

約 30 年間の観測成果に基づく有珠山における地震活動の検討

— 噴火警戒レベル判定基準の改定に向けて —

Examination of Seismic Activity on Usu Volcano Based on Three Decades of Observation:
Toward Revision of Volcanic Alert Level Decision Criteria

不破智志¹, 宮村淳一²

Satoshi FUWA¹ and Jun'ichi MIYAMURA²

(Received December 5, 2023: Accepted June 13, 2024)

ABSTRACT: Usu volcano, one of the most active volcanoes in Hokkaido, Japan, has repeatedly erupted at intervals of decades since the 1663 eruption. Its activity has been considered to be characterized by the occurrence of numerous felt earthquakes and remarkable crustal deformation immediately prior to eruption, and by non-eruptive periods lasting for some decades without any volcanic unrest. Nevertheless, in March 2021, the volcanic unrest accompanied by an earthquake swarm at a depth of 1.9 – 3.5 km beneath the summit occurred. After the 2000 eruption, two similar earthquake swarms also occurred in 2010 and 2015. In this study, we report comparative analysis of differences between these non-eruptive earthquake swarms and the precursory seismic swarms of the last two eruptions in 1977 and 2000 based on decades of seismic data. The results show that i) earthquake swarms without eruption have repeatedly occurred in the deeper region beneath the summit during non-eruptive periods; ii) the number of earthquakes in the deeper region has increased slightly since two years before the 2000 eruption; iii) seismic wave energy release rates in the precursory earthquake swarm of the 1977 and 2000 eruptions exceeded those of the non-eruptive earthquake swarms in 2010, 2015 and 2021; iv) the minimum magnitude of felt earthquakes at the foot of Usu volcano is M1.3-1.6. We propose a schematic model for the eruptive activity of the 1977 summit eruption, the 2000 flank eruption and the 2021 failed eruption earthquake swarm based on knowledge of the magma plumbing system, and explain the volcanic alert level decision criteria for Usu volcano, which was revised based on the above results.

1 はじめに

有珠山は北海道で最も活動的な火山のひとつであり、1663 年以降は数十年の間隔で周期的にマグマ噴火を繰り返してきた(曾屋・他, 2007)。過去の噴火事例では、噴火直前に有感地震の多発を伴う激しい群発地震活動(eruption precursory earthquake swarm, 以下 PES)と顕著な地殻変動が発生することが知られている(曾屋・他, 2007)。その一方で、噴火直前及び噴火開始から終息までの期間(以下、噴火活動期)に対して、それ以外の期間(以下、非活動期)における火山活動は非常に低調である(青山, 2022)。

ところが、2021 年 3 月 9~10 日に合計の地震回数が

300 回を超える活発な地震活動が発生した(気象庁, 2021)。有珠山ではこれまでに噴火発生が後続しない群発地震活動(failed eruption earthquake swarm, 以下 FES)が発生したという報告はないとされてきた(青山, 2022)。そのため、PES と FES との比較研究はほとんど行われてこなかった。

そこで本論では、気象庁の地震観測データを用いて、過去約 30 年間における FES の発生状況を明らかにするとともに、FES 同士及び PES との差異について比較した。併せて、地震活動に着目した噴火の長期的前兆現象についても検討を行った。

そして、得られた検討結果及び観測事例、先行研究

¹ 札幌管区気象台地震火山課, Seismology and Volcanology Division, Sapporo Regional Headquarters

² 札幌管区気象台地域火山監視・警報センター, Regional Volcanic Observation and Warning Center, Sapporo Regional Headquarters

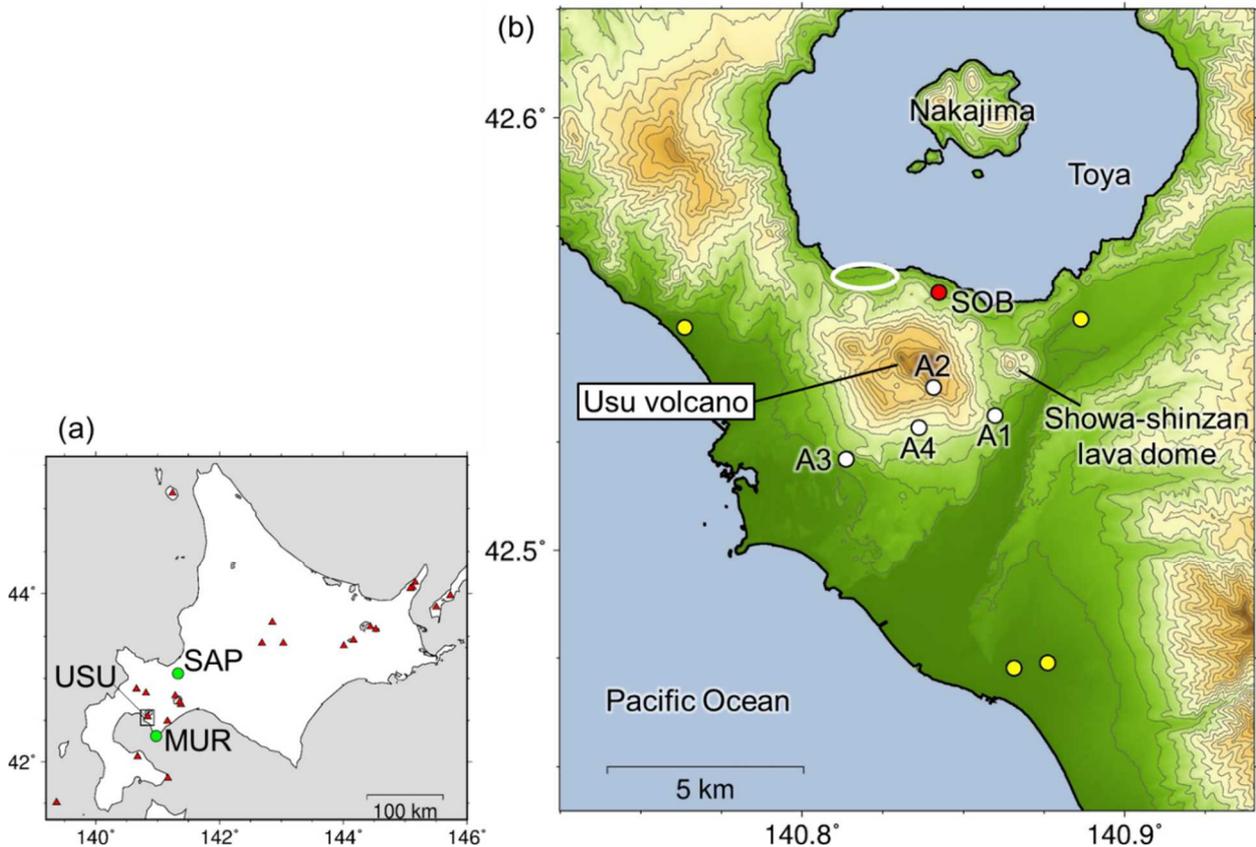


Fig. 1 Seismic stations and observatory locations for Usu volcano. (a) USU, SAP and MUR indicate Usu volcano, Sapporo Regional Headquarters of Japan Meteorological Agency (JMA) and Muroran Local Meteorological Office of JMA, respectively. Red triangles denote active volcanoes in and around Hokkaido. (b) White, yellow and red dots indicate A1 – A4 seismic stations (Table 1), permanent seismic intensity meters and temporary seismic intensity meter (SOB) installed just before the 2000 eruption, respectively. The white circle marks the Lake Toya hot spring town.

の成果をまとめ、有珠山のマグマ供給系と噴火活動期におけるマグマ上昇から噴火発生に至るまでの活動推移のイメージ図（概念モデル）を作成した。その上で、本論による調査結果も含めた地震活動に関する知見に基づいて、噴火警戒レベル判定基準改定（2023年11月公表）にあたり導入された定量的・客観的指標についても記述する。

2 有珠山の火山活動とマグマ供給系

有珠山の過去の地震活動を比較する前に、先行研究に基づく噴火活動の特徴及び主に気象庁によるこれまでの観測体制とその成果について概観する。その上で、有珠山の地下構造に関するイメージ図を用いてマグマ供給系に関する知見を整理する。

2.1 1663年噴火以降の噴火活動の特徴

有珠山の活動は約 18,000-19,000 年前に洞爺カルデラ南壁で始まり、玄武岩質マグマによる噴火の繰り返しのよって現在の山体が形成された (Goto et al., 2019)。約 8,000 年前に発生した山体崩壊以降は、長期間の休止期間を挟んで 1663 年に大規模なプリニー式噴火が発生し、活動を再開した (Nakagawa et al., 2022)。1663 年噴火以降はおよそ 30~50 年の間隔で計 9 回の珪長質マグマによる噴火が発生している (中田, 2016)。噴火位置と噴火様式には対応関係があり、6 回の山頂噴火ではいずれもプリニー式噴火が発生した。一方で、3 回の山麓噴火ではマグマ水蒸気噴火あるいは水蒸気噴火が発生するにとどまり、プリニー式噴火は発生しなかった (曾屋・他, 2007)。1663 年噴火を除いて、8 回の噴火ではそれぞれ溶岩ドームまたは潜在ドームを形成して一連の噴火活動が終息した (Matsumoto and Nakagawa, 2019)。

有珠山の噴火前兆活動の特徴の 1 つに、粘性の高い珪長質マグマの貫入に起因する多数の有感地震を伴う激しい地震活動と地割れを含む著しい地殻変動が発生することが挙げられる。これらの現象は 1943～1945 年噴火を除けば、噴火発生のわずか数日～10 日前に突如として始まっている（例えば、曾屋・他, 2007）。有感地震多発の検知には特に計器による観測を必要としないことから、17 世紀末頃に発生した先明和噴火を除く 1910 年噴火以前の噴火についても、噴火に先立って地震が多発したとの記録が残されている（曾屋・他, 2007）。なお、1977 年噴火及び 2000 年噴火では噴火直前に低周波地震の発生が報告されているが（例えば、Yokoyama, 1985；吉田・他, 2002）、それ以外の噴火の発生直前においても共通に発生していたかどうかは不明である。

2023 年時点で前回の 2000 年噴火から既に 23 年が経過している。近年のマグマ噴火発生間隔の揺らぎを考えれば、次期マグマ噴火の準備が進んでいる可能性がある（青山, 2022）。有史以降の噴火はいずれも珪長質マグマによるものである。SiO₂量ごく僅かずつ減少する傾向にあるものの、今後数十年間にマグマの組成が著しく変化する可能性は小さいと考えられている（曾屋・他, 2007）。したがって、次の噴火も過去の活動様式を踏襲したものになると考えられ、これまでの活動に関する観測結果及び知見の活用が重要である。

2.2 気象庁によるこれまでの観測体制及びその成果

常時観測の変遷及びこれまでに得られた観測成果について以下に簡単にまとめる。

有珠山での地震観測は 1966 年 7 月に開始し、2000

年噴火までは地震計 1 点のみによる観測体制が長く続いた。その期間における地震観測点の変遷について、位置及び諸元を人見・他（2003）から抜粋してそれぞれ Fig. 1(b)及び Table 1 にまとめる。Table 1 中の検測基準は、2000 年噴火を契機に多点観測体制へと移行した現在でもそのまま運用されている。ルーチン処理による震源決定は 2002 年 10 月から行われており、現在は計算プログラム hypomh(Hirata and Matsu'ura, 1987) を使用している。

地殻変動観測については 2000 年噴火以降、傾斜計及び GNSS (Global Navigation Satellite System) による常時観測が行われている。

噴気・噴煙観測については、1966 年 7 月に約 30 km 離れた室蘭地方気象台 (Fig. 1(a)) からの双眼鏡を用いた目視観測を開始した。1996 年 12 月からは洞爺湖東湖畔に新設した監視カメラを併用した観測に移行した。2000 年有珠山噴火以降は、札幌管区気象台 (Fig. 1(a)) による遠隔観測へと切り替えられている。

上記以外では、1956 年 7 月の昭和新山での観測開始以降、現地観測による地中温度、噴気温度及び地表面温度分布の観測も行われている。また、地表面温度分布については航空機を用いた観測も年 1 回程度の頻度で行われている。

以上に示した 1966 年以降の観測項目について、2021 年 5 月までの地殻変動以外の観測結果を時系列グラフで Fig. 2 に示す。本論では噴火活動期を、1977 年噴火は 1977 年 8 月から 1982 年 3 月まで、2000 年噴火は 2000 年 3 月から 2001 年 10 月までの期間とする (Fig. 2(a))。非活動期における地震の月回数は概ね 50 回以下で経過している (Fig. 2(b))。噴気・噴煙及び温度観測結果から、噴火発生後は時間経過と共に熱活動が

Table 1 History of A1 – A4 seismic stations

Seismic station	Operation period	Recording criteria	Reason of relocation of the seismic station
A1	1966/7/1～1976/7/26	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Any of the maximum amplitudes of the 3-components $\geq 0.05\mu\text{m}$ ▪ S-P time ≤ 3.0 s 	To avoid noise of road construction
A2	1976/8/10～1977/8/7		Failure of the station due to the 1977 eruption
A3	1978/1/12～1991/12/3 1991/12/3～1994/7/31		Nearby highway construction
A4	1994/8/1～	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Any of the maximum amplitudes of the 3-components $\geq 0.3\mu\text{m}$ ▪ S-P time ≤ 2.0 s 	-

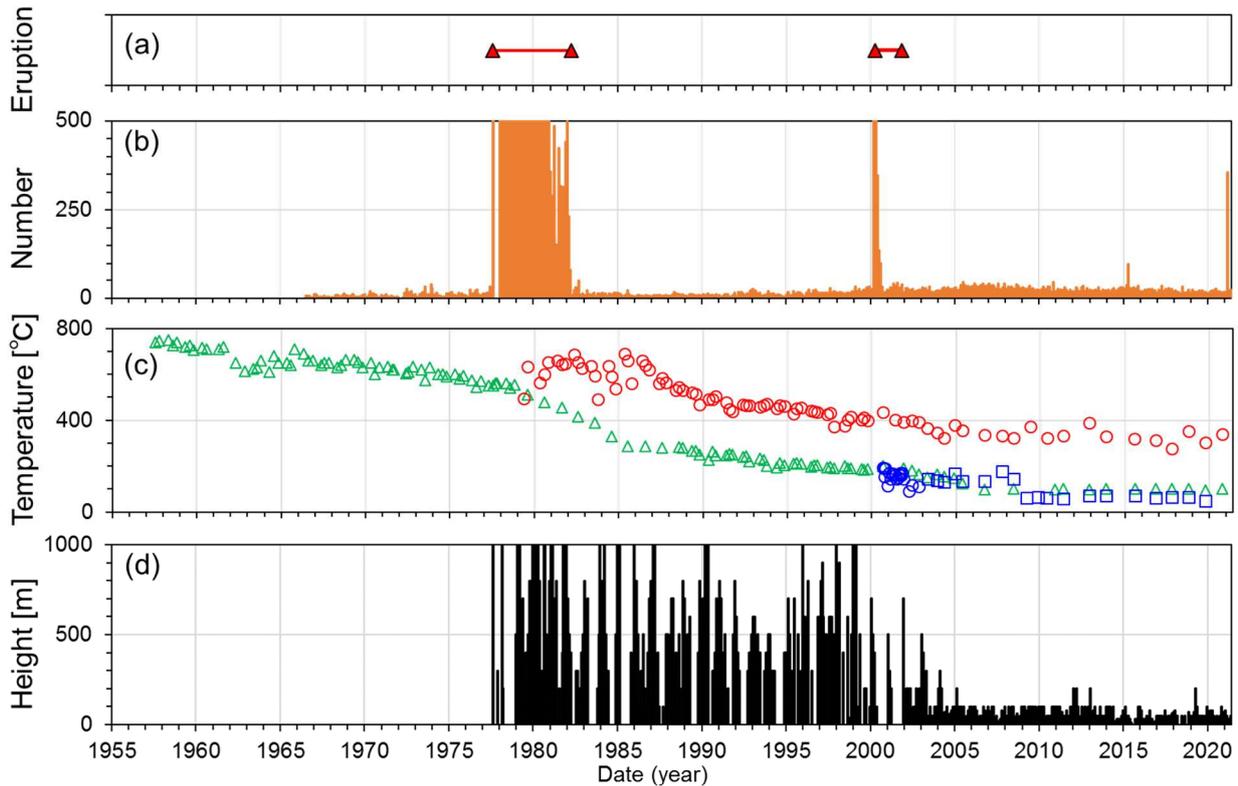


Fig. 2 Volcanic activity of Usu volcano since 1956. (a) 1977 – 1982 and 2000 – 2001 eruptive activity. (b) Monthly number of volcanic earthquakes observed at JMA seismic stations (A1 – A4). (c) Red dots indicate fumarole temperature at the I-crater. Green triangles indicate 50-cm-depth ground temperature at Kame-iwa on the Showa-shinzan lava dome. Blue dots and squares indicate ground surface temperature at the N-B crater as remotely observed from the south-western side and north-eastern side of the crater, respectively. (d) Monthly maximum volcanic plume height at the summit crater.

