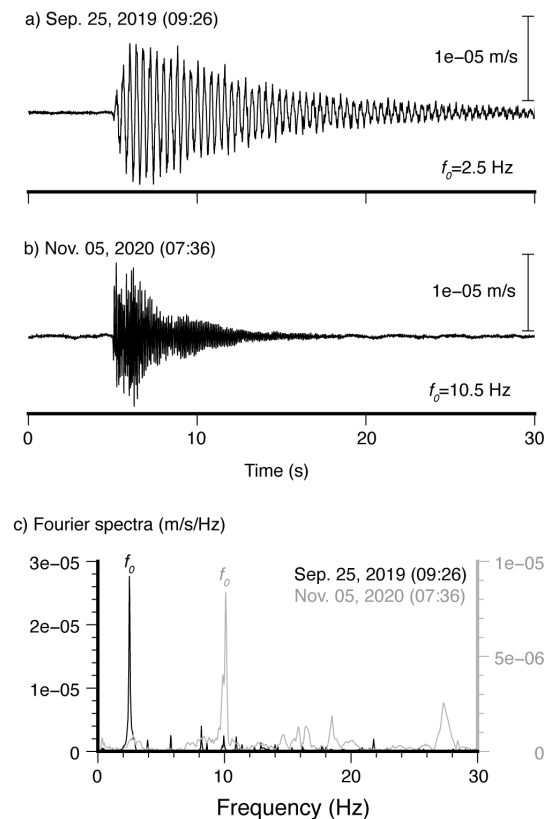


Fig. 2 (a, b) Examples of the vertical raw ground velocity at FDKL and (c) Fourier spectra of events in Fig. 2(a, b).

模噴火まで遡る。対して、南側にある古岳では約200年前までブルカノ式噴火や火砕流を主とする噴火活動が発生していたと推測されており（下司・小林, 2006），古岳山頂火口には噴気活動が継続的に存在している（平林ら, 2002）。

口永良部島での発生する火山性地震は、構造的な発震機構を有するA型地震、山体極浅部における構造的な地震と思われる高周波地震、低周波地震、ハイブリッド地震、モノクロ地震に大別される（井口ら, 2001）。特にモノクロ地震は2014年以前に段階的に発生した地震活動活発化の初期段階（井口ら, 2007），2015年5月29日噴火の直前期（井口, 2021）に発生している。マグマから遊離した火山ガスなどの流体が先行して地表付近に到達すると考えると、特徴的な火山活動に先立って活発化するモノクロ地震の活動特性は、火山性流体の浅部山体への供給という描像と整合的である。モノクロ地震の発生活動の特徴をより理解することは、火山活動推移の把握や評価に資する可能性がある。ハイブリッド地震については低周波地震に対して高周波成分が重畳する特徴が知られてい

る。こうした特徴は他の火山でも報告されているが（Harrington and Brodsky, 2007），帯域の異なる二つの成分が同じイベント内で励起される物理過程について、詳しい描像が得られているとは言い難い。本稿では、対象期間に口永良部島山頂域の地震観測網で捉えられているモノクロ地震、ハイブリッド型の性質を有するモノクロ地震の活動について主に着目し、波形的性質とその変遷の検討を通して、モノクロ地震の活動様式と火山活動との対応関係を議論する。

2. 口永良部島における地震観測

対象期間における口永良部島山頂域周辺の地震観測網をFig. 1に示す。京都大学防災研究所はFDKL（古岳下），YMG（湯向），KUC2（2022年3月10日以降、同名のGPS観測用ベンチマーク（井口ら, 2002）とは異なる），KUCGの4地点において固有周期1秒の短周期速度計による地震観測を実施している。新岳ないし古岳の山頂域で発生する火山性地震の特徴の詳

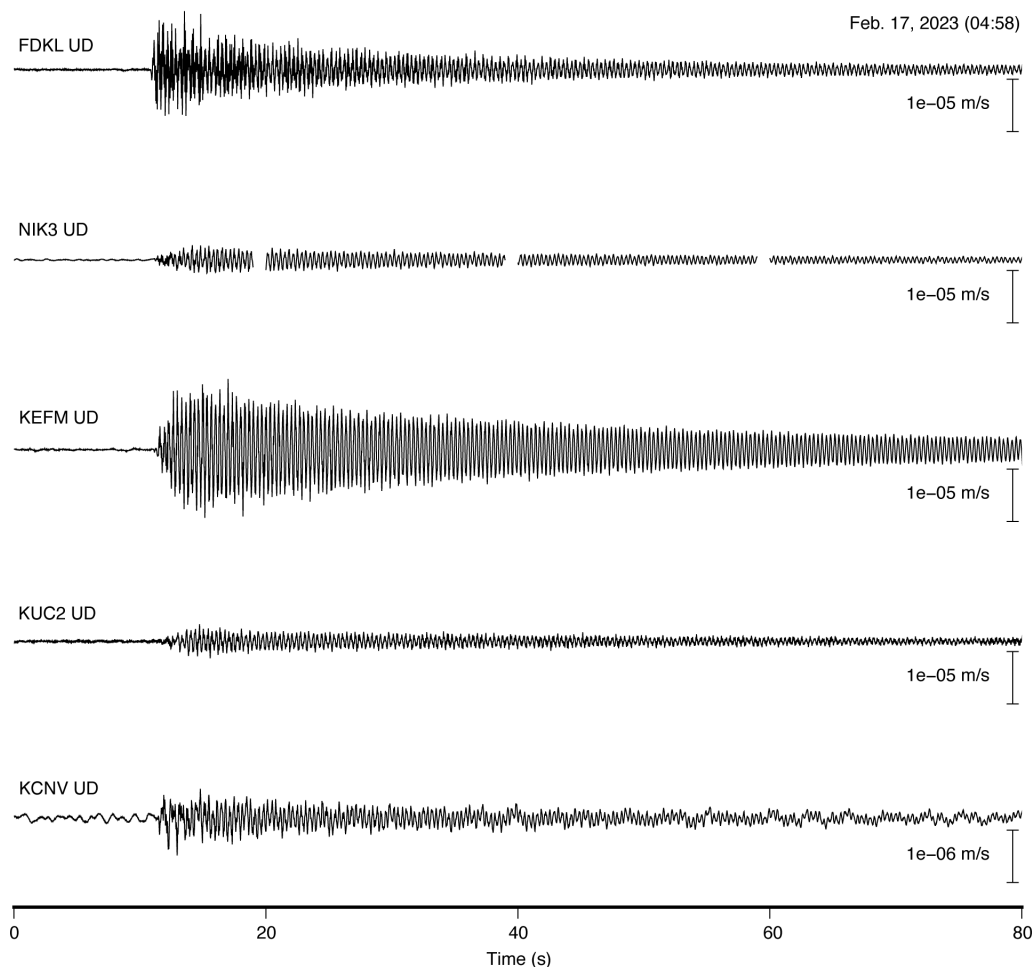


Fig. 3 Raw vertical ground velocities of MNC on Feb. 17, 2023 (04:58) at FDKL, NIK3, KEFM, KUC2, and KCNV.

細を検討する目的から、気象庁火山観測網と防災科学技術研究所の基盤的火山観測網（V-net）の地震記録もそれぞれ参照する．KEHT（100m深）とKCNV（200m深）にはボアホール式短周期地震計が、KCNVの地表面には広帯域地震計（Trillium 240）がそれぞれ設置されている．それ以外の観測点のセンサーはいずれも地表設置式の短周期地震計である．

3. 地震波形の特徴

3.1 モノクロ地震

口永良部島での対象期間のモノクロ地震の典型的な例として、FDKLにおける上下動波形記録とフーリエスペクトルの例をFig. 2に示す．Fig. 2aに示したイベントは2.5 Hzに鋭いピークを有し（ f_0 ），振幅が単

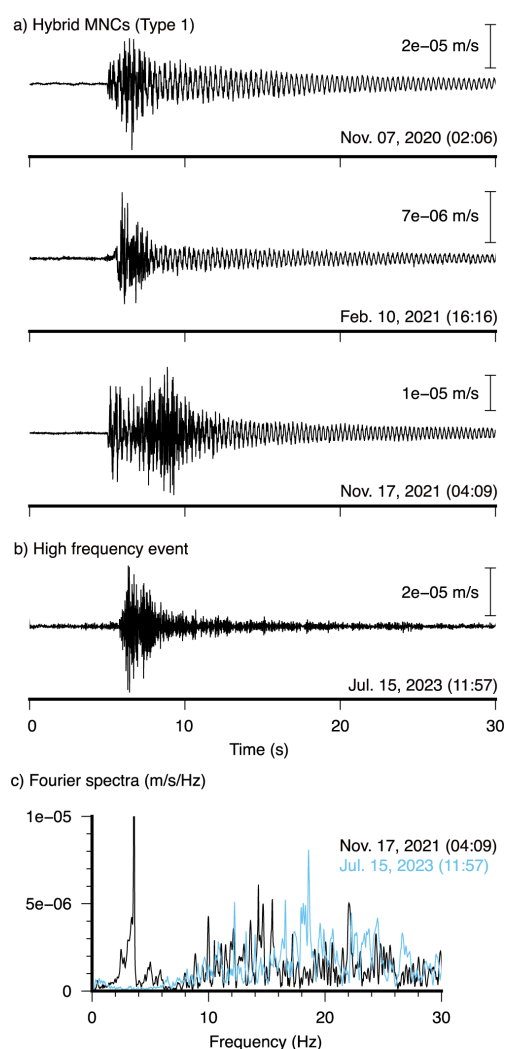


Fig. 4 (a) Examples of the vertical raw ground velocity records of the Hybrid MNCs (Type 1) at FDKL, (b) an example of a high frequency event at FDKL, and (c) Fourier spectra of Hybrid (Type 1) MNC and high frequency events.

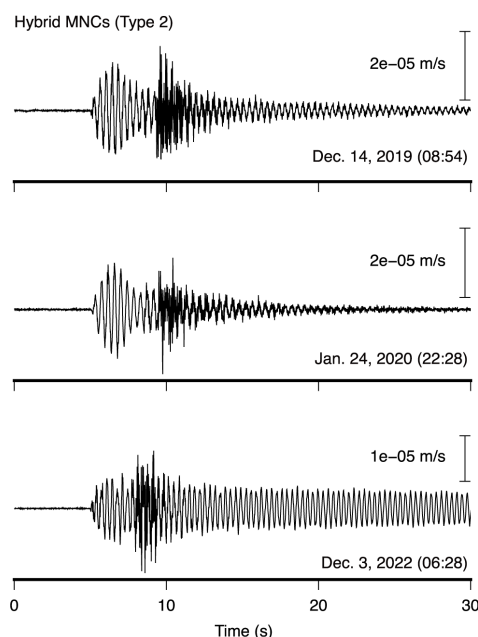


Fig. 5 Examples of the vertical raw ground velocity records of the Hybrid MNCs (Type 2) at FDKL.

調に減衰する特徴を有する．一方でFig. 2bに示すイベントのように、 f_0 がより高周波側（このイベントでは10.5 Hz）に存在するイベントもある．Fig. 2cからは、 f_0 より高周波側にもいくつかのピークが読み取れるが、本稿では f_0 のみに着目する．こうした波形的性質と周波数構造の特徴は、2014年噴火以前の観測網で捉えられてきたモノクロ地震の特徴と合致する（井口ら、2001）．Fig. 3は本稿で主に扱う地震観測点毎に同じモノクロ地震のイベントの波形を並べたものである．FDKLで捉えられている波形的特徴は他の観測点でも概ね確認することができ、またいずれの観測点でも f_0 として3.0 Hzの信号が卓越する．

3.2 ハイブリッド型モノクロ地震

Fig. 4aにハイブリッド地震の特徴を有するモノクロ地震と観測波形例を示す．振幅の減衰振動という特徴はFig. 2に示したイベントと共通だが、その初期部分により高周波の信号が重畳している．Fig. 3bには高周波地震の波形の一例も併せて示す．周波数領域における特徴を検討すると、ハイブリッド地震のスペクトルは f_0 の他にも7 Hz以上の高周波の帯域に幅広いピークを有する（Fig. 3c）．この高周波側の特徴はFig. 3bに示した高周波地震の周波数構造と合致する．モノクロ地震に高周波成分が重畳する特徴も新岳2014年噴火以前の活動期において見出されている．観測波形の特徴の時系列からは、高周波成分を励起する剪断破壊が減衰振動のトリガーに関連していることが示唆される（井口ら、2001）．以下では、