徐々に低下している状況が把握できる (Fig. 2(c-d)). 以上のとおり、有珠山の非活動期における火山活動は非常に低調である。

2002年10月以降の震源分布を Fig. 3 に示す。地震の主な発生領域は、①山頂火口原直下の深さ 2~4.5 km の領域 (以下、深部領域)、②山頂火口原直下の深さ 0.5~1.5 km の領域 (以下、浅部領域) 及び③昭和新山直下の深さ 0~1km の領域の 3 つに分けられる。約 20 年間にわたり、①~③以外の領域では地震がほとんど発生していない点は興味深い。

2.3 有珠山のマグマ供給系に関する知見

マグマ噴火を繰り返す有珠山の火山活動の理解を深めるためには、マグマの挙動やそれに関連する火山現象を包括的に説明するマグマ供給系を提示することが重要である。Aoyama et al. (2009) はそれまでの研究成果に基づき、有珠山の地下構造に関するイメージ図を提案した。本論では彼らの図を基に、前述した観

測成果及びその他の先行研究成果を加えてマグマ供給系のイメージ図として整理した (Fig. 4)。後述する 2000 年噴火以降に 3 回発生した FES も書き加えている。以下では Fig. 4 を用いて有珠山のマグマ供給系について深部から浅部の順で簡単に説明する。なお、噴火活動期におけるマグマの挙動及び地震活動との関連については 6 章で改めて詳しく議論する。

Tomiya and Takahashi (2005) 及び Tomiya et al. (2010) は過去の噴出物の組成や相平衡実験の結果に基づきマグマの圧力条件を検討した。その結果、有珠山の浅部マグマ溜まり及び深部マグマ溜まりはそれぞれ深さ 4~6km 及び深さ 8~10km に位置すると推定している。非活動期を対象とした測地学的データを用いた研究によると、深部マグマ溜まりが存在し得ると考えられる深さに膨張源が推定されており、定常的なマグマ蓄積の可能性が指摘されている (森, 2007; 村上, 2021)。

2000 年 PES の初期段階 (2000 年 3 月 27~29 日午前) に発生した地震の震源は主に山頂火口原直下の深

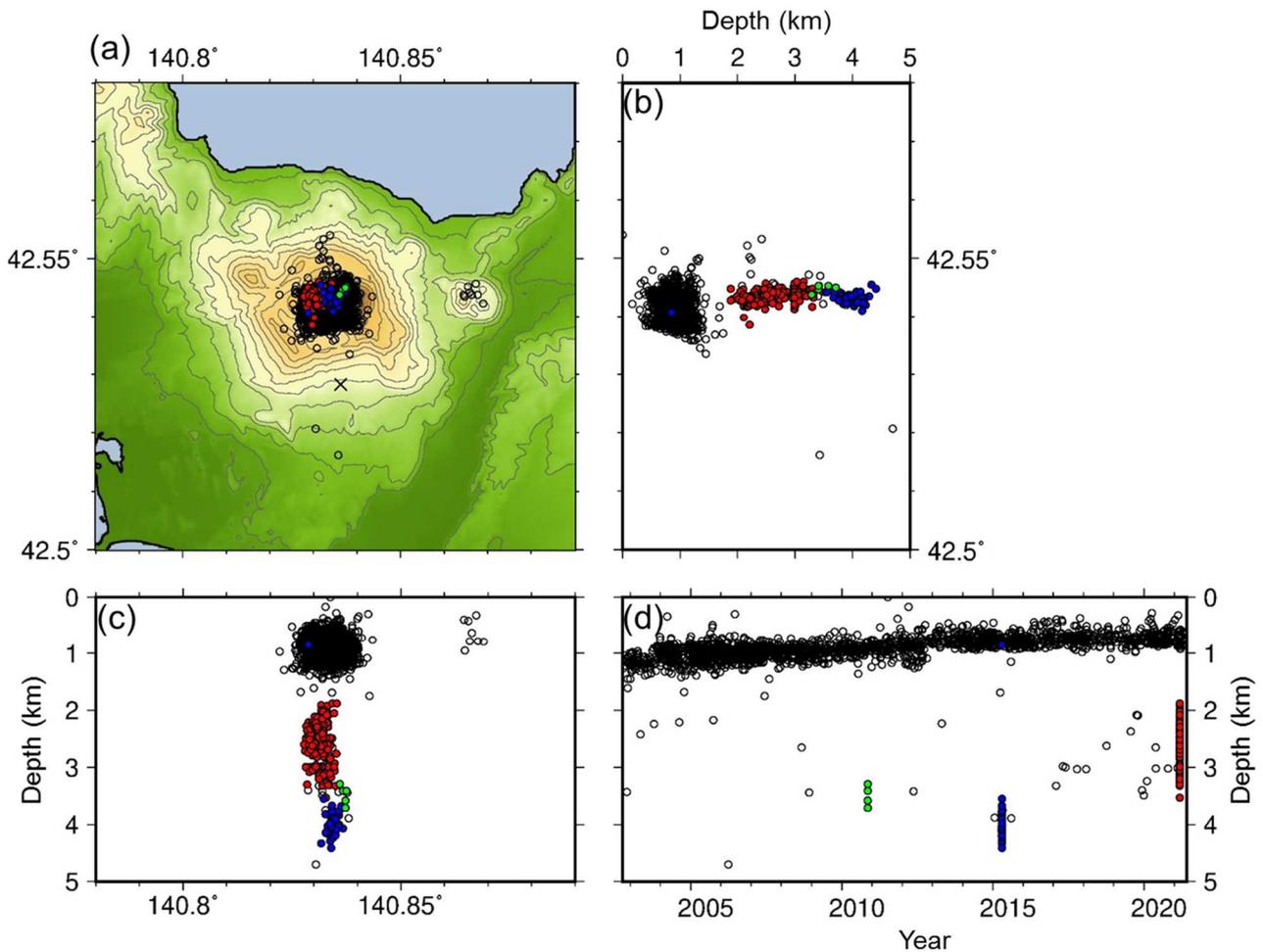


Fig. 3 Distribution of hypocenters (October 2002 to June 2021). Red, blue and green dots indicate the 2021, 2015 and 2010 FESs, respectively. White dots indicate the earthquakes except for the FESs. (a) Epicentral distribution. Cross indicates A4 station. (b) – (c) N-S and E-W cross-sections of hypocenters. (d) Depth-time series of hypocenters.

さ 2~4km に分布した (Onizawa et al., 2007). Yamamoto et al. (2002) は 2000 年噴火時に観測された周期 12 秒の長周期火山性微動の発生源の位置を山体直下の深さ約 5km に推定し、マグマ上昇に伴い発生したと解釈している。これらの震動源の位置はいずれも前節で述べた深部領域におおよそ対応しており、浅部マグマ溜まりが推定される範囲の上部またはその範囲内に当たる。

浅部マグマ溜まりの上位には浅い方ほど密度が小さく、かつ等密度面が北側に向かって浅くなるように傾斜する地下構造が推定されている (Onizawa et al., 2007)。2000 年 PES については、3 月 29 日午後以降の震源分布の水平方向への拡大と地下構造との関係性が指摘されている (Onizawa et al., 2007)。

浅部領域の地震は、1977 年噴火による貫入岩体の冷

却に伴う熱収縮により、火口原内の U 字形を呈した既存断層に沿って発生していると考えられている (Aoyama et al., 2009)。1992 年から 2017 年にかけての InSAR 解析の結果からは、過去の噴火に伴う貫入岩体の冷却による長期的沈降とその変動速度の低下が確認されている (Wang and Aoki, 2019)。

3 深部領域で発生する FES

1 章で述べた通り、2021 年 3 月 9~10 日に FES が発生した。Fig. 2(b)から分かる通り、2021 年 FES は非活動期における地震活動としては突出した規模であった。以下では、2021 年 FES の概要を紹介する。また、本事例の発生をきっかけに行った文献調査で確認された深部領域における 2000 年以前の FES の発生状況についても報告する。

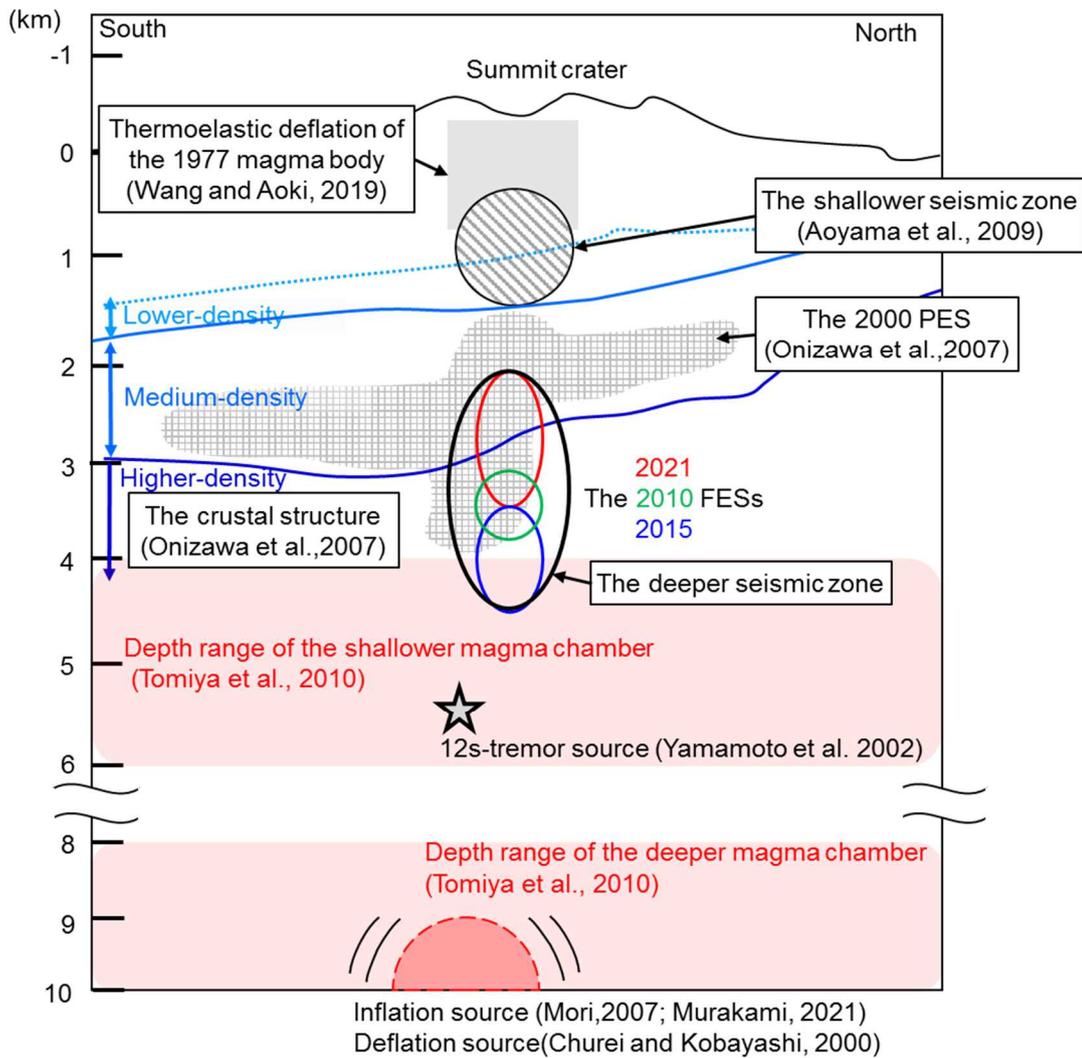


Fig. 4 Crustal activity under Usu volcano as a north-south cross section (based on Aoyama et al. 2009). The deeper and shallower seismic zones are indicated by the black ellipse and the circle with diagonal lines, with locations at depths of 2 – 4.5 km and 0.5 – 1.5 km beneath the summit, respectively. The hypocenters of the 2000 eruption precursory earthquakes were located at a depth of 2 – 4 km beneath the summit and also along the subsurface basement layer which become shallower toward the north (Onizawa et al., 2007). The star indicates the 12s tremor source of the 2000 eruption (Yamamoto et al., 2002). The pinkish parts indicate the locations of the shallower and deeper magma chambers estimated at 4-6 km and 8-10 km deep, respectively (Tomiya et al., 2010). The semicircle at the bottom, at a depth of around 10 km, indicates the inflation source during the non-active period (Mori, 2007; Murakami, 2021) and the deflation source of the 2000 eruption (Churei and Kobayashi, 2000).

3.1 2021 年 FES

Fig. 5 に 2021 年 FES の震源の深さ、最大振幅及び地震回数の時間変化を示す。発生した地震は全て明瞭な P 相及び S 相を持つ、火山構造的な地震あるいは A 型地震と呼ばれる波形タイプである。Fig. 5 には計数基準 (Table 1) を満たした地震のみを示すが、3 月 8 日 16 時頃から最大振幅が検出基準未満の地震が発生し

始めていた。検出基準以上の地震は 9 日 09 時から発生し始め、同日 16 時台に 1 時間あたりの回数が 10 回を超えた。その後は 10 日 01 時台まで 1 時間あたり 20 回前後で推移した。9 日 20 時 04 分から 22 時 39 分の間には、この事例中で最大となる地震のマグニチュード (以下、M) は気象庁マグニチュード (以下、M_j) で 1.4 の地震が 3 回発生した。地震活動はその後一旦

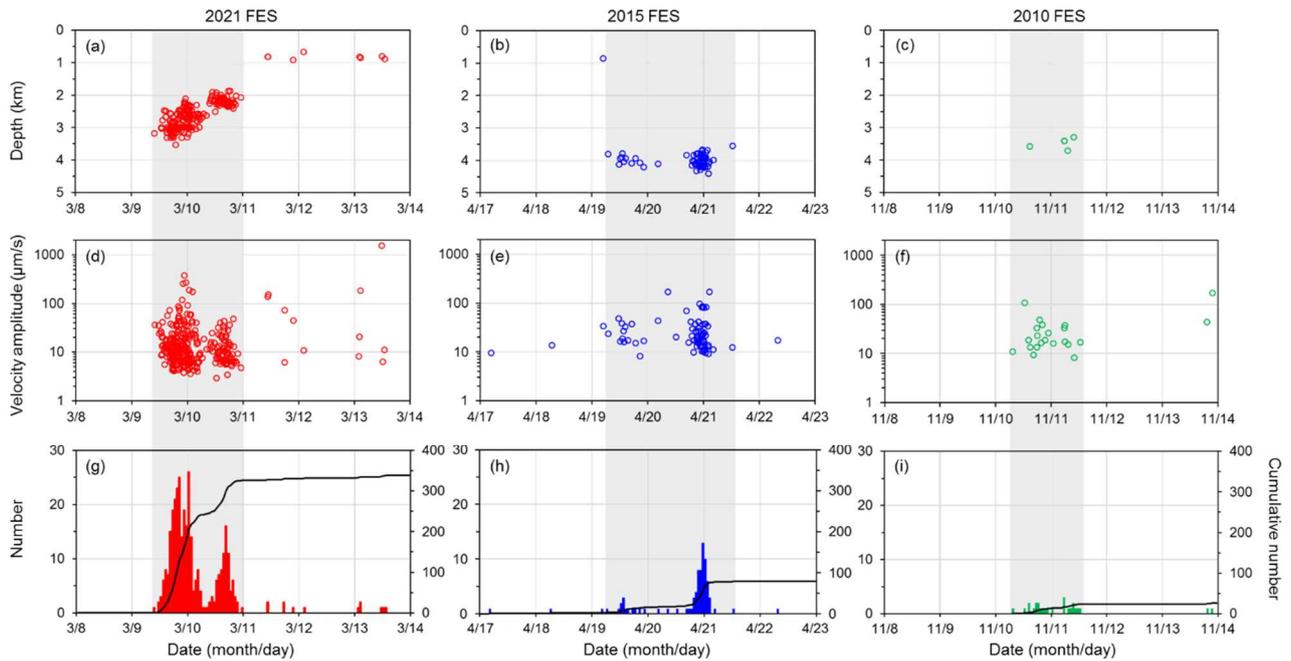


Fig. 5 Comparison of 3 FESs after the 2000 eruption by time series. Grey indicates the period in which earthquakes occurred in the deeper seismic zone. (a) – (c) Depth of hypocenters of the 2021, 2015 and 2010 FESs, respectively. (d) – (f) maximum seismic velocity amplitude of UD component observed by A4 station. (g) – (i) number of earthquakes. Colored bars indicate the hourly number of earthquakes. Black lines indicate the cumulative number of earthquakes. Earthquakes with no hypocenter estimation are excluded in (a) – (c).