こうした初期位相に高周波成分が重畳するハイブリッド型のモノクロ地震をType 1とする。また対比のため、高周波成分の重畳がないモノクロ地震については英語表記 (Monochromatic events) の頭文字からMNCsとする。

Fig. 5に示す数例も同じくハイブリッド型のモノクロ地震であるが、これらイベントの場合は減衰振動と同じ周期の信号の振動がまず出現し、次いで振幅の減衰振動途上に高周波の信号が重畳する。こうしたハイブリッド型のモノクロ地震を本稿ではType 2とする。Type 1と合わせて、減衰振動成分と高周波成分の発生領域の違いについては検討すべきであるが、高周波成分はFDKLやNIK3以外の観測点の波形

記録だとほとんど視認できない場合が多い。またFig. 5の上段と中段のイベントにおける初動から5秒程度の紡錘状の振動波形は、先行研究によって低周波地震として認識されてきたイベントの特徴とも類似する (井口ら, 2001; Triastuty et al., 2009)。紡錘状振動の後に単調な振動位相が後続することから、本稿ではこうしたイベントもまとめてモノクロ地震として扱うこととする。

4. 2019年9月以降の時系列

4.1 モノクロ地震の活動推移

Fig. 6a, bに、対象期間に口永良部島で発生した火山性地震の日別回数とその積算値の時系列を示す。地震回数には、FDKLでの上下動片振幅の最大値が5 $\mu\text{m/s}$ 以上の全てのイベントが含まれる (A型地震はS-P時間が3秒以内)。2023年8月18日までの積算回数は2825回であるが、そのうちモノクロ地震は140回のみであり、大半のイベントが高周波地震である。2014年噴火以前の地震観測網による地震回数検出によると、1991年から1997年7月以前の期間の平均発生回数は0.64回/日であるが、1997年7月以降の期間では平均2.86回/日に増加している (井口, 2021)。この指標を用いて対象期間の地震活動度を検討するため、Fig. 6bには概ね年毎の平均日地震回数を示している。2019年 (9月1日以降) は0.46回/日であり、1997年活発化以前の水準に近い。2020年には噴火活動期間と8月以降に地震回数の増加が見られる。年間平均発生頻度は3.47回/日であり、1997年活発化以降の発生頻度と同程度である。続く2021年から2023年6月以前の期間では地震活動度は漸減しており、2023年の1月から6月以前の期間では0.30回/日にまで低下する。しかし、2023年6月以降に再び地震活動の活発化が見られる。Fig. 6(c)には、FDKLの上下動速度記録を用いたモノクロ地震 (ハイブリッド型も含む) の地震エネルギー (E_{mnc}) の時系列を、Fig. 6(d)には E_{mnc} の積算をそれぞれ示す。これら図表からは、モノクロ地震の活発な期間が二つ認められる。最初の活動期は2020年1月から2020年5月末までの期間 (2020年活動期) であり、平均的な発生頻度は 3.9×10^3 J/日である。この期間は概ね2020年の噴火活動期に相当し、特に2月3日の噴火では噴煙高度が火口上6100 mに到達している (京都大学防災研究所, 2020)。また3月27日には島内西側の番屋ヶ峰の直下においてマグニチュード2前後のA型地震が発生している。もう一つの顕著な活動期間は2022年9月から2023年1月までの期間 (2022年活動期) であり、平均発生頻度は 6.3×10^3 J/日である。それ以外の期間は概ね 10^2 J/日のオーダー

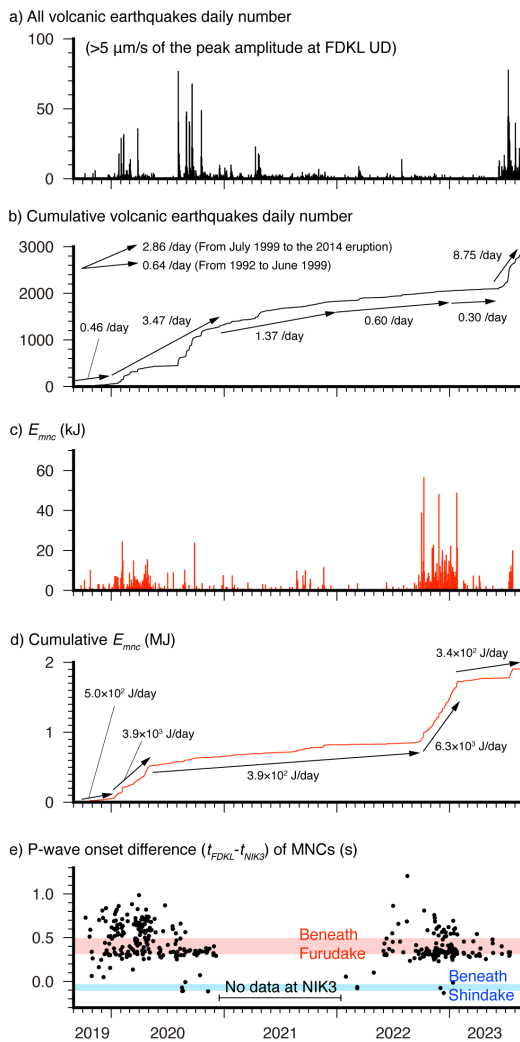


Fig. 6 Time series of (a) daily number of all volcanic earthquakes, (b) seismic energy of each MNCs (E_{mnc}), (c) cumulative daily volcanic earthquake number and E_{mnc} , and (d) P-wave onset difference between FDKL and NIK3 ($t_{FDKL} - t_{NIK3}$) from September 2019.