低下し、10日12時頃から20時頃にかけて再び地震が増加したが、同日23時13分に観測された地震を最後に終息した。9日から10日午前中までの期間前半に発生した地震は深さ2.0~3.5 kmに、10日午後以降の期間後半に発生した地震は深さ1.9~2.5 kmにそれぞれ分布した (Fig. 5(a))。前半の地震については、その深さ分布の上端がおおよそ1日あたり1 kmの速さで浅部に移動しているように見える。

この事例中には山麓に設置された複数の傾斜計で最大0.5 μrad 程度の傾斜変動が観測された (気象庁, 2021)。防災科学技術研究所 (2021) は3月9~11日のGNSS及び傾斜計で捉えた変動データの解析から、有珠山直下にそれぞれ、球状圧力源モデル仮定で深さ1.5 km、体積変化量 $5.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、ダイクモデル仮定で上端深さ1.7 km、体積変化量 $9.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ の圧力源を推定している。

この事例終息後の3月11~16日には浅部領域でも散発的に地震が発生した (Fig. S1)。1日あたりの回数は最大でも6回で、非活動期における浅部領域の活動としてはわずかに高まった程度であった。13日11時54分に発生した地震のMは $M_j 1.5$ で、深部領域で発

生した最大地震 ($M_j 1.4$) よりもわずかに大きかった。9~10日の深部領域の群発地震が浅部領域の地震活動を誘発した可能性も考えられるが、本論では詳しい調査を行っていない。

札幌管区気象台はこの事例に際して噴火警報発表及び噴火警戒レベル2への引上げは行わなかった。ただし、有珠山としては、2009年12月の気象業務法改正による噴火予報・警報運用開始後初めて「火山の状況に関する解説情報」及び「火山活動解説資料 (臨時)」を発表した。参考までに、当時の札幌管区気象台の対応経過を Appendix 1-2 にまとめる。

3.2 2000年以降のFES

2000年噴火以降の震源分布から、2021年FESと同様な深部領域におけるFESは、2010年11月及び2015年4月の2事例が確認できる (Fig. 3)。これら3回のFESを比較すると、規模 (最大振幅及び回数) は2021年FESが最も大きく、2010年FESが最も小さい (Fig. 5)。2010年及び2015年FESでは、2021年FESで見られたような浅部方向への震源移動は確認されていない。なお、3回のFESの震源の位置関係を比較する

と、それぞれ相補的に空間分布しているように見える (Fig. 3).

3.3 2000 年以前の FES

2000 年噴火以前は地震計 1 点による観測だったため、精査に活用可能な現在残されている観測データは少ない。本論では観測資料及び文献を改めて網羅的に精査した結果、少なくとも 3 回の地震活動を確認した。精査に使用した A4 観測点の検測値を Table 2 に示す。そのうち 1 事例は深部領域で発生した FES である可能性が非常に高いことが明らかとなった。以下に詳細を述べる。

Table 2 Seismic activity on (a) 1995, (b) 1996 and (c) 1998, respectively.

(a) 1995			
Date	Number of earthquakes	Earthquake time	S-P time (s) at A4 station
1995-01-01	2	6:37	-
		19:31	-
1995-01-03	1	6:37	-
1995-01-04	1	10:32	0.6
1995-01-09	1	4:26	0.5
1995-01-14	2	<u>3:43</u>	<u>0.9</u>
		<u>10:16</u>	<u>0.9</u>
1995-01-15	2	<u>0:37</u>	<u>1.0</u>
		<u>4:27</u>	<u>0.9</u>
1995-01-16	1	21:21	-
(b) 1996			
Date	Number of earthquakes	Earthquake time	S-P time (s)
1996-05-03	5	2:45	0.5
		3:53	0.6
		11:43	0.4
		21:15	0.5
1996-05-04	2	21:16*	0.4
		1:02	0.4
1996-05-06	1	3:15	0.4
		10:46	0.6
1996-05-07	4	6:02	1.4
		16:47	1.3
		19:35	0.4

		21:24	-
1996-05-08	1	21:53	0.5
1996-05-09	1	17:44	0.3
1996-05-10	1	1:32	-
1996-05-12	1	22:14	0.6
(c) 1998			
Date	Number of earthquakes	Earthquake time	S-P time (s)
1998-07-17	1	3:36	0.6
1998-07-21	1	6:28	0.6
1998-07-23	1	18:23*	-
1998-07-24	1	0:20	0.5
1998-07-26	1	21:39	-
1998-07-27	1	20:41	0.6
1998-07-28	2	2:12	0.5
		6:35	0.6

Dates on which no earthquakes occurred are omitted.

Dashes indicate no records, and asterisks indicate earthquake that was felt at the foot of Usu volcano.

Underlining indicates earthquakes estimated to have occurred at depths of 2 – 5 km beneath the summit corresponding to an S-P time of 0.8 – 1.2 seconds.

3.3.1 1995 年 1 月 FES

Yokoyama and Seino (2000) は Hm. Okada 氏からの私信として, “In January 1995, an earthquake swarm occurred beneath the volcano and their hypocenters were determined by the UVO at depths of 4~5 km with high accuracy.”と紹介している。また、第 68 回火山噴火予知連絡会の議事録 (気象庁, 1995) 及び北海道大学の提出資料 (北海道大学理学部 (1995); 以下, 北大資料) によると, 1995 年 1 月 14~16 日に規模がかなり小さい地震が 40 個観測され, それらのうち 2 個は震源が山頂火口原の北西約 2km の洞爺湖温泉街 (Fig. 1(b)) の深さ約 5km に推定されると報告している。A4 観測点における地震の発生時刻及び S-P 時間を Table 2(a) に示す。S-P 時間が 0.8~1.2 秒であれば深部領域で発生した地震と判断できるが (詳細は 5 章で述べる), 1 月 14~15 日に S-P 時間が 0.9~1.0 秒の地震が 4 個発生している。北大資料には 14 日 03 時 43 分の地震の波形記録及び震源が掲載されており, 同日同時刻の S-P 時間 (0.9 秒) の検測値が残されている (Table 2(a))。

これらのデータは同一の地震のものと考えられる。

北大資料には洞爺湖温泉街の深さ約 5km に推定した震源が掲載されているが、2002 年以降の気象庁によるルーチン処理では洞爺湖温泉街を震央とする地震は 1 つも発生していない (Fig. 3)。そこで、この震源推定結果について簡単に検証する。

A4 観測点と深部領域の位置関係及び S-P 時間の記録から、大森係数は 3.8 と推定される (A4 観測点と深部領域との震央距離が 1.5km かつ深さ 3km とすると震源距離は 3.4km, S-P 時間は 0.9 秒と仮定)。洞爺湖温泉街の深さ 5km に震源を仮定した場合、大森係数 3.8 を用いると A4 観測点で予想される S-P 時間は 1.7 秒となる。これは観測された S-P 時間 (0.9~1.0 秒) と大きく異なる。したがって、実際の震源位置は北大資料が示す洞爺湖温泉街直下の位置よりも A4 観測点に近かったと考えられる。北大資料の震源位置には疑義が残るが、検測値や波形データが現存しないため再検証は困難な状況にある。しかし、北大資料にある震源分布図には山頂浅部で発生した地震の震源もプロットされており、一連の地震が相対的に深部で発生したことは間違いなさそうである。

以上のことから、1995 年 1 月 14~15 日に発生した地震活動は深部領域を震源とした FES である可能性が高いと考えられる。

3.3.2 1996 年 5 月及び 1998 年 7 月の地震活動

気象庁 (1996) 及び北海道大学理学部 (1996) によると、1996 年 5 月 3~4 日に地震が増加して有感地震も発生した。有感地震の震源は山頂浅部に推定されている。S-P 時間からも該当期間には深部領域で発生したと推定できる地震は無い (Table 2(b))。なお、5 月 7 日に S-P 時間が 1.4 秒及び 1.3 秒の地震が記録されている。これらは深部領域以外で発生した地震と考えられるが、詳細は不明である。

1998 年 7 月 23 日にも昭和新山植物園で震度 1 程度の揺れを伴った地震が報告されている (気象庁, 1999)。この地震の震源位置については北海道大学大学院理学研究科付属地震火山研究観測センター有珠山観測所 (1998) には記述されていない。また、S-P 時間が不明なことから発生領域の判断もできない (Table 2(c))。しかし、いずれの報告及び記録でも単発の地震であったことから、FES ではない可能性が高い。

上記 2 事例ともにデータが少なく詳細は不明である

が、深部領域で発生したと判断できる地震は含まれておらず、深部領域での FES ではなかったと考える。

4 PES と FES の比較

有珠山ではこれまでの経験から、地震多発は噴火の前兆現象であると認識されてきた (有珠山火山防災協議会, 2021)。しかし、3 章で述べた通り、2000 年噴火以降だけでも FES が少なくとも 3 回発生している。これらの FES と PES の違いについて地震学的に比較することは、今後の噴火予測手法を考える上で非常に重要である。本章では過去の PES 及び FES について、地震回数、地震波エネルギー放出量及び最大振幅別累積頻度分布に着目した調査結果を述べる。

4.1 比較項目毎の対象事例及びデータ

調査対象とした各事例の発生時期における観測体制等が異なるため、必ずしも同じ条件で比較することはできない。そこで、以下では比較項目毎に対象とした事例及びそのデータについて説明する。

4.1.1 地震回数

地震回数の比較は、地震回数合計が 50 回に達しなかった 2010 年 FES を除く 4 事例 (1977 年 PES, 2000 年 PES, 2015 年 FES, 2021 年 FES) を対象とした。ただし、2000 年 PES 以降の事例では A4 観測点、1977 年 PES では A2 観測点の回数データをそれぞれ用いており、直接比較できないことに留意する必要がある。

4.1.2 地震波エネルギー放出量

データが十分に残されている 4 事例 (2000 年 PES, 2010 年 FES, 2015 年 FES, 2021 年 FES) を対象とした。地震波エネルギー放出量の算出には M を用いた。以下に示す M は特段断らない限り、上下速度振幅を用いる舟崎 (2004) の手法によって推定された M_j に準拠したものである。また、できるだけ多くの地震の M を使用するため、広域地震観測網による一元化処理で M_j が求められていない地震については、A4 観測点の振幅データから推定した M を用いた (詳細は 4.3.1 項)。

2000 年 PES 初期の地震は当時の一元化処理対象にならないほど規模が小さく、 M_j が推定されたのは 3 月 28 日 00 時 10 分以降に発生した地震に限られる。一方、A4 観測点では同日 00 時 44 分の地震以降は、地震活動の活発化に伴い波形振幅が振り切れた状態に

なった。以上のことから、3月28日00時44分以前の地震ではA4観測点の上下速度振幅から推定したMを、3月28日00時44分以降の地震ではM_jをそれぞれ用いて地震波エネルギー放出量を求めた。

2010年FES以降の事例については、M_jが推定されている地震はそれぞれ2015年FESで15個、2021年FESで36個にすぎない。一方で、2000年PESとは異なり、これらの事例中にA4観測点の波形振幅が振り切れ状態になった地震はひとつもない。以上のことから、これら3事例については全てA4観測点の上下速度振幅から推定したMを用いてエネルギー放出量を求めた。

4.1.3 最大振幅別累積頻度分布

A4観測点の運用が始まった1991年12月3日以降を対象にPES、FES及び非活動期の長期的な地震活動について比較を行う。地震活動の比較にはG-R則(Gutenberg and Richter, 1944)を用いるが、この手法には均質なMのデータが必要となる。しかし、対象期間中の広域地震観測網は観測点数や配置が一定ではないため、M_jは均質ではない。また、A4観測点は1996年11月まで変位波形の観測のみであったことから、上下速度振幅を用いたMの推定もできない。

規模別頻度分布の調査では、任意の観測点における最大振幅の累積頻度分布から得られる石本-飯田の式(石本・飯田, 1939)がG-R則と同義であることから、Mが推定できない場合には振幅データが用いられる。最大振幅別累積頻度分布の傾きはm値と呼ばれ、b値とはm=b+1の関係が成り立つ(Asada et al., 1951)。そこで、本論では変位振幅を用いて最大振幅別累積頻度分布の比較検討を行う。

4.2 地震回数の時間発展

本節では各事例における地震回数の時間発展に着目する。Fig. 6では事例同士の時間発展が比較しやすいように、積算回数が50回となった時点を中心として、各事例の積算回数曲線を重ねて示した。1977年及び2000年PESの積算曲線は、地震多発により振幅の小さい地震の計数漏れが生じていた可能性がある時間帯を破線で描いた。この期間の積算曲線は両事例における積算回数の下限値を示していると考えられる。積算回数50回以降の時間発展を比較すると、1977年及び2000年PESでは地震回数が加速度的に増加して

いる様子が見て取れる。それに対して2015年及び2021年FESでは、地震回数が加速度的に増加することなく地震活動が終息している。一方、積算回数が50回未満の期間では、積算曲線の傾き(増加率)は2000年PESよりも2021年FESの方が大きい。両事例では積算回数が50回を超える前後で増加率の大小が逆転する関係となっている。

このように、ある時点以降に地震回数が加速度的に増加する特徴は、4.3節で述べる地震波エネルギー放出量の時間発展でも同様に認められる。経験則ではあるが、群発地震活動発生時の積算回数50回以降の時間発展は、噴火の有無を判断するための一つの指標となる可能性がある。

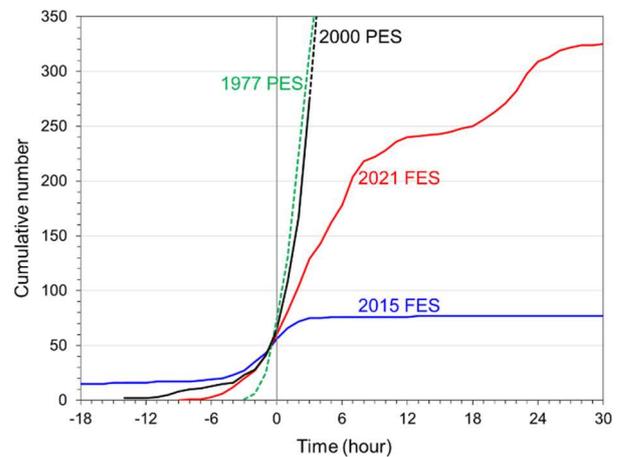


Fig. 6 Temporal development of the cumulative number of earthquakes. The green, black, red and blue lines indicate numbers for the 1977 and 2000 PESs and the 2021 and 2015 FESs, respectively. The dashed lines show counting uncertainty due to the large number of earthquakes in 1977 and 2000 PESs, respectively.