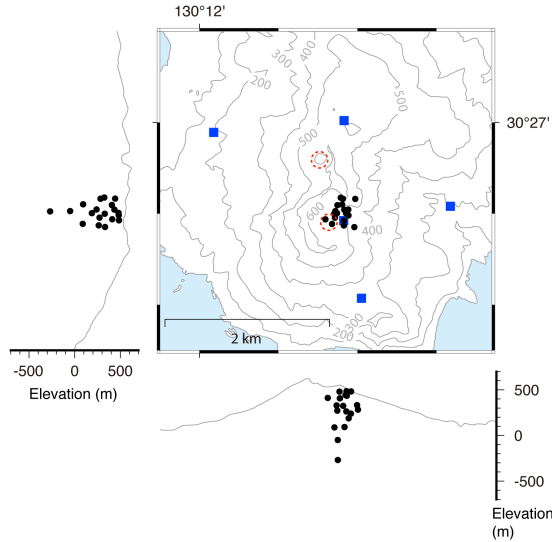


Fig. 7 Hypocenter locations of MNCs occurred after March 2022 (KUC2 operational period). Blue squares are seismic stations adopted for P-wave onset picking. Red broken lines are Shindake and Furudake craters.

での発生頻度で推移している。2020年8月から10月にかけての高周波地震の発生数増加に対しては、モノクロ地震の活動には対応する変化は見られない。それぞれの活動期の詳細は後の章で検討する。

次に、モノクロ地震の発生領域について検討する。新岳西側山麓のKUC2での観測が始まった2022年3月10日以降に発生したモノクロ地震のうち、山頂域を囲む地震観測点 (FDKL, NIK3, KUC2, KEFM, KCNV) の全てで明瞭なP波初動が識別できるイベントの震源分布をFig. 7に示す。震源決定には、先行研究を参考にP波速度2.1 km/s (井口ら, 2007) の均質な地震波速度構造を仮定している。初動が読み取れるイベントでは、全てにおいて古岳の山頂直下の深さ0-1kmに震源が推定されている。しかし山麓の観測点では初動が不明瞭な場合が多く、震源決定が可能なイベントの数は多くはない。対象期間全体のモノクロ地震の発生領域を検討するため、P波初動の特定が比較的容易な山頂域のFDKLとNIK3の2点における初動到達時間差 ($t_{FDKL}-t_{NIK3}$) に着目する。山頂域の南北方向に分布するこの2点の記録を用いれば、モノクロ地震の発生領域について、少なくとも新岳と古岳のどちらの山体内で発生するかを判断することができると期待される。Fig. 6eに該当期間の $t_{FDKL}-t_{NIK3}$ の時系列を示す。2020年12月7日から2022年1月23日までの期間はNIK3の地震記録は欠測となっている。2.1 km/sのP波速度を仮定した場合に、新岳火口と古岳火口の直下の深さ0-1 kmに震源が存在した場合に期待される $t_{FDKL}-t_{NIK3}$ の分布をそれぞれ青色と赤色で示す。初

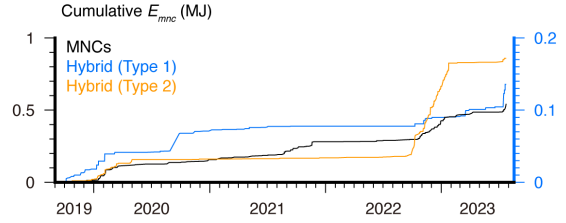


Fig. 8 Time series of cumulative E_{mnc} of MNCs (black), blue (Hybrid Type 1), and orange (Hybrid Type 2). Since the E_{mnc} of Hybrid Type 1 is considerably smaller than the other two types, another vertical scale is set for Hybrid Type 1 (right side with blue color).

動読み取り誤差等に起因すると思われるばらつきはあるものの、期間全体を通して $t_{FDKL}-t_{NIK3}$ が0.4-0.9 秒程度のイベントがほとんどである。つまり、対象期間においてはモノクロ地震の主要な発生領域は一貫して古岳の火口直下周辺であったことが示唆される。

4.2 タイプ別のモノクロ地震発生状況

Fig. 8には、高周波成分の重量を伴わないモノクロ地震 (MNCs) とハイブリッド型 (Type1, 2) の3種類毎の積算 E_{mnc} の時系列を示す。ハイブリッド型Type 1の発生頻度は比較的低いため、他の2種類に対して縦軸を5倍に拡張したスケール (Fig. 8右側青字) で示す。対象期間のモノクロ地震の主要な活動期のうち、2020年活動期の地震エネルギーの増加にはMNCsとType 2のイベントの寄与が同程度であることが読み取れる。一方で、2022年活動期の地震エネルギーはType 2の寄与が著しく大きい。

モノクロ地震のタイプ毎の f_0 の時系列をFig. 9に示す。井口ら (2001) は、新岳直下で発生するモノクロ

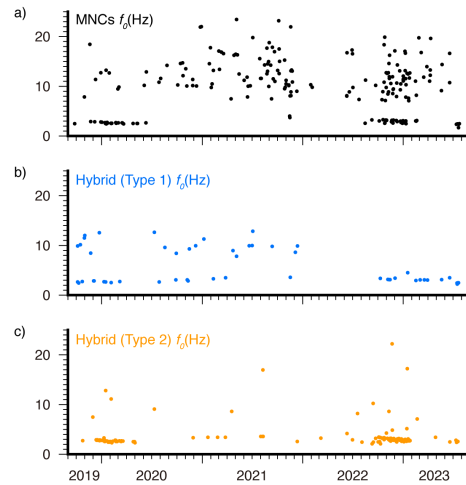


Fig. 9 Time series of f_0 of (a) MNCs, (b) Hybrid MNCs (Type 1), and (c) Hybrid MNCs (Type 2).