4.3 地震波エネルギー放出量の時間発展

本節では各事例における地震のMを推定し、Mから算出した地震波エネルギー放出量の時間発展に着目する。

4.3.1 Mの推定

M_jは以下の舟崎(2004)の式で求められる。

$$M_j = \frac{1}{0.85} \log A_v + \beta_v(\Delta, H) + C_v \quad (1)$$

ここで、A_vはA4観測点の速度上下振幅(10⁻⁵ m)、β_vは距離減衰項、Δは震央距離(km)、Hは震源の深さ

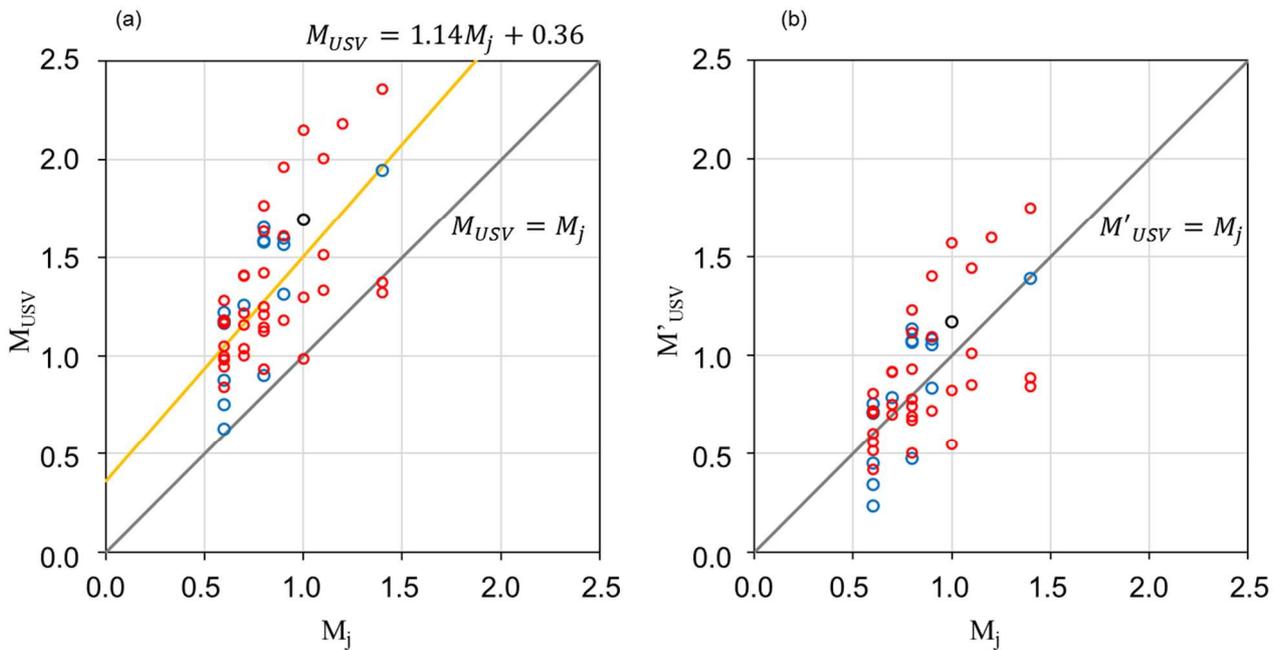


Fig. 7 Comparison of (a) M_j and M_{USV} , and (b) M_j and M'_{USV} . The black, red and blue dots indicate the 2000 PES, the 2021 and 2015 FESs, respectively. The yellow line denotes the results of a regression equation (2) obtained by using the least squares method. The black lines in (a) and (b) denote relational expressions showing $M_j = M_{USV}$ and $M_j = M'_{USV}$, respectively.

(km), C_v は観測点種別に応じた補正項 (本論では 0) である。

本論では、深部領域で発生する地震の震央分布と A4 観測点の位置関係から震央距離 $\Delta=1.5$ km, 震源の深さ $H=2.0\sim 4.5$ km とし、舟崎 (2004) の Fig.6 から読み取って減衰項 $\beta_v = 0.5$ とした。Fig. 7(a)に M_j と (1) 式から推定される M (以下, M_{USV}) の関係を示す。 M_{USV} は M_j に対して過大見積りの傾向が認められる。そこで、両者に直線関係を仮定してフィッティングを行い、以下の回帰式 (2) を得た。

$$M_{USV} = 1.14M_j + 0.36 \quad (2)$$

(2) 式を用いて補正した M_{USV} (以下, M'_{USV}) と M_j の関係を Fig. 7(b)に示す。 M_j と M_{USV} の関係と比較して、 M_j と M'_{USV} の関係の方が 1 対 1 の関係により近くなっていることが分かる。以後、本論では M'_{USV} を使用する。

4 事例の MT 図を Fig. 8 に示す。前述の通り、2000 年 PES では 28 日 00 時 44 分以前に発生した地震には M'_{USV} , それ以降の地震には M_j をそれぞれ使用した (Fig. 8(d)). Fig. 8(e)に M'_{USV} を対象とした 3 回の FES

及び 2000 年 PES の規模別累積頻度分布をそれぞれ示す。いずれも G-R 則 (Gutenberg and Richter, 1944) に従うと仮定すると、累積頻度分布の折れ曲がりの位置から検知力の下限は概ね $M'_{USV} \geq 0.1$ と推定される。なお、規模別累積頻度分布の直線部分の傾きの絶対値 (b 値) を 2000 年 PES と 3 回の FES で比較すると明らかに異なっているが、これについては次節で詳しく述べる。 Fig. 8(d)で 2000 年 PES の M_j の下限が時間経過と共に大きくなっているのは、地震多発により小さい地震が検測不能になったためと考えられる。

M の最大値に着目すると、3 回の FES の最大 M'_{USV} はいずれも 2.0 以下である。一方、2000 年 PES の最大 M_j は 4.5 で、M2 以上は約 760 個発生している。これらのことから、3 回の FES と比較して 2000 年 PES の地震活動は圧倒的に活発だったことが分かる。

4.3.2 地震波エネルギー放出量の比較

個々の地震の地震波エネルギー放出量 $E(J)$ の推定には以下の式 (宇津, 2001) を使用した。

$$\log E = 4.8 + 1.5M \quad (3)$$

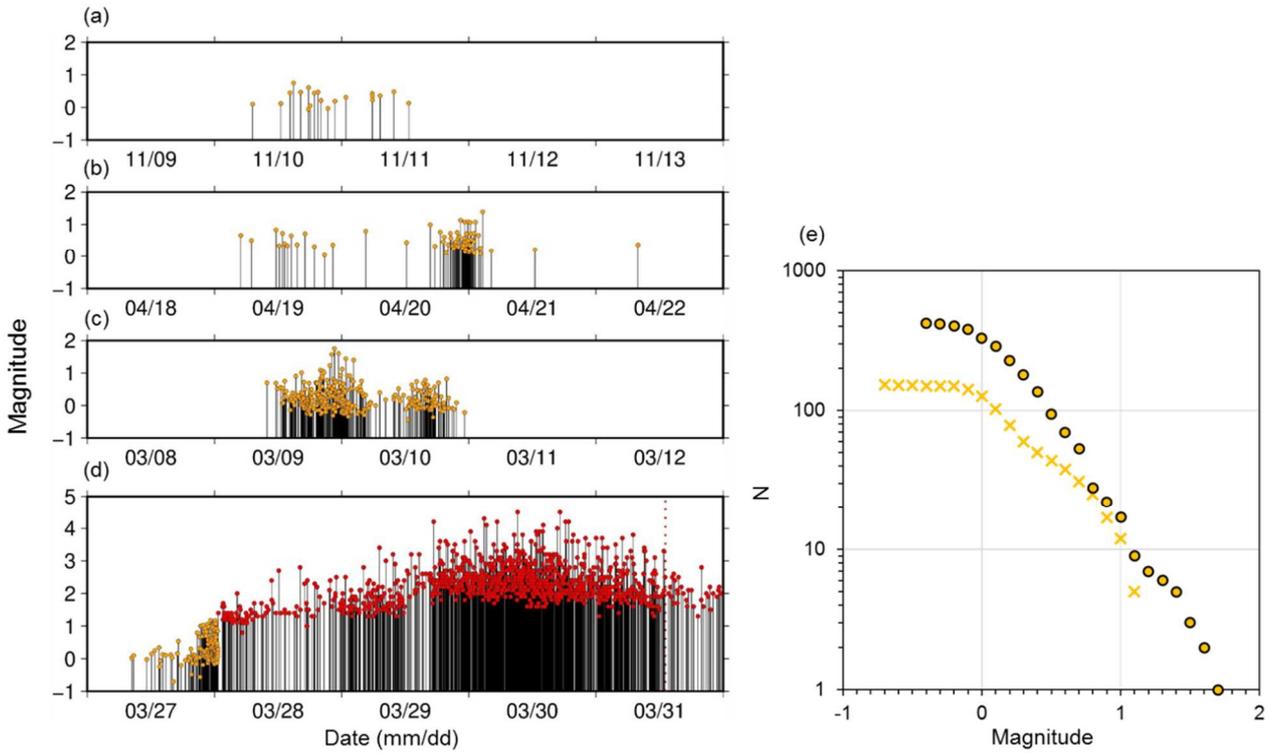


Fig. 8 Time-series representation of magnitudes. (a) – (d) Magnitudes of the earthquakes in the 2010, 2015 and 2021 FESs and 2000 PES, respectively. Orange and red dots indicate estimated M'_{USV} and M_j , respectively. (e) Cumulative number of earthquakes versus magnitude relation. Orange crosses indicate cumulative number of the earthquakes (M'_{USV}) for the 2000 PES. Orange circles indicate the sum of earthquakes in the 2021, 2015 and 2010 FESs.

(3) 式により推定したエネルギー放出量の時間積算を Fig. 9 に示す. 2000 年 PES のエネルギーの総放出量は約 2.8×10^{12} J に達する. これに対して 3 回の FES 中で最大であった 2021 年 FES でもエネルギーの総放出量は 1.6×10^8 J であり, 2000 年 PES の 17,500 分の 1 に過ぎない.

エネルギー放出量について最終的には 2000 年 PES が最も大きい, 活動開始から約 12 時間後までの期間に限れば, 2021 年 FES や 2015 年 FES の方が大きい (Fig. 9(a)). 比較のために, 活動開始から 24 時間後までのエネルギー放出量の時系列を Fig. 9(b) に示す. 2021 年 FES のエネルギー放出量は活動開始の数時間後から一定の傾きで増加し, 約 10 時間後から傾きが明瞭に大きくなるが, 約 15 時間後には傾きが緩やかになり, そのまま終息に向かっている. 一方, 2000 年 PES のエネルギー放出量は開始の約 13 時間後からようやく傾きが大きくなり始め, 約 16 時間後 (3 月 28 日 00 時頃) 以降は傾きがさらに大きくなり, その状態を維持したまま経過している.

以上のことから, 初期段階におけるエネルギー放出量の時間変化だけで最終的に噴火に至るかどうかを判断することは難しいと考えられる. 2000 年 PES では一定時間経過後からは高いエネルギー放出率を維持したまま噴火に至っている. その一方, 2021 年 FES では一定時間経過後からはエネルギー放出率が低下し, その後そのまま終息している. したがって, 地震活動開始から一定時間経過後のエネルギー放出率に着目した場合であれば, 経験的な活動推移予測として活用できる可能性があると考えられる.

4.4 最大振幅別累積頻度分布の比較

4.3.1 項で述べた通り, 2000 年 PES 及び 3 回の FES の規模別累積頻度分布の直線部分の傾き (b 値) を比較すると, 前者は後者に比べて小さい (Fig. 8(e)).

A4 観測点の S-P 時間から判定 (本手法の詳細は 5 章で述べる) した深部領域の地震について, 上下変位振幅の時系列及び 4 つの期間毎 (①1991 年 12 月 3 日 ~ 2000 年 3 月 26 日, ②2000 年 PES (活動開始から波形

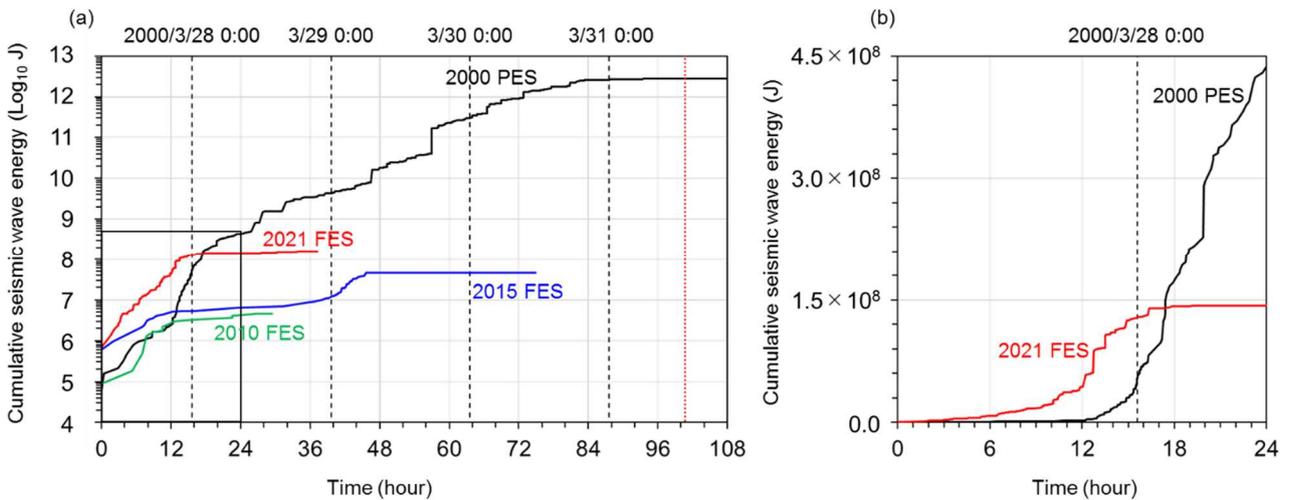


Fig. 9 Time-series of cumulative seismic wave energy. (a) Black, red, blue and green lines indicate log scale cumulative energy of the 2000 PES, 2021, 2015 and the 2010 FESs, respectively. The horizontal axis shows the time since the first earthquake of each event, and the black and red lines show daily boundaries and eruption start times for the 2000 eruption event, respectively. (b) Enlarged view of (a) with linear scale cumulative energy.

振幅が振り切れる 3 月 28 日 00 時 44 分までの期間), ③2001 年~2021 年 3 月 8 日, ④2021 年 FES) の振幅別累積頻度分布を Fig. 10 に示す. 累積頻度分布の傾きが直線状になる振幅範囲 ($0.4 \sim 1 \mu\text{m}$) に着目すると, ②の累積頻度分布の傾き (m 値) は①③④のそれと比較して明らかに小さい. ②については地震多発の影響で振幅の小さい地震の検出漏れが生じ, 見かけ上傾きが小さくなっている可能性がある. しかし, 当時の連続波形 (宮村・他 (2003) の 3.2.1 図) を確認すると, 対象とした時間帯はそれほど多発しておらず, 振幅の小さな地震を見落している可能性は低いと考えられる. したがって, PES の累積頻度分布の傾き (m 値) の違いは見かけ上のもでは無いと考えられる.

観測点が異なるため直接の比較はできないが, 1977 年 PES の m 値が時間経過と共に小さくなったとの報告がある (大野・他, 1980). これらのことを踏まえると, m 値 (b 値) を短期的な噴火予測に経験則として活用できる可能性がある.

利用可能な観測データが限られているため, 本論ではこれ以上の詳しい検討は行っていない. 今後, データ蓄積を進め, 誤差評価も含めた定量的な比較を行うとともに, m 値の違いを支配するメカニズムに関する考察を行う必要がある.