地震の f_0 について、概ね5 Hzを境に二つのグループに分類できることを指摘している。本稿が検討したモノクロ地震も6 Hzを境に二つのグループに分類できる。低周波イベント ($f_0 < 6$ Hz) はタイプに関わらず発生していることが読み取れるが、特に2020年活動期と2023年活動期やその前後の期間を中心に発生している。高周波イベント ($f_0 > 6$ Hz) の f_0 は7-22 Hz程度に分布するが、 f_0 が12 Hz以上のイベントは2020年活動期以後のMNCsで特に多く見られる。

4.3 2020年活動期

2019年9月から2020年8月までの積算地震、積算 E_{mnc} 、SO₂放出量、FDKLの上下動成分の1分間平均振幅をFig. 10に示す。また赤色の期間は新岳火口の2020年噴火期間に相当する。2020年1月からは、観測されるSO₂放出量の最大値が1000トン/日以上に増加し、オレンジで示した噴火活動期間に入ってから最大で2000トン/日程度で3月下旬まで推移する。モノクロ地震は2019年9月末から徐々に発生しているが、この時期はタイプによって発生頻度に顕著な違いはない。2020年1月9日からは、MNCsとType 2の活

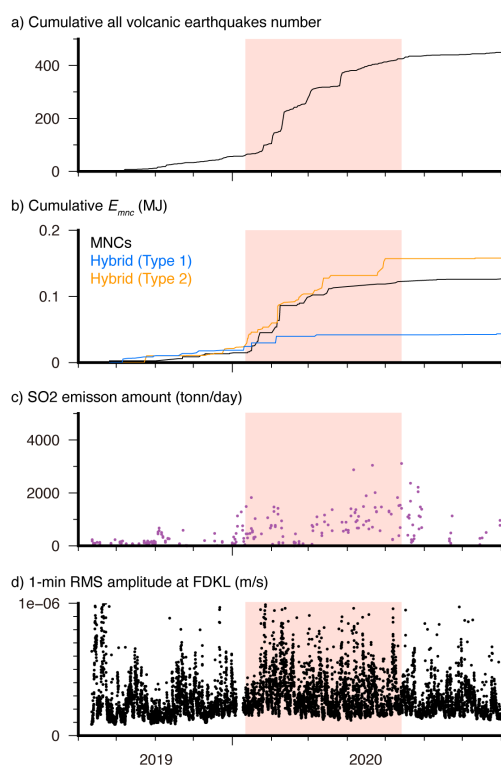


Fig. 10 Time series of (a) cumulative daily number of all volcanic earthquakes, (b) cumulative E_{mnc} , (c) daily SO₂ discharge amount, and (d) 1-min RMS amplitude at FDKL in the period September 2019 to August 2020. The orange time window corresponds to the eruptive period of the Shindake crater.

動度が高まり、Type 1の寄与は相対的に低下する。高周波地震を中心とする地震活動が高まるのは2020年2月2日頃からであり、モノクロ地震の活動活発化の方がやや先行していると言える。2020年4月以降はSO₂放出量が3000トン/日近くに達する日もあるが、高周波地震もモノクロ地震も活動度は漸減している。Fig. 10dに示した地震動平均振幅分布の下限は、地震記録の背景微動振幅を反映している。噴火活動期間に関連するような顕著な背景微動振幅の変化はないことがわかる。

4.4 2022年活動期と2023年古岳活発化

Fig. 11には、2022年8月1日を起点とする火山性地震積算回数、タイプ毎の E_{mnc} の積算、FDKLの上下動成分の1分間平均振幅をそれぞれ示す。この期間で顕著なのは、2022年9月末以降のモノクロ地震の活動であり、Type 2の寄与が特に著しい。2023年1月末ごろにモノクロ地震の活動は低下し、その後は発生頻度が低い状態で推移する。

2023年6月からは、高周波地震の回数が徐々に増加し、7月10日には日回数が78回に達する (Fig. 6a)。同時に平均振幅分布の下限からは、2023年6月末頃からの背景微動振幅の増加が読み取れる。この時期の高周波地震の活動は、古岳の火口直下に震源が推定されているイベントがほとんどである (福岡管区気象台, 2023)。高周波地震の活動の増加率は7月上旬頃がピークであるが、一方で背景微動振幅は8月1頃

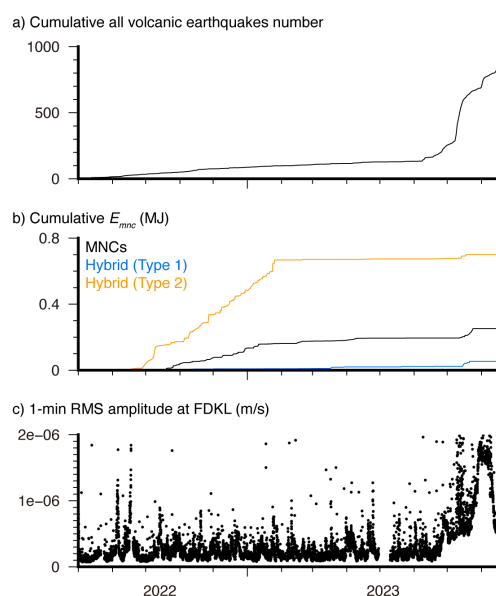


Fig. 11 Time series of (a) cumulative daily number of all volcanic earthquakes, (b) cumulative E_{mnc} , and (c) 1-min RMS amplitude at FDKL in the period September 2022 to August 2023.

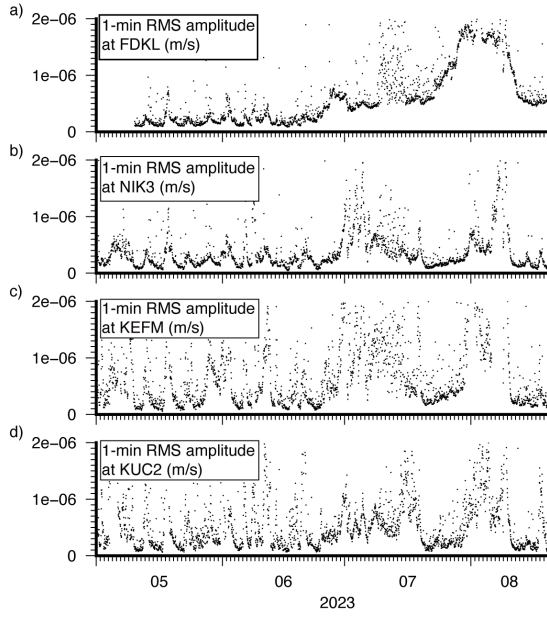


Fig. 12 1-min RMS amplitudes at (a) FDKL, (b) NIK3, (c) KEFM, and (d) KUC2 from May to August in 2023.