5 長期的な地震活動と噴火活動との関係

本章では噴火の数か月~数年前から始まる長期的前兆現象について検討する. 他の火山ではマグマ噴火の長期的前兆現象として, 熱活動の高まりや小規模な水蒸気噴火が発生する場合がある (例えば, 十勝岳:勝井・他, 1987;伊豆大島:渡辺, 1998;新燃岳:Nakada et al., 2013). 有珠山では Fig. 2(c-d)から分かるように, 1977 年噴火及び 2000 年噴火に先行する熱活動の高まりは確認されていない (鍵山, 1993;宮村・他, 2003). また, その他の有史以降の噴火についても長期的前兆現象と考えられる熱活動の高まりは報告されていない.

2000 年噴火以前には地殻変動の連続観測が行われていなかった. 繰り返し地殻変動観測による定常的なマグマ蓄積の可能性は指摘されているものの (森, 2007;村上, 2021), 地殻変動の長期的前兆現象の有無やその詳細については不明である.

以上を踏まえて, 本論では地震活動に着目した長期的前兆現象の議論を行う. Yokoyama (1985) は, 1977 年噴火の数年前から地震活動が活発化していた可能性を指摘している. Oshima and Ui (2003) は 2000 年噴火の長期的前兆現象として, 地震活動の活発化に加えて噴火の数か月前から観測された地下水位の変化 (Shibata and Akita, 2001) を取り上げている. 中田 (2016) は中期的予測として, 噴火の準備段階には有珠山を中心とした広域の隆起現象や地震の発生回数の増加が期待されると述べている. 一方, Aoyama et al.

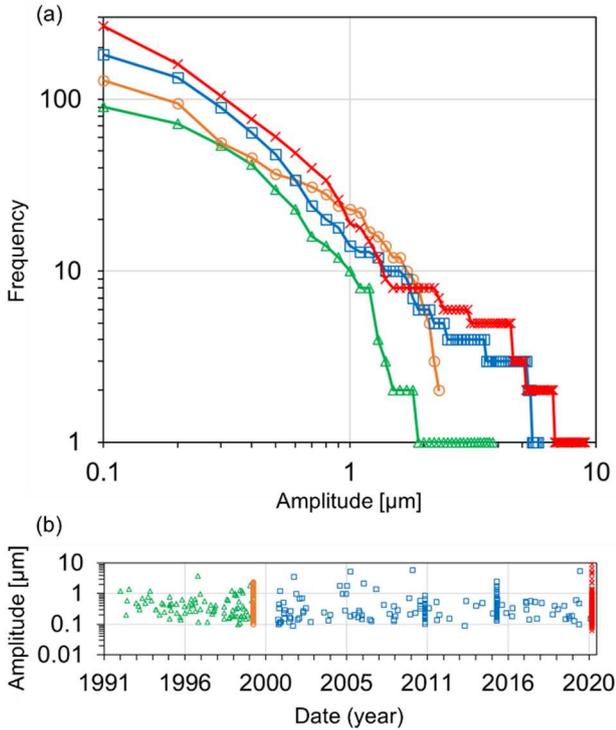


Fig. 10 Maximum displacement amplitude of the vertical component of earthquakes occurred in the deeper seismic zone beneath the summit over three decades. (a) Amplitude-frequency relation. (b) Amplitude time series. The colors and symbols in (a) correspond to those in (b). The green triangles, orange circles, blue squares and red crosses indicate earthquakes from 12/3 1991 – 3/26 2000, 2000 PES (3/27 8:24 – 3/28 0:44), 2001 – 3/8 2021 and 2021 FES, respectively.

(2009) は 2000 年噴火前後の地震の発生頻度を比較し、噴火終息後も 1995 年以前の水準まで戻っていないことから、噴火前の地震活動の活発化は長期的前兆現象とは考えにくいとしている。ただし、上記の長期的な地震活動に関する指摘や考察は、地震の発生領域について考慮していないことに注意が必要である。

そこで、本論では深部領域及び浅部領域におけるそれぞれの地震発生頻度の長期的時間変化について調査を行った。

5.1 過去約 30 年間の地震発生領域の推定手法

2002 年 10 月以降の約 20 年間にわたる気象庁のルーチン処理で決定された震源分布を基に、A4 観測点運用開始以降の約 30 年の間に発生した地震の S-P 時

間のデータからそれぞれの地震の発生領域を推定する。

Fig. 11(a)に 2002 年 10 月～2021 年 5 月の期間における深部領域及び浅部領域で発生した地震の震源の深さと A4 観測点における S-P 時間の関係を示す。この図から A4 観測点で S-P 時間が 0.3～0.8 秒 (0.8～1.2 秒) であれば、浅部領域 (深部領域) で発生した地震であることが分かる。この関係を用いて A4 観測点の S-P 時間から判別した発生領域別の積算回数の時間発展を Fig. 11(b-d)に示す。対象期間は A4 観測点運用開始以降の 1991 年 12 月 3 日～2023 年 5 月 31 日の期間である。

上記の手法で地震の発生領域を推定するためには震央が山頂火口原付近にあると仮定する必要がある。したがって、震央が山頂火口原付近以外の場合には本手法を適用できない。しかし、2000 年噴火後の約 20 年間の震源分布からは活動領域の位置に時間変化する様子は認められない (Fig. 3)。したがって、本手法で発生領域を推定した結果は有効であると考えられる。

なお、1994 年 8 月の検出基準変更 (Table 1)に伴い、A4 観測点の検知力はそれ以前と比較して低下していることに注意が必要である。しかし、計数された地震の発生頻度は検知力が相対的に高かった基準変更前の方がむしろ低いことから大きな影響は無いと考えられる。また、2000 年噴火後には観測点が増設されているが、検出基準は変更されておらず、検知力の変化は無いと考えられる。

2000 年噴火以前については、3.3 節で示した 1995 年 1 月の事例以外にも FES が発生していた可能性は必ずしも否定できない。また、特に 1994 年 8 月の検出基準変更以前は検知力が相対的に高いため、より小規模な FES が発生していた可能性がある。ただし、本論ではこれらの期間における FES の発生については特に考慮しないものとする。

5.2 深部領域の地震活動

ここではまず、前節で示した手法による領域推定結果に基づく深部領域の長期的な地震発生頻度の変化について述べる。次に、2000 年噴火前の観測事例との比較及び 2000 年噴火との関係性について考察する。

5.2.1 発生頻度の時間変化

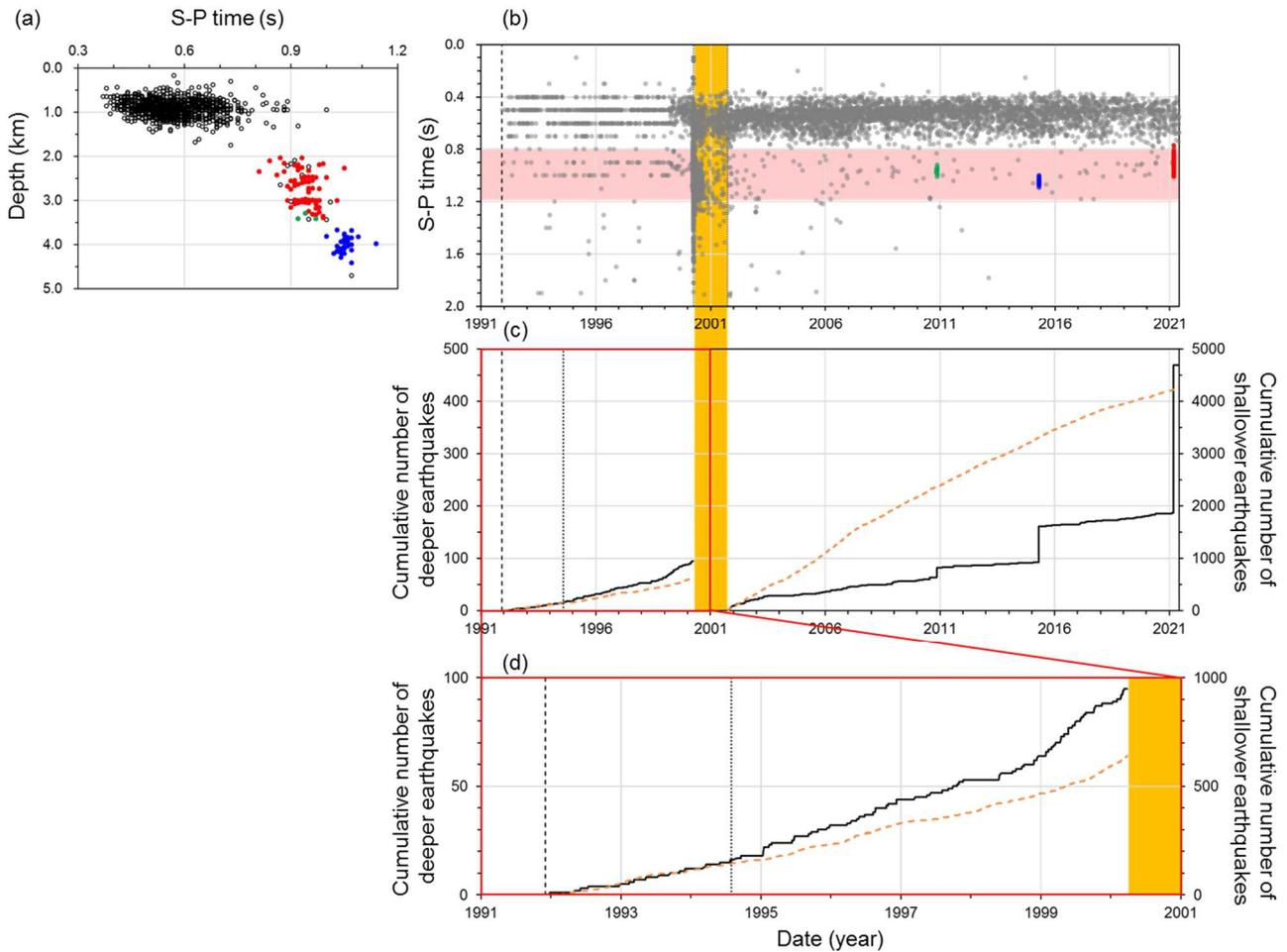


Fig. 11 Seismicity of Usu volcano for 1991 – 2021. (a) Comparison with S-P time at A4 station and depth of hypocenter. Red, blue and green dots indicate 2021, 2015 and 2010 FESs, respectively. (b) Time series of S-P time at A4 station. Yellow and red backgrounds indicate the 2000 eruption period and earthquakes in the deeper seismic zone, respectively. (c) Cumulative number of earthquakes for 1991 – 2021. The black line and orange dashed line show the cumulative number of earthquakes in the deeper and shallower seismic zones, respectively. The black dashed and dotted lines indicate the date of beginning of observation at A4 station and changes in recording criteria, respectively. Yellow indicates the 2000 eruptive period. (d) Cumulative number of earthquakes for 1991 – 2000. The lines in (d) correspond to those in (c).

2000 年噴火以降の深部領域の地震発生頻度は 3 回の FES を除けば平均 5.0 回/年で、特段の時間変化は認められない (Fig. 11(c)). 一方、噴火以前の発生頻度は 11.9 回/年で、噴火後と比べて 2.4 倍、かつ時間経過と共に上昇する傾向が認められる。

2000 年噴火以前についてより詳細に比較する (Fig. 11(d)). 地震発生頻度の増加傾向は 1995 年頃に始まり、Oshima and Ui (2003) が指摘するように、1998 年以降はさらに明瞭になっている。1998 年 1 月 1 日前後の発生頻度を比較すると、1998 年以前が 8.7 回/年であるの

に対して 1998 年以降は 18.8 回/年と 2.2 倍になっている。噴火直前の 2000 年 1 月 13 日～3 月 13 日の 2 か月間には、集中して 7 回の地震が発生した (年回数換算で 42 回に相当)。しかし、その後は 3 月 27 日 8 時 24 分の PES が開始するまで 1 回も発生していない。

5.2.2 他観測結果との比較及び噴火との関係性

Shibata and Akita (2001) は水位変化－歪応答の関係及び深さ 4～11km の球状圧力源を仮定した場合、1999 年 12 月 31 日～2000 年 1 月 3 日の一時的な地下水位

上昇は $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5 \text{m}^3$ の体積変化で説明できるとしている。2000 年 1 月頃の一時的な地下水位変化と深部領域の地震が集中して発生した時期がおおむね一致している点は非常に興味深い。

深部領域の地震活動と浅部マグマ溜まりは近接した位置関係にある (Fig. 4)。前項で示した 2000 年噴火前の数年～数か月スケールでの地震活動の高まりは、浅部マグマ溜まりの増圧や火山性流体の上昇により引き起こされた可能性が考えられる。浅部マグマ溜まりの活動も深部マグマ溜まりの活動 (例えばわずかな量のマグマあるいは火山性流体の供給) の影響を受けていた可能性も考えられるが、それを裏付けるような観測データや報告はない。いずれにせよ、深部領域の地震活動と浅部マグマ溜まりの活動には密接な関係があり、深部領域における噴火前の地震活動の高まりは長期的前兆現象であった可能性が高いと考えられる。先行研究で指摘されていた噴火前の地震発生頻度の上昇が、今回の調査により改めて定量的に確認することができたと考える。

最近数年間の深部領域における地震発生頻度には、2000 年噴火前のような上昇傾向は認められない (Fig. 11)。2023 年時点では、2000 年噴火前のような長期的な地震活動活発化は始まっていないのかもしれない。いずれにせよ、本論で示した深部領域における地震活動の長期的変化は次期噴火に備える上で重要な情報として活用する必要があると考える。

5.3 浅部領域の地震活動

浅部領域の地震発生頻度にも時間変化が認められたので報告するとともに、先行研究を基に時間変化のメカニズムに関する考察を行う。

5.3.1 発生頻度の時間変化

浅部領域の地震発生頻度は 2000 年噴火前後でそれぞれ 77.0 回/年、216.4 回/年で、噴火以降の発生頻度が 2.8 倍になっている (Fig. 11(c))。また、2000 年噴火前後のそれぞれの期間内においても時間変化が認められる。噴火以前は 1999 年 8 月頃から発生頻度が上昇する傾向が認められる (Fig. 11(d))。1999 年 8 月前後と比較すると、それ以前が 68.2 回/年、それ以降が 180.2 回/年であり、後者は前者の 2.6 倍である。

一方で、2000 年噴火以降では積算曲線が上に凸の形をしており、時間経過と共に発生頻度が低下している

(Fig. 11(c))。例えば、2000 年噴火直後の 5 年間で最近 5 年間の発生頻度を比較すると、それぞれ 271.3 回/年および 144.3 回/年となり、後者は前者の半分程度になっている。

5.3.2 時間変化要因及び 2000 年噴火との関係

2.3 節で述べた通り、浅部領域の地震活動は 1977 年噴火の貫入岩体の熱収縮に起因すると考えられており、マグマ溜まりの活動との関係性は不明である。それにも関わらず、地震発生頻度が a) 1999 年頃から上昇し、b) 2000 年噴火を境として更に上昇し、c) 2007 年頃からはゆっくり低下していることは興味深い。

a) については、Aoyama et al. (2009) が 1977 年噴火からの経過を次のように考察している。1977 年噴火に伴うマグマ貫入の段階では貫入岩体の周辺は低温状態にあり、浅部領域では断層運動による活発な地震活動がみられる。しかし、その後は時間経過と共に貫入岩体から周囲へ熱拡散により既存断層面の温度上昇が起こる。その結果、断層運動が地震性すべりから非地震性すべりへと遷移し、地震活動度が低下した。2000 年噴火前に始まった地震活動度の上昇は、その逆のプロセス (温度低下と地震性すべりへの再遷移) を反映したものと考えることができる。