に $2\text{ }\mu\text{m/s}$ 程度のピークに達する．Fig. 12には、2023年5月以降の山頂付近の地震観測点の平均振幅の時系列を示す．2023年6月以前は大気場によると思われる擾乱が各観測点の振幅値から読み取れるが、2023年7月以降はFDKLの平均振幅だけは $0.5\text{ }\mu\text{m/s}$ 以上を維持し続けており、微動源が古岳の周辺に存在していることが示唆される．また8月15日には気象庁の空中観察により、古岳火口内へのエメラルドグリーン色の湖水ないし付着物の蓄積が確認された（福岡管区気象台, 2023）．

5. 波形的特徴の検討

5.1 減数振動の評価

E_{mnc} によって特徴づけられるモノクロ地震の活動期では、いずれもハイブリッド型のType 2の寄与が大きいことがわかった．一方で、通常のモノクロ地震に対して高周波の成分が重畳するという性質を考えると、減衰振動の性質が同じであってもハイブリッド型の方が E_{mnc} がより大きくなることが想定される．特定周期の信号の減衰振動というモノクロ地震の根幹的な特徴をより直接的に評価するため、減衰振動のQuality factor Q を検討する．本稿ではTaguchi et al., (2021)の手法に従い、 f_0 の周波数成分の減衰振動を Q によって評価する．Fig. 13には、タイプ毎に推定した Q の時系列を示す．どの時期でも推定値の分布には一桁以上のばらつきが見られる．MNCsの Q の上

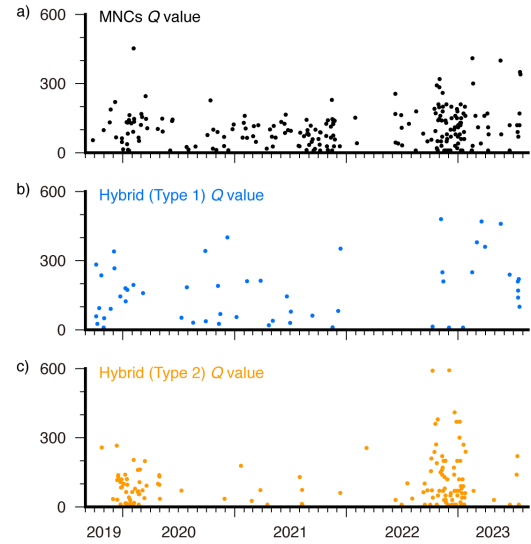


Fig. 13 Time series of quality factor Q of (a) MNCs, (b) Hybrid MNCs (Type 1), and (c) Hybrid MNCs (Type 2).

限分布に着目すると、2020年後半以降は2023年初頭に向けて徐々に増加していることが読み取れる．この傾向は2020年以降に漸減傾向にあった高周波地震の特徴とは対照的である（Fig. 6b）．また2022年活動期におけるMNCsの Q が300を超えるイベントは1例だけであるが、Type 2で Q が300以上のイベントは7例あり、中でも2022年12月3日のイベントでは本稿が対象としたイベントの中では最大となる593という Q が推定されている．つまり、 Q の上限という観点からも2022年活動期のType 2の活動は著しいと言える．Type 1については発生頻度が少ないものの、期間全体を通してその上限値は常に高いと言える．Fig. 14には全てのイベントの f_0 と Q の関係を示す． f_0 が低下するほど Q の上限値が大きくなる特徴が読み取れる．

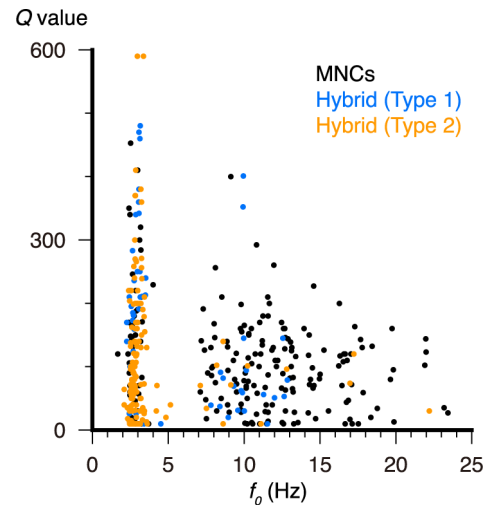


Fig. 14 Relation of f_0 and Q values of MNCs.

言い換えると、モノクロ地震の f_0 から発生しうる Q の上限を評価することができると言えるかもしれない。

5.2 減衰振動と高周波成分の関係

対象期間のハイブリッド型のモノクロ地震は、減衰振動の途中で高周波成分が重畳するType 2が多くを占める。信号の時系列からは、減衰振動の開始によって近傍の微小な剪断破壊が誘発されているという描像が推定される。この仮説が正しいとすれば、減衰振動と高周波成分の規模の間になんらかの関係が存在するはずであり、以下その対応関係を検証する。高周波成分の規模については発震機構を剪断破壊であると仮定し、オメガ二乗モデル (Brune, 1970) によって推定されるコーナー周波数 f_c を指標とする。推定にはFDKLの上下動速度波形を一回積分した変位波形を用いる。減衰振動の規模としては、振動のトリガーとなる初期部分が剪断破壊の規模と関連す

る可能性を想定して、観測波形における f_0 の最大振幅（減衰振動開始時の初期振幅）を用いて検討する。Fig. 15aには f_c が推定できたイベントにおける f_c と最大振幅の関係を示す。推定された f_c は9-22 Hz程度に分布するが、これはTriastuty et al. (2009)が新岳直下で発生する高周波地震に対して推定した値と同程度である。Fig. 15aの両者の間には明瞭な関係は認められない。次に、減衰振動の Q と f_c の関係を検討する (Fig. 15b)。注目すべき点として、 Q が大きなイベントは f_c が比較的小さいという特徴を挙げることができる。 Q 自体は減衰振動の長さを主に規定する変数であり、必ずしも振動開始時の擾乱規模を一意に反映しないようにも思われる。しかしFig. 15bの関係からは、 Q の大きなイベントは震源近傍において生じる応力変化が大きく、誘発される剪断破壊も比較的規模が大きくなるという解釈が可能かもしれない。

6. 議論

本稿で扱った2019年以降のモノクロ地震は、減衰振動の特徴や f_0 の分布については2014年噴火前に新岳火口直下で発生していたモノクロ地震と類似性を有する。また2020年活動期の高周波地震活発化に対しての先行、2022年活動期の古岳活動活発化に対しての先行という性質も、特徴的な火山活動に対して先行ないし初期段階で発生するという点も類似する。しかし、発生領域が新岳火口直下ではなく一貫して古岳火口直下であるという点が大きく異なる。

2020年活動期は新岳の噴火期間に相当することから、新岳の噴火活動と同期して古岳山頂直下に対してもなんらかの流体の供給があったことを示唆する。ただし、その流体の供給源についてはモノクロ地震のみでは判断がつかない。新岳直下から側方への貫入、ないしはさらに深部からの供給という二通りの考えが可能である。噴火期間は新岳火口における火山ガス放出が卓越しており、古岳山頂域での顕著な表面現象の発生は報告されていない。よって、2020年活動期に古岳に供給された火山性流体は地表面には到達していないとも考えられる。このことについて、1)気相を主体とする流体が供給されたが地下水に吸収されて地表面まで到達しなかった、2)液相を主体とする流体が供給された、というような二つの考え方が可能かもしれない。また、2014年噴火の先行過程で古岳直下で顕著な地震活動が発生していなかったことを加味すると、同じ新岳火口での噴火活動であっても、2020年噴火期についてはマグマ貫入の性質に変化が生じているのかもしれない。この議論を深めるには、検討の対象を2015年や2018-2019年噴火活動に対しても拡張する必要がある。

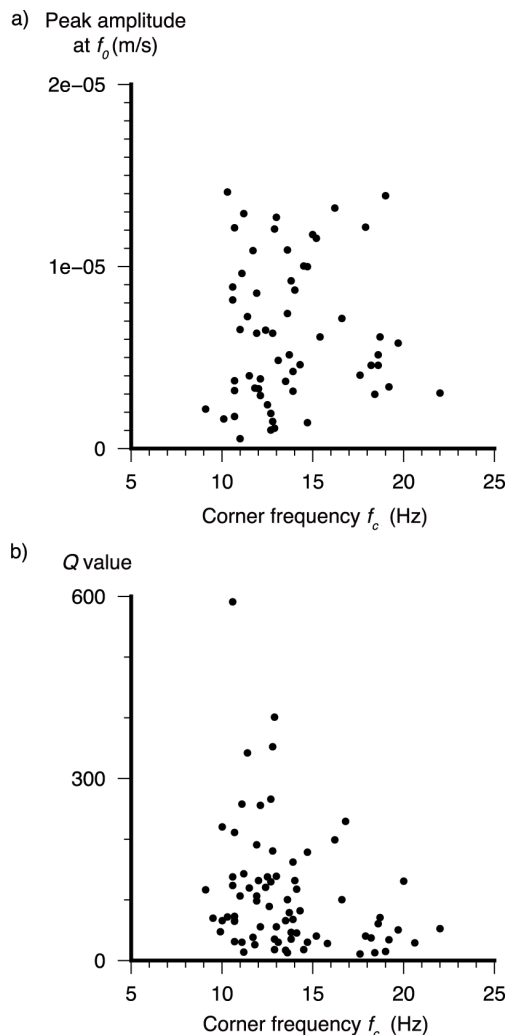


Fig. 15 a) Corner frequency f_c and peak amplitude of oscillations with f_0 at FDKL. b) Corner frequency and Q value of hybrid MNCs.

Q の上限, E_{mnc} という両者の観点からは, 2022年活動期は新岳噴火に同期する2020年活動期よりもさらに活発であったと判断される. ハイブリッド型のType 2の活動が卓越するということは, 流体供給が活発であったために発生領域周辺に及ぼす応力変化も大きかったと解釈できる. 2020年活動期と同様に, モノクロ地震の活発期に同期するような古岳火口での表面現象の顕在化は報告されておらず, また高周波地震の活動にも対応する変化はない. 二つの活動期でモノクロ地震の発生領域に大きな違いが見られないことから, 2022年活動期においても流体供給経路は2020年活動期と同じであったと考えられる. 2022年活動期との2023年7月以降の古岳の活動活発化については, 一意な因果関係は得られていない. しかし, 古岳火口直下で発生する地震活動の増加という観点からは, モノクロ地震の活動をトリガーした流体によって, その後の古岳の活発化が駆動されているとの解釈は可能であると思われる. 2022年活動期の特徴の一つは Q の増大であるが, 2022年活動期終了後も Q の上限値は400以上であり依然として高い水準で推移したことがFig. 13aから読み取れる. Fig. 13に示した最大値(593)も含めて, 2022年活動期とそれ以降の Q の上限値は他の火山における推定例と比べてもかなり高い部類にあると言える. モノクロ地震のような火山性地震の減衰振動に対してしばしば適用されるクラックモデル(例えば, Kumagai and Chouet, 2000)では, クラック壁に対してクラック内流体の弾性波速度が小さいほど Q が大きくなることが予測されている. 口永良部島で発生するモノクロ地震へのクラックモデル適用の妥当性については別途検討の余地があるが, 2022年活動期とそれ以降の Q の最大値が高い水準で推移していることは, 古岳に供給されている流体の性質の変化を示唆するものである. 2023年8月に初めて確認された古岳火口内のエメラルドグリーン色の変色は, 強酸性の火口湖である草津白根山の湯釜や阿蘇第一火口内の湯だまりとの類似性を伺わせる. ただしモノクロ地震の活動が古岳山体への流体の供給やその変化を反映しているとしても, 2022年活動期から表面現象の顕在化までに約半年程度の時間差があった点については今後さらに検討の余地がある. また Q の上限値やFig. 13の f_0 - Q 関係に対し, 火山活動との関連に基づいた定量的な解釈を与えるには至らないため, 他の火山の事例も含めたさらなる検討が求められる. また先に指摘した地下水による火山ガス成分の吸収の有無など, 地震観測から推定される火山性流体の供給や変化の妥当性は, 噴気ガスの調査や水文観測によって直接的に検証していく必要がある.