山頂火口原の地殻変動速度が時間経過と共に低下していること (Wand and Aoki, 2019) も踏まえると、浅部領域の地震活動の長期的な時間変化は既存断層の温度の時間変化及び熱収縮に伴う歪速度の時間変化の 2 つの要因が関係すると考えられる。したがって、前述した時間変化のうち、a) については前者、c) については後者が支配的であった可能性がある。

b) については温度低下の進展による地震性すべりの回復による可能性が考えられるが、ここでは別の要因について考察する。2000 年噴火活動期には、山頂火口原内でもマグマ貫入に伴って発生したと考えられる顕著な地盤変動が観測されている (例えば、森・宇井, 2000)。これにより浅部領域における既存断層周辺の応力場に擾乱を与えた結果、浅部領域の地震活動度を上昇させた可能性が考えられる。

いずれにせよ浅部領域における地震活動の時間変化は、様々な要因が同時に関係すると考えられる。今後も多点多項目観測を継続することで地震活動の時間変化及びそれを引き起こす要因を把握することが重要である。

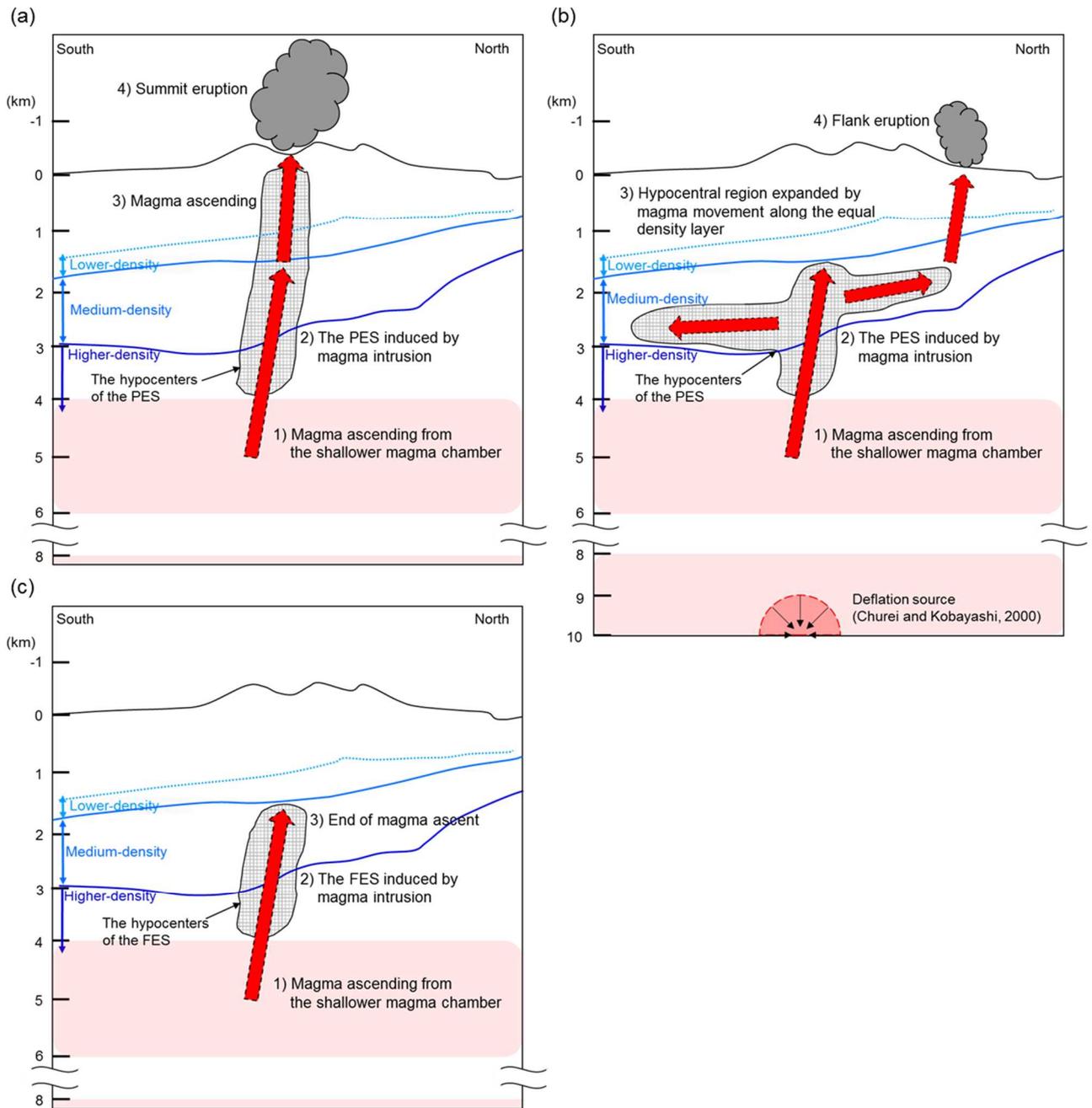


Fig. 12 Schematic image for magmatic activity at Usu volcano with a north-south cross section. The numbers in each figure indicate order of occurrence. (a) 1977 eruption, (b) 2000 eruption, (c) 2021 FES. Red arrows represent magma movement. Grey shows hypocentral regions of earthquakes induced by magma intrusion. Other lines and symbols correspond to those in Fig. 4.

6 火山活動推移予測のための概念モデルの提案

マグマ供給系に関するイメージ図 (Fig.4) に基づいて火山学的背景を踏まえながら火山活動を解釈することは、活動推移の理解及び予測を行う上で重要かつ有効である。本章では活動推移が全く異なる3つの事例 (1977年 PES, 2000年 PES, 2021年 FES) に関する

観測成果および研究成果を概観する。その上で、各事例に対応する概念モデルを提案する。

最初に3事例中で最も多くの資料が残されている2000年噴火を取り上げる。Aoyama et al. (2009) は活動推移を以下の通りまとめている。マグマは山頂火口原直下深さ4~6kmの浅部マグマ溜まり (東宮・宮城、

2002 ; Yamamoto et al., 2002) から上昇し、深さ 2km にまで達した (古屋・他, 2001 ; Onizawa et al., 2007). その後、マグマは斜めに傾斜した密度構造に沿って移動し (Onizawa et al., 2007), 北西山麓から噴火が発生した. 中禮・小林 (2000) は噴火発生前後の地殻変動観測の結果から、深部マグマ溜まりの深さ (Tomiya and Takahashi 2005 ; Tomiya et al., 2010) に対応する地下 12 km の深さに収縮源を推定した. 深部マグマ溜まりから上昇したマグマが浅部マグマ溜まりへ注入され、噴火をトリガーした可能性が考えられるが、これを直接的に示す観測データは報告されていない.

次に 1977 年噴火について取り上げる. 噴火開始までの活動推移に関する研究成果や観測結果が少ないため、2000 年噴火との比較により活動を概観する. 鈴木・他 (1980) は 1977 年 PES (8 月 6 日 23 時~7 日 05 時) の震源分布を推定した. それによると、山体全体に広く地震が分布した 2000 年 PES とは異なり、山頂火口原直下の深さ 5km 以浅の領域にのみに分布した. Yokoyama (1985) は、A2 観測点で観測された PES の S-P 時間が時間経過と共に短くなる傾向が見られたと指摘している. 以上のことから、2000 年噴火と異なり、1977 年噴火は浅部マグマ溜まりから上昇を開始したマグマが水平方向へ移動することなく上昇を続けて山頂火口原に到達し、山頂噴火に至ったと考えられる.

最後に 2021 年 FES を取り上げる. 詳細な経過は 3.1 節で述べた通り、地震増加中に深さ 2km 前後に膨張性の地殻変動源が推定され (防災科学技術研究所, 2021), 震源が時間経過と共に浅くなる傾向が見られた (Fig. 5(a)). これらのことから、浅部マグマだまりから地表に向かって小規模なマグマ貫入が生じていた可能性が考えられる.

以上の 3 事例の概念モデルを Fig. 12 に示す. これらの概念モデルは主に地震活動とそれにより推定されるマグマの上昇及び移動に焦点を当てて描いたものである. これは地震観測データが 3 事例を通じて最も豊富に残されており、対比が比較的容易であるためである. したがって、今後新たな観測事例や知見が得られた場合には概念モデルのアップデートが必要である.

7 噴火警戒レベル判定基準改定の考え方

有珠山の噴火警戒レベルの判定基準 (以下、判定基

準) は 2020 年 3 月に精査・公表され、2023 年 11 月 6 日に一部改定が行われた (気象庁, 2020b ; 気象庁, 2023b). 本論では便宜上、2020 年に精査・公表された判定基準 (気象庁, 2020a) を「旧判定基準」、2023 年に改定された判定基準 (気象庁, 2023a) を「新判定基準」とする.

旧判定基準は過去の噴火時に観測された前兆現象に基づき設定されたものであるが、判定項目のほとんどが定性的表現にとどまっていた. そこで新判定基準の改定にあたっては、前章までの検討結果に基づいて判定項目の定量化及び客観的指標の導入が行われた.

本章では、まず有珠山の判定基準の導入に関する経緯及び旧判定基準が抱えていた具体的な課題について述べる. その上で、それらを解決するために新判定基準に取り入れられた定量的・客観的指標と背景の考え方について説明する.

7.1 有珠山の判定基準の課題と改定

本節では、まず気象庁が運用する判定基準について簡単にまとめる. そして、旧判定基準導入時の経緯と抱えていた課題とその改定内容の概要を述べる.

7.1.1 判定基準

気象庁は火山災害の一層の軽減を図る目的で、2007 年に改正された気象業務法に基づき噴火警報及び予報の発表を開始した. 「噴火警戒レベル」は火山防災協議会との共同検討に基づき、火山活動の状況に応じて「警戒が必要な範囲」と「とるべき防災対応」を 5 段階に区分した指標であり、地元自治体の地域防災計画などに定められた火山で噴火警報に付して運用される (例えば、山里・他, 2013).

気象庁は噴火警戒レベルを運用する全国 49 火山の判定基準を 2022 年 3 月までに精査・公表した. これは 2014 年御嶽山噴火災害を踏まえた火山噴火予知連絡会からの提言 (火山噴火予知連絡会火山情報の提供に関する検討会, 2015) に基づいて行われた. 判定基準は新たな観測事例や火山学的知見等が得られた場合にはその都度見直すこととしている (気象庁, <https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/keikailevelkijunn.html>).

判定基準は「判定基準表」及びその根拠となる考え方を詳細に記述した「判定基準の解説」が気象庁ホームページ (<https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/ke>

ikailevelkijunn.html) で公表されている。

7.1.2 旧判定基準とその課題

旧判定基準が精査・公表された際には、有珠山火山防災協議会による噴火警戒レベル自体の改定も行われた。このレベル改定のポイントは、確実な早期避難のために火山活動が高まる段階でのレベル3の運用を廃止したこと、及び噴火地点の事前予測が困難なため噴火前には警戒範囲を最大限広く設定し、噴火後は状況に応じて順次縮小させることとした点である（例えば、気象庁、2020b）。これらの考え方は新判定基準でもそのまま受け継がれている。

旧判定基準にはほとんどの項目が定性的表現にとどまり具体性に欠ける、といった課題があった。例えば、レベル2引上げ基準にある「地震回数の加速度的増加」、レベル4引上げ基準の「体を感じる地震の発生」及び「膨張性地殻変動の検出」の各項目には数値指標が示されていない。唯一の定量的表現である地震回数についても、地震発生領域や規模が規定されておらず、判断指標としては曖昧さが残されている。これらの項目の設定が定性的かつ曖昧な表現にとどまっている理由としては、過去の噴火活動を前兆段階から多点多項目の観測網で捉えた経験が無く、得られた観測データが極めて限定的で十分な検証作業ができなかったことが考えられる。また、過去の噴火前兆活動に対する火山学的な理解が必ずしも十分ではなく、観測結果をそのまま判断指標として採用せざるを得なかったためと考えられる。

7.1.3 新判定基準における改定内容

前項で述べた課題のうち定量化・客観化による解決が可能な事項について、2023年11月に判定基準の改定が行われた。判定基準表の新旧比較及び判定基準の解説に新たに追記された事項を Appendix 3 にまとめる。以降の 7.2~7.5 節では、それらの中から a) 概念モデルの導入、b) 地震波エネルギー放出率の活用、c) Mを用いた現地有感判断指標の導入及び d) 噴火未遂の想定必要性の4つを取り上げる。以下では、その基となる考え方及び新判定基準への追加内容について説明する。

7.2 概念モデルの導入

7.1.2 項で述べた通り、旧判定基準設定時には過去の

噴火前兆活動に対する火山学的な理解及び観測結果に対する解釈が必ずしも十分ではなかった。そこで新判定基準の改定にあっては、概念モデル (Fig. 12) に基づく事例毎の活動推移予測を念頭において判定項目を設定した。今後、判定基準の更なる定量化及び客観的指標の導入を進める上では、概念モデルの精緻化を図ると共に根拠資料として積極的に活用する必要があると考える。

7.3 地震波エネルギー放出率の活用

地震回数以外のデータに基づく判定基準の定量化の考え方について説明する。地震活動状況を定量的に評価する上では、地震の発生原因となるマグマ貫入と地震活動の関係性を把握することが重要である。

井口・他 (2019) は、桜島の過去の火山活動時のマグマ貫入速度と噴火活動規模・様式との比較から、マグマ貫入速度による経験的事象分岐論理を提案した。それによると、マグマ貫入速度が大きいほど規模の大きな噴火活動が発生するとしている。ただし、瞬間的な貫入速度だけではなく継続時間を考慮する必要性も指摘している。White and McCausland (2016) は、世界中の火山活動の観測事例を基に、噴火前の地震活動により放出された地震モーメントの総和と地殻変動観測により捉えられたマグマ貫入量の比例関係を指摘している。

井口・他 (2019) の提案を有珠山に適用させて考えてみる。最近3回の噴火に限れば、噴火様式はいずれも異なる上に噴出物量は $4 \times 10^5 \sim 9 \times 10^7 \text{m}^3$ と幅があるが、関与したマグマ量はいずれも $1 \times 10^8 \text{m}^3$ と同程度の規模である (中田・他, 2001)。マグマ貫入量が同じでも噴火様式 (噴出物量) が異なる理由として、マグマの貫入速度の違いが関係している可能性があるかもしれない。

6章で指摘した通り、2021年FESに伴い小規模なマグマ貫入が生じていた可能性が考えられる。4.3節で述べたように、2000年PESと2021年FESの地震波エネルギー放出率の時間発展は初期段階においては後者の方が高かったが、16時間程度経過後は後者の方が大きく経過した (Fig. 9)。White and McCausland (2016) の考え方に基づき、マグマ貫入量が地震波エネルギー放出量の総和と比例すると仮定すると、エネルギー放出率はマグマ貫入速度を示すことになる。以上の考え方に基づいて2021年FESを解釈すれば、初期段階に

おけるマグマ貫入速度は 2000 年噴火のそれを上回る程度であったが、継続時間が短く貫入速度が大きくならなかったため噴火には至らなかった可能性が考えられる。

火山監視の現場にマグマ貫入速度を用いた活動予測手法を導入するには、過去の地殻変動データの検証及び地殻変動データを用いたマグマ貫入速度のリアルタイム推定を行う監視体制が必要である。しかし前者については、有珠山では過去の噴火前兆段階の地殻変動データが乏しく、実施は難しい。後者についても地殻変動観測点の増設及び過去事例の検証を踏まえた圧力源モデルの精緻化やシステム開発が必要であり、実現は容易ではない。

以上の課題を踏まえると、マグマ貫入速度を地殻変動データから直接的に監視する項目を判定基準に取り入れることは難しいと考えられる。その一方で、4.3 節で述べたように活動推移予測にエネルギー放出率を経験則として活用することは十分に可能であると考える。

上記の考え方にに基づき、新判定基準にはエネルギー放出率に着目した判定項目を追加した。今後は事例の蓄積と検証による経験則の検証と高度化を行うほか、将来的にはマグマ貫入速度を直接的に監視する手法の開発を目指す必要がある。

7.4 M を用いた現地有感判断指標の導入

過去の噴火経験に基づき、有感地震が発生した場合には噴火発生に繋がる可能性が高いとの考え方が有珠山の地元で受け入れられており、事前避難のために現地有感の早期覚知が重要視されている（有珠山火山防災協議会, 2021）。こうした背景から、旧判定基準には有感地震発生の有無及びその発生回数が判断指標として設定されていた。その一方、有感地震そのものが体感に基づくことや、時間帯や地盤の違いにも左右されることから即時把握や緊急対応への活用は現実的に難しい。そのため、旧判定基準では有感地震判断のための具体的な数値指標は明示されていなかった。

2021 年 FES の際には、Appendix 1-2 に示したように現地有感の通報があった。有珠山では山頂から 4.5～8km の範囲に 4 点の震度計が設置されているが（Fig. 1(b)）、いずれの震度観測点でも震度 1 以上は観測されなかった。居住地が広がる北側山麓には震度計が配置されていないため、通報内容の真偽は不明である。現

地有感の通報を札幌管区気象台が把握したのは、当該地震の発生から約 11 時間後である（Appendix 2）。1977 年噴火では、最初の現地有感地震発生から約 30 時間程度で噴火が発生しており（曾屋・他, 2007）、現地有感となる地震の発生を即座に判断できる手法は必要不可欠である。本論では、2000 年 PES の M_j と北側山麓に設置された震度計の関係から、現地有感に相当する地震の最小 M について検討を行った。

2000 年 PES の M_j と計測震度の関係については宮村・他（2003）が検証を行っている。しかし、当時と現在では M_j の算出方法が異なっており、彼らの結果をそのまま活用することはできない。そこで、改めて舟崎（2004）の手法による現在の M_j と計測震度との比較を行った。現地有感の指標として、SOB（Fig.1(b)）で観測された計測震度データを使用した。ただし、SOB の運用開始は 3 月 28 日 19 時のため、それ以前のデータが無いことに注意が必要である。

Fig. 13 に M_j と SOB の計測震度の関係を示す。2000 年 PES の震源分布は 3 月 29 日 18 時以降に南側山麓に大きく拡大したため（Oshima and Ui, 2003）、その前後でシンボルを変えている。 M_j と計測震度に比例関係が認められるが、震源分布が山頂火口原直下に限定されていた 3 月 29 日 18 時以前の方がより明瞭な比例関係を示している。29 日 18 時以前に震度 1 以上を観測した地震の最小規模は $M_j 1.3$ となる。なお、最初の現地有感の通報は 28 日 01 時 31 分（宮村・他, 2003）で、

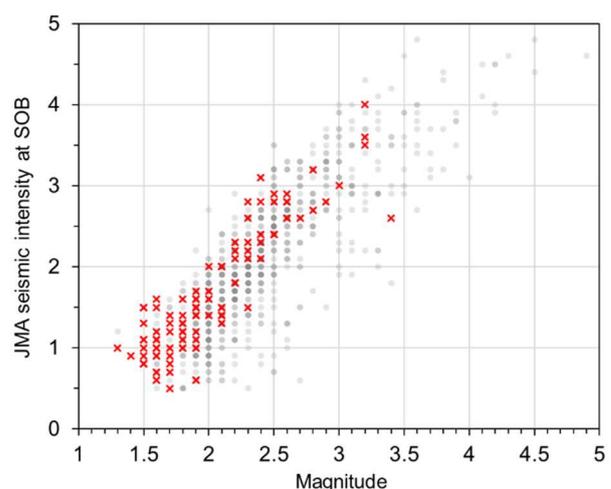


Fig. 13 Relationship in the 2000 PES data between M_j and JMA seismic intensity at SOB. Red crosses and grey dots indicate earthquakes before and after 3/29 6 p.m., respectively.

この地震の M は $M_j1.6$ である。2021 年 FES では最大 $M_j1.4$ が 3 回観測されているが、前述の通り現地有感の真偽は明らかではない。

以上のことから、深部領域で発生した地震については、山体近傍で現地有感となり得る最小 M_j の範囲は 1.3~1.6 であると考えられる。これに基づき、新判定基準では $M_j1.5$ 以上を有感地震相当と判断するための具体的な数値指標として用いることとした。 M_j の活用によって、旧判定基準に比べて迅速かつ定量的な運用が実現すると考えられる。

7.5 噴火未遂の想定の必要性

3 章で述べた通り、有珠山では噴火が後続しない FES が A4 観測点の運用を開始した 1991 年以降で少なくとも 4 回発生していたことが明らかとなった。火山防災協議会による有珠山火山避難計画（有珠山火山防災協議会，2021）及び旧判定基準（気象庁，2020a）では、FES の発生は想定されていない。これは有珠山が、地震が多発した際には必ず噴火が発生する「ウソをつかない山」として認識されている（有珠山火山防災協議会，2021）ことが背景にあると考えられる。この考え方の根底には噴火直前の激しい地震活動が広く認識されていることと対照的に、有珠山で発生する FES が火山観測関係者でさえほとんど認識されていなかったことや、非活動期における地震活動が非常に低調で注目されてこなかったことが関係していると推察される。

2021 年 FES では、前節で述べたように有感地震が発生した可能性もあった。今後は有珠山でも有感地震の発生を伴う FES が起こり得ると考えるべきであり、いわゆる「噴火未遂」を噴火警戒レベルの想定に加える必要があると考える。新判定基準の解説では、そのような考え方に基づいて 2021 年 FES に関する記述を追加した。今後は、地元住民や地元自治体への普及・啓発も重要であると考えられる。

8 まとめ

有珠山で 2021 年 3 月に発生した FES を契機に、過去約 30 年間の地震観測データを用いて FES の発生状況及び PES との比較検討を行った。得られた結果と各事例の活動推移及び事例同士の対比から、以下のことが明らかになった。

i 有珠山では FES の存在があまり知られていなかった

が、2000 年噴火以降では 2021 年 FES を含め 3 回の深部領域における FES が発生していた。これらの事例の発生深度はそれぞれ異なり、規模や回数は 2021 年 FES が最大、2010 年 FES が最小であった。2000 年噴火以前では発生規模は不明であるが少なくとも 1 回の FES（1995 年 1 月）が深部領域で発生していた可能性が高い。

- ii 震源の深さと A4 観測点における S-P 時間の関係を活用して深部領域の地震を抽出し、深部領域における 2000 年噴火前の地震活動度の時間変化を調べた。その結果、2000 年噴火の約 2 年前から活動度が上昇していたことが明らかになった。これは、噴火の長期的前兆現象であった可能性がある。
- iii PES と FES では、積算回数及び地震波エネルギー放出量の時間発展や最大振幅別累積頻度分布に差異がみられた。これらのマグマ上昇に伴う地震活動の特徴は、噴火発生 of 短期予測のための定量的指標として活用できる可能性がある。
- iv 活動様式が全く異なる過去の 3 事例毎の概念モデルを提案した。引き続き観測事例や研究成果を蓄積し、概念モデルの精緻化を図る必要がある。
- v 2000 年 PES の M_j と計測震度の比較検討により、現地有感地震の最小 M は $M_j1.3\sim1.6$ と推定された。 M_j の活用により、現地有感相当の地震発生を迅速に判断することが可能になったと考えられる。

有珠山の旧判定基準は過去の経験則に基づき設定したものであり、判定項目の多くは定性的な表現であった。そうした課題を踏まえて、今回得られた知見を基に判定基準の改定を行い、2023 年 11 月 6 日に新判定基準を公表した。

謝辞

本論は有珠山において半世紀以上に渡って観測されたデータを使用しました。長年の観測及び資料収集に携わってこられた多くの気象庁職員及び関係者の多大なる努力に敬意を表します。執筆に際して、気象庁関係者の皆様には有益な議論を戴きました。査読者の気象庁気象研究所の鬼澤真也博士及び気象庁地震火山部の中村政道氏の指摘により本稿は大きく改善されました。作図には、GMT (Wessel et al., 2013) を利用しました。記して感謝いたします。

文献

- 青山裕 (2022): 北海道の活火山における減災に向けた観測研究の取り組み—物理観測と物質科学の今後の連携を見据えて—, 火山, **67**, 171-193.
- 井口正人・為栗健・平林順一・中道治久 (2019): マグマ貫入速度による桜島火山における噴火事象分岐論理, 火山, **64**, 33-51.
- 石本巳四雄・飯田汲事 (1939): 微動計による地震観測(一), : 地震動の大きさ, 空間的分布, 東京帝國大學地震研究所彙報, **17**, 443-478.
- 有珠山火山防災協議会 (2021): 有珠山火山避難計画, <http://www.city.date.hokkaido.jp/hotnews/detail/00000601.html> (参照 2023-12-01).
- 宇津徳治 (2001): 5 章 地震動の強さと地震の大きさ, 地震学, **3**, 121-152.
- 大野謙・小倉士郎・灰野博三・斉藤康永・世並博之・須賀盛典・清野政明 (1980): 噴火直前及び噴火時の状況, 有珠山噴火活動調査報告 (1977 年 8 月~1978 年 12 月), 気象庁技術報告, 第 99 号, 27-32.
- 鍵山恒臣 (1993): 噴火予知のための地熱観測—地熱観測に未来はあるか—, 月刊地球, 号外 7, 99-106.
- 火山噴火予知連絡会火山情報の提供に関する検討会 (2015): 火山情報の提供に関する報告, https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/kentokai/yo-chiren_joho_houkoku150326.pdf, (参照 2023-12-01).
- 勝井義雄・横山泉・岡田弘・大島弘光 (1987): 十勝岳火山地質・噴火史・活動の現況および報歳対策 補遺, 北海道における火山に関する研究報告書, 第 11 編, 77-81.
- 気象庁 (1995): 第 68 回火山噴火予知連絡会議事録, 火山噴火予知連絡会会報, **62**, 69-71, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/Report/062/kaiho_062_27.pdf, (参照 2023-12-01).
- 気象庁 (1996): 第 72 回火山噴火予知連絡会議事録, 火山噴火予知連絡会会報, **66**, 127-135, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/Report/066/kaiho_066_34.pdf, (参照 2023-12-01).
- 気象庁 (1999): 第 79 回火山噴火予知連絡会・全国の火山活動 (平成 10 年 6 月~10 月), 火山噴火予知連絡会会報, **72**, 144-145, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/Report/072/kaiho_072_36.pdf, (参照 2023-12-01).
- 気象庁 (2020a): 有珠山の噴火警戒レベル判定基準, https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/STOCK/level_kijunn/old/112_level_kijunn_20200309.pdf, (参照 2023-12-01).
- 気象庁 (2020b): 有珠山の噴火警戒レベルの改定及び噴火警戒レベル判定基準の公表について, <https://www.jma.go.jp/jma/press/2003/05a/usuzan200305.pdf>, (参照 2023-12-01).
- 気象庁 (2021): 第 148 回火山噴火予知連絡会, その 2 の 7, 3-6, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/148/148_2-7.pdf, (参照 2023-12-01).
- 気象庁 (2023a): 有珠山の噴火警戒レベル判定基準, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/level_kijunn/112_level_kijunn.pdf, (参照 2023-12-01).
- 気象庁 (2023b): 有珠山の噴火警戒レベルの判定基準の改定について, https://www.jma.go.jp/jma/press/2311/06a/usuzan_20231106.html, (参照 2023-12-01).
- 鈴木貞臣・山下済・渡辺秀文・岡田弘・西田泰典 (1980): 1977 年有珠山噴火直前に発生した火山性地震の震源, 火山, **25**, 181-193.
- 曾屋龍典・勝井義雄・新井田清信・堺機久子, 東宮昭彦 (2007): 有珠山火山地質図 (第 2 版), 火山地質図 2, 産業技術総合研究所.
- 中禮正明・小林昭夫 (2000): 2000 年有珠山噴火に伴う北海道南西部の地殻変動, 日本火山学会講演予稿集, P-52.
- 東宮昭彦・宮城磯治 (2002): 有珠火山 2000 年 3 月 31 日噴火の噴出物とマグマプロセス, 火山, **47**, 663-673.
- 中田節也 (2001): 有珠山 2000 年噴火の推移, 東京大學地震研究所彙報, **76**, 203-214.
- 中田節也 (2016): 噴火シナリオと確率論的予測, 火山, **61**, 199-209.
- 人見豊・新山亮二・佐藤多佳夫・川合亜紀夫 (2003): 長期的な変動, 平成 12 年 (2000 年) 有珠山噴火調査報告, 気象庁技術報告, 第 124 号, 16-26.
- 舟崎淳 (2004): 気象庁マグニチュードの改訂について, 験震時報, **64**, 11-20.
- 古屋正人・大木裕子・大久保修平・前川徳光・大島弘光・清水洋 (2001): 有珠山 2000 年噴火活動に対する緊急重力測定—絶対重力観測網の構築と噴火前後の重力変化—, 東京大學地震研究所彙報, **72**, 237-246.
- 北海道大学大学院理学研究科付属地震火山研究観測センター有珠火山観測所 (1998): 第 79 回火山噴火予知連絡会資料.
- 北海道大学理学部 (1995): 第 68 回火山噴火予知連絡会資

- 料.
- 北海道大学理学部 (1996): 第 72 回火山噴火予知連絡会資料.
- 防災科学技術研究所 (2021): 第 148 回火山噴火予知連絡会, その 2 の 7, 12-19, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/148/148_2-7.pdf, (参照 2023-12-01).
- 宮村淳一・伏谷裕二・松島功・佐藤十一・後藤久志・谷口貴康・谷口正実 (2003): 噴火直前に観測された現象, 平成 12 年 (2000 年) 有珠山噴火調査報告, 気象庁技術報告, 第 124 号, 16-26.
- 村上亮 (2021): 測地データに見る有珠山の噴火時収縮と噴火間膨張の反復, 日本火山学会講演予稿集, A1-9.
- 森濟 (2007): 20 世紀の有珠火山噴火後の地殻変動と中長期的前兆地殻変動の特性, 北海道大学博士論文.
- 森濟・宇井忠英 (2000): 2000 年有珠山噴火の地殻変動と噴火活動について, 自然災害科学, **19**, 383-390.
- 山里平・舟崎淳・高木康伸 (2013): 気象庁の火山防災業務, 防災科学技術研究所研究資料, 第 380 号, 9-15.
- 吉田邦一・笹谷努・一柳昌義・大島弘光・田村慎 (2002): 2000 年有珠山噴火活動に伴う低周波地震, 火山, **47**, 507-519.
- 渡辺秀文 (1998): 伊豆大島火山 1986 年噴火の前兆過程とマグマ供給システム, 火山, **43**, 271-282.
- Aoyama, H., S. Onizawa, T. Kobayashi, T. Tameguri, T. Hashimoto, H. Oshima and H. Y. Mori (2009): Inter-eruptive volcanism at Usu volcano: Micro-earthquakes and dome subsidence, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **187**, 203-217.
- Asada, T., Z. Suzuki and Y. Tomoda (1951): Note on Energy and Frequency of Earthquakes, *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, **29**, 289-293.
- Goto, Y., T. Danhara and A. Tomiya (2019): Catastrophic sector collapse at Usu volcano, Hokkaido, Japan: failure of a young edifice built on soft substratum, *Bulletin of Volcanology*, **81**.
- Gutenberg, B. and C. F. Richter (1944): Frequency of earthquakes in California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **34**, 185-188.
- Hirata, N. and M. Matsu'ura (1987): Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **47**, 50-61.
- Matsumoto, A. and M. Nakagawa (2010): Formation and evolution of silicic magma plumbing system: Petrology of the volcanic rocks of Usu volcano, Hokkaido, Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **196**, 185-207.
- Matsumoto, A. and M. Nakagawa (2019): Reconstruction of the eruptive history of Usu volcano, Hokkaido, Japan, inferred from petrological correlation between tephra and dome lavas, *Island Arc*, **28**.
- Nakagawa, M., A. Matsumoto and M. Yoshizawa (2022): Re-investigation of the sector collapse timing of Usu volcano, Japan, inferred from reworked ash deposits caused by debris avalanche, *Frontiers in Earth Science*, **10**.
- Nakada, S., M. Nagai, T. Kaneko, Y. Suzuki and F. Maeno (2013): The outline of the 2011 eruption at Shinmoe-dake (Kirishima), *Earth Planets Space*, **65**, 475-488.
- Onizawa, S., H. Oshima, H. Aoyama, H. Y. Mori, T. Maekawa, A. Suzuki, T. Tsutsui, N. Matsuwo, J. Oikawa, T. Ohminato, K. Yamamoto, T. Mori, T. Taira, H. Miyamachi and Hm. Okada (2007): P-wave velocity structure of Usu volcano: Implication of structural controls on magma movements and eruption locations, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **160**, 175-194.
- Oshima, H. and T. Ui (2003): The 2000 eruption of Usu volcano. Reports on volcanic activities and volcanological studies in Japan for the period from 1999 to 2002, 22-31.
- Shibata, T. and F. Akita (2001): Precursory changes in well water level prior to the March, 2000 eruption of Usu volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 1799-1802.
- Tomiya, A. and E. Takahashi (2005): Evolution of the magma chamber beneath Usu volcano since 1663: A natural laboratory for observing changing phenocryst compositions and textures, *Journal of Petrology*, **46**, 2395-2426.
- Tomiya, A., E. Takahashi, N. Furukawa and T. Suzuki (2010): Depth and Evolution of a Silicic Magma Chamber: Melting Experiments on a Low-K Rhyolite from Usu Volcano, Japan, *Journal of Petrology*, **51**, 1333-1354.
- Wang, X. and Y. Aoki (2019): Post-eruptive Thermoelastic Deflation of Intruded Magma in Usu Volcano, Japan, 1992-2017, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **124**, 335-357.
- Wessel, P., W. H.F. Smith, R. Scharroo, J. Luis and F. Wobbe (2013): Generic Mapping Tools: Improved Version Released, *EOS Trans. AGU*, **94**, 409-410.
- White, R., and W. McCausland (2016): Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes

and forecasting eruptions, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **309**, 139-155.