7. まとめ

2019年9月以降の口永良部島の火山活動について, 減衰振動が特徴的な火山性地震であるモノクロ地震に着目し, その性質と時間変化を検討した. 該当期間では大きく分けて2020年の初頭と2022年の後半にモノクロ地震の顕著な活動期が認められる. いずれもその発生領域は古岳火口直下の深さ0-1 kmに推定されており, 記録が残る直近に噴火活動が繰り返されている新岳の火口直下ではない. 2020年活動期は新岳の噴火活動期に相当し, 新岳の噴火に同期して古岳の山頂火口周辺にもなんらかの流体供給があったことが示唆される. 2022年活動期は2020年よりもさらに活発であり, 流体貫入によって周辺において微小剪断破壊を誘発していると思われるハイブリッド型のモノクロ地震が多数を占める. 減衰振動の程度を表す Q の上限値は2022年活動期において上昇しており, また Q が大きなハイブリッド地震は引き起こされる剪断破壊が大きい傾向にある. 2022年活動期後も Q の上限は高い水準で推移した. 2023年7月以降には山頂域での地震活動の活発化, 微動振幅の増加, 火口内の変色という古岳火口の活発化が発生した. モノクロ地震の活動とその性質は, 古岳の活動を駆動する流体供給の規模と特性を反映している可能性がある.

謝 辞

火山活動研究センター教職員の口永良部島火山観測網の維持管理へのご尽力に感謝致します.

気象庁火山観測網と, 基盤的火山観測網(<https://doi.org/10.17598/NIED.0006>)の観測記録を使用させて頂きました.

参考文献

- 井口正人(2021): 2015年口永良部島噴火の火山活動推移と避難の意思決定, 地学雑誌, Vol. 130, pp. 755-770.
- 井口正人・斎藤英二・為栗健・Hetty Triastuty・山崎友也(2007): 2006年口永良部島火山活動の評価, 京都大学防災研究所年報, 第50号B, pp.349-357
- 井口正人・山本圭吾・高山鉄朗・前川徳光・西村太志・橋野弘憲・八木原寛・平野舟一郎(2001): 口永良部島火山における火山性地震観測—2000年集中総合観測—, 京都大学防災研究所年報, 第44号B, pp.53-58.
- 井口正人・山本圭吾・味喜大介・高山鉄朗・寺石眞弘・園田保美・鬼澤真也・八木原 寛・平野舟一郎

- (2002) : 口永良部島火山における最近の地盤変動—1995年～2001年—, 京都大学防災研究所年報, 第45号B, pp.601-608.
- 気象庁 (2020) : 第146回火山噴火予知連絡会資料 口永良部島.
- 京都大学防災研究所 (2018) : 第142回火山噴火予知連絡会資料 口永良部島.
- 京都大学防災研究所 (2019) : 第143回火山噴火予知連絡会資料 口永良部島.
- 京都大学防災研究所 (2020) : 第146回火山噴火予知連絡会資料 口永良部島.
- 下司信夫・小林哲夫 (2006) : 鹿児島県口永良部島火山最近約3万年間の噴火活動, 火山, 51, 1-20.
- 浜田信生・神宮博・生本光二 (1976) : 減衰の遅い終期微動を伴う火山性地震について, 火山, 第21巻, pp. 167-183.
- 平林順一・野上健治・大島弘光・井口正人 (2007) : 火山ガス観測からみた口永良部島の活動状況, 京都大学防災研究所年報, 第50号B, pp. 359-364.
- 平林順一・野上健治・鈴木隆・水橋正英 (2002) : 口永良部島の火山ガスと温泉, 薩摩硫黄島火山・口永良部島火山の集中総合観測, pp. 143-152.
- 福岡管区气象台 (2023) : 口永良部島の火山活動解説資料 (令和5年8月18日16時00分発表) .
- 北海道大学理学部附属有珠火山観測所 (1989) : 北海道の火山活動とその観測報告, 火山噴火予知連絡会会報第45号, pp. 1-45.
- 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.
- Aoyama, H., and Takeo, M. (2001): Wave properties and focal mechanisms of N-type earthquakes at Asama volcano, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 105(1-2), pp. 163-182.
- Brune, J. N. (1970): Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75(26), pp. 4997-5009.
- Gómez M., D. M., and Torres C., R. A. (1997): Unusual low-frequency volcanic seismic events with slowly decaying coda waves observed at Galeras and other volcanoes, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77(1-4), 173-193.
- Hagerty, M., and Benites, R. (2003): Tornillos beneath Tongariro Volcano, New Zealand, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 125(1-2), 151-169.
- Harrington, R. M., and Brodsky, E. E. (2007): Volcanic hybrid earthquakes that are brittle-failure events. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34(6), L06308.
- Hotta, K., and Iguchi, M. (2017): Ground deformation source model at Kuchinoerabu-jima volcano during 2006–2014 as revealed by campaign GPS observation, *Earth, Planets and Space*, 69:173.
- Kanda, W., Utsugi, M., Tanaka, Y., Hashimoto, T., Fujii, I., Hasenaka, T., and Shigeno, N. (2010): A heating process of Kuchi-erabu-jima volcano, Japan, as inferred from geomagnetic field variations and electrical structure, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 189(1-2), pp 158-171.
- Kumagai, H., and Chouet, B. A. (2000): Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 105(B11), 25493-25512.
- Kumagai, H., Chouet, B. A., and Nakano, M. (2002): Temporal evolution of a hydrothermal system in Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, inferred from the complex frequencies of long-period events, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 107(B10), ESE 9-1-ESE 9-10.
- Milluzzo, V., Cannata, A., Alparone, S., Gambino, S., Hellweg, M., Montalto, P., et al. (2010): Tornillos at Vulcano: Clues to the dynamics of the hydrothermal system, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 198(3-4), 377-393.
- Minami, Y., Matsumoto, K., Geshi, N., and Shinohara, H. (2022): Influence of hydrothermal recharge on the evolution of eruption styles and hazards during the 2018–2019 activity at Kuchinoerabujima Volcano, Japan. *Earth, Planets and Space*, 74:21.
- Taguchi, K., Kumagai, H., Maeda, Y., and Torres, R. (2021): Empirical formula for the quality factors of crack resonances and its application to the estimation of source properties of long-period seismic events at active volcanoes, *Geophysical Journal International*, Vol. 224(3), 2131–2148.
- Triastuty, H., Iguchi, M., and Tameguri, T. (2009): Temporal change of characteristics of shallow volcano-tectonic earthquakes associated with increase in volcanic activity at Kuchinoerabujima volcano, Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 187(1-2), 1–12.

(論文受理日 : 2023年8月31日)