Yamamoto, M., H. Kawakatsu, K. Yomogida and J. Koyama (2002): Long-period (12 sec) volcanic tremor observed at Usu 2000 eruption: Seismological detection of a deep magma plumbing system, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 43-1-43-4.

Yokoyama, I. (1985): Volcanic processes revealed by geophysical observations of the 1977–1982 activity of USU volcano, Japan, *Journal of Geodynamics*, **3**, 351-367.

Yokoyama, I. and M. Seino (2000): Geophysical comparison of the three eruptions in the 20th century of Usu volcano, Japan, *Earth Planets Space*, **52**, 73–89.

(編集担当 谷口 正実)

Appendix 1 2021 年 FES に関する札幌管区気象台の対応

噴火警戒レベル 2 引上げ基準の「火山性地震が 1 時間当たり 10 回以上」は観測されたが、「地震回数の加速度的な増加」が認められなかったことから、札幌管区気象台は噴火警報の発表は行わなかった。しかし 2000 年噴火以降、有珠山で臨時に情報発表を行ったのは 2021 年 FES が初めてである。将来の噴火対応に備えるため、今回の事例への対応を記録に残しておくことは重要と考える。以下では、札幌管区気象台による情報発表及び関係機関との対応についてまとめる。

1. 情報発表

2021 年 FES に関して、札幌管区気象台は 3 月 9 日から 3 月 12 日にかけて「火山の状況に関する解説情報」（以下、解説情報）を 5 回発表した（うち 1 回は発表した情報の内容訂正に関する情報）。Appendix 2 に発表した情報種別と発表時刻を時系列にまとめる。

最初に 3 月 9 日 15 時 30 分に、15 時までの活動状況を基に解説情報（第 1 号）を、同解説情報を補うために図を掲載した「火山活動解説資料（臨時）」（以下、解説資料（臨時））を 16 時 15 分に発表した。これらの情報は、深部領域で地震の数が増加しているものの 2015 年 FES や 2000 年 PES に比べると少なく経過していることを伝える内容であった。有珠山で解説情報及び解説資料（臨時）の発表を行ったのは運用開始以降では、これがそれぞれ初めてのことであった。

その後、3 月 10 日 11 時 30 分の解説情報（第 2 号）、一部訂正のための 11 時 42 分の解説情報（第 3 号）及び 12 時 30 分の解説資料（臨時）の情報発表を行った。振幅の大きな地震の発生が見られるものの回数に加速度的な増加は見られず 2000 年噴火前兆地震との違いを明示する内容であった。前日から観測されているわずかな傾斜変動についても示した。なお、解説情報（第 2 号）の発表時刻について、解説情報（第 1 号）では 10 日 16 時と予告していた。しかし、9 日夕方以降、傾斜変動や振幅の大きな地震も発生したことから活動状況を早めに伝える必要があると判断し、10 日午前中の発表へと変更した。その後については地震活動が静穏に経過していることを伝える目的で、3 月 11 日 11 時 20 分と翌 12 日 16 時 15 分にそれぞれ解説情報（第 4 号及び第 5 号）を発表した。なお、解説情報（第 5 号）には後述の機動観測を行った結果を掲載した。

2. 関係機関との対応

関係機関との対応に関する時系列を Appendix 2 にまとめた。その中で特記すべき内容を以下で取り上げる。

9 日及び 10 日の解説情報発表後に室蘭地方気象台と共同で地元関係機関（地方自治体等）との WEB 会議を実施した。9 日 16 時 45 分から実施した WEB 会議ではその時点までの活動状況について解説資料に基づいて説明を行った。地元自治体からは今後の見通しや情報発表の可能性に関する質問があった。気象台からは噴火警戒レベル 2 引上げの基準である「地震回数の加速度的な増加」が認められた場合には解説情報（臨時）発表やレベル 2 への引上げの可能性もあると回答した。その他、各機関の対応や夜間における情報共有体制について情報交換を行った。翌 10 日 13 時 00 分からの WEB 会議では、傾斜変動に関する質問として「どの程度の変動が見られれば危険な状況と認識すればよいのか」といった質問があった。これに対して「山麓の観測点で捉えられたわずかな傾斜変動は現時点では収まっている。2000 年の噴火前には地面上に大きな亀裂が現れた。このような顕著な地殻変動が現れると危険と考えられる。」と回答した。今後、警戒を要する期間についても質問があり、1 週間程度は様子見が必要である旨を回答した。その他、情報共有に関する意識合わせを行った。地元住民からの問い合わせ状況についても情報共有を行い、特段問題やトラブルが発生していないことを確認した。

有珠山の地元住民は、噴火前に有感地震が多発することを十分認識している。このような背景から、地元役場を通して地震で揺れを感じたとの通報が住民から寄せられた。有珠山周辺では 4 箇所に震度計が設置されているが、今回の FES ではそれらの震度計で震度 1 以上を観測する地震はなかった。札幌管区気象台では、通報者以外に現地で揺れを確認した人がいないか室蘭地方気象台を通じて地元関係機関に聞き取り調査を行い、通報者以外に揺れを感じた報告は無かったことを確認した。仮に揺れを感じたとの報告が複数報告された場合にはその内容を盛り込んだ情報発表を行う方針であった。なお現地有感の聞き取り調査自体については有珠山に限らず他の火山で規模が大きめの地震が発生した際には、通常行う業務の 1 つである。

12 日には札幌管区気象台から 4 名を派遣して、機動観測及び地元自治体への解説を実施した。これは、前

日の 17 時 59 分に低周波成分を含んだ、規模が大きめの地震が発生したためである (Fig. S1)。震源は各観測点の P 波到着時間差や最大振幅比から浅部領域の地震と推測された。1977 年噴火や 2000 年噴火では噴火直前には低周波地震が発生した背景を踏まえての対応であった。機動観測の内容は目視観測及び赤外熱映像観測装置による地表面温度観測であった。観測の結果、熱活動の活発化を示すような噴気活動の増加や融雪域の広がり確認されなかった。調査後、機動観測班は室蘭地方気象台同行のもと壮瞥町、洞爺湖町および伊達市に活動状況と機動観測結果の説明を行った。

Appendix 2 2021 年 FES に関する経過

3 月 8 日

16 時頃 最大振幅が検測基準未満の地震が発生し始める。

3 月 9 日

09 時 55 分 最大振幅が検測基準以上の地震が発生。
 13 時 15 分 解説情報準備および解説資料作成準備開始。
 13 時 56 分 機動観測班出動準備完了。
 14 時 10 分 北海道庁（以下、道庁）に現状説明。
 14 時 34 分 北海道警察本部（以下、道警）から現在の状況について照会。
 14 時 40 分 北海道開発局（以下、開発局）に現在の状況共有。
 14 時 51 分 解説情報を 15 時 30 分発表予定で準備開始。
 14 時 56 分 開発局に情報共有。
 14 時 57 分 道警、道庁に情報共有。
 15 時 30 分 火山の状況に関する解説情報（第 1 号）発表。
 16 時 15 分 火山活動解説資料（臨時）発表。
 16 時 45 分 札幌管区気象台（以下、管区）・室蘭地方気象台（以下、地台）と地元関係機関との WEB 会議（活動解説、防災対応等の確認）。

3 月 10 日

08 時ごろ 解説情報を 11 時 30 分発表予定で準備開始。
 09 時 00 分 前日 22 時台の地震と当日 01 時台の地震

について、それぞれ洞爺湖町及び壮瞥町役場が現地で揺れを感じた旨の通報を受領したとの連絡を地台経由で管区が把握。地台は地元消防等への聞き取り調査を実施。

09 時 30 分 道庁、道警、開発局へ情報発表の事前連絡。
 11 時 00 分 現地有感の扱いについて管区で協議し、現状ではそれぞれ 1 件の通報のみのため、現在行っている聞き取り調査で信憑性の高い情報が得られれば、後続の情報発表で対応する方針を確認。
 11 時 20 分 地台から聞き取り調査結果を受領。洞爺湖町、壮瞥町の消防署や警察署等の機関ではいずれも現地で揺れを感じたとの情報はなし。昨夜は風も強かったとの情報もあり。有感地震の通報について信憑性は不明と判断。
 11 時 28 分 道庁、道警、開発局に情報発表の事前連絡。
 11 時 30 分 火山の状況に関する解説情報発表（第 2 号）。
 11 時 45 分 火山の状況に関する解説情報発表（第 3 号、訂正報）。
 12 時 30 分 火山活動解説資料（臨時）発表。
 13 時 00 分 管区・地台と地元関係機関との WEB 会議（活動解説、防災対応等の確認）。
 23 時 12 分 以降、山頂火口原やや深い領域では地震発生なし。
 3 月 11 日
 10 時 48 分 （同 50 分にも）浅部領域で発生したと推定される振幅の大きな地震発生 (Fig. S1)。地台に現地有感か聞き取りを依頼（11 時 10 分に現地有感の情報なしの連絡受領）。
 11 時 16 分 道警、開発局へ情報の事前連絡。（道庁つながらず）。
 11 時 20 分 火山の状況に関する解説情報（第 4 号）発表。
 11 時 23 分 道庁に連絡。
 17 時 59 分 浅部領域で発生したと推定される波形に低周波成分を含む振幅の大きな地震が発生 (Fig. S1)。

3 月 12 日

- 10 時 40 分 専門家（気象庁参与）と昨日 17 時 59 分の地震の見立てについて意見交換。ノイズではなく山頂の北屏風観測点近傍の浅い LF（低周波）気味の地震の可能性が高い、との認識で一致。地元自治体も気にしているようなので、現地の状況確認（噴気、融雪域、源泉の変化等）と情報収集の実施について検討。
- 11 時 20 分 地台へ洞爺湖町と壮瞥町の温泉組合に源泉の変化の有無について聞き取り調査を依頼（12 時 10 分に変化なしの連絡受領）。
- 12 時 30 分 管区と地台との TV 会議（機動観測の内容、出張者・行程等の確認）。
- 13 時 00 分 有珠山へ機動観測班（以下、機動班）出発。
- 15 時 00 分 機動班現地着、調査開始。
- 15 時 50 分 機動班より観測結果連絡（噴気や融雪域の広がりや特段の変化がない事を確認）。
- 16 時 00 分 機動班が観測結果について壮瞥町に説明（地台同行）。
- 16 時 15 分 火山の状況に関する解説情報（第 5 号）発表。
- 16 時 30 分 機動班が観測結果について洞爺湖町に説明（地台同行）。
- 17 時 00 分 機動班が観測結果について伊達市に説明（地台同行）。

取り調査を行い聞き取りが出来た範囲では、揺れを感じたり音を聞いたりした情報はなかった。壮瞥町、伊達市、洞爺湖町の防災担当にも情報共有。

3 月 13 日

- 11 時 54 分 山頂火口原浅部で M_j 1.5 の地震発生。
- 13 時 21 分 地台防災管理官より各自治体の担当者へ 11 時 54 分の地震について情報共有を行う。
- 17 時 21 分 地台から管区へ現地有感の情報を得た旨情報共有。
- 17 時 35 分 火山センター所長から現地聞き取りについて地台と協力して進める準備を行うよう指示。
- 17 時 54 分 地台と TV 会議接続。地台防災管理官より、地台の現業で聞き取り調査を行い、その結果を共有する旨の連絡あり。
- 18 時 23 分 TV 会議で地台から結果の連絡あり。聞き

Appendix 3 有珠山噴火警戒レベル新旧判定基準の比較

レベル	判定基準表		判定基準改定のポイント 括弧内：本論中の対応する節 1-7)：基準改定に合わせて判定基準の解説に記述
	改定前	改定後 下線部分：主な改定箇所 上付き数字 1-3)：右欄を参照	
5 への 引上げ	<p>【噴火が切迫】 次のいずれかの現象が観測された場合.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・体に感じる地震が多発（1 時間あたり 10 回以上）. ・有珠山または山麓で目に見える地形変化が発現. <p>【噴火が発生】 山頂または山麓で噴火が発生し、居住地に被害が及ぶと判断した場合.</p>	<p>【噴火が切迫】 次のいずれかの現象が観測された場合.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・<u>体に感じる地震¹⁾</u>が多発する（1 時間あたり 10 回以上）等、<u>地震活動の急激な活発化²⁾</u>. ・山体または山麓で目に見える地形変化が発現. <p>【噴火が発生】 山頂または山麓で噴火が発生し、居住地域に被害が及ぶと判断した場合.</p>	<p>1) M を用いた現地有感判断指標の導入（詳細は 7.4 節） 2000 年噴火事例で得られた計測震度と M_j の関係に基づき、M_j による現地有感判断のための数値指標を導入した.</p> <p>2) 地震波エネルギー放出率の活用（詳細は 7.3 節） 過去事例から得られた地震波エネルギー放出率による活動推移判断の経験則を、地震活動の活発化または低下を示す定量的指標として導入した.</p> <p>3) 地震の発生領域 地震の発生領域を明記した。本論中の「深部領域」に対応する.</p>
4 への 引上げ	<p>【噴火の可能性の高まり】 規模の小さな火山性地震が多発している状況で、次のいずれかの現象が観測された場合.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・体に感じる地震が発生. ・有珠山または山麓を隆起中心とする膨張性の地殻変動を検出. 	<p>【噴火の可能性の高まり】 <u>やや深い領域³⁾</u>で規模の小さな火山性地震が多発している状況で、次のいずれかの現象が観測された場合.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・<u>体に感じる地震¹⁾</u>が発生する等、<u>地震活動のさらなる活発化²⁾</u>. ・山体を隆起中心とする膨張性の地殻変動を検出. 	<p>4) 概念モデルの導入（詳細は 7.2 節） 概念モデルを提示し、活動推移判断での活用の考え方を導入した.</p> <p>5) 傾斜計データの活用 レベル 4 引上げの判定項目に傾斜計データを用いた定量的指標を導入した.</p> <p>6) 噴火未遂の想定必要性（詳細は 7.5 節） 旧判定基準の精査・公表後に発生した 2021 年 FES に関する記述を追加し、想定必要性を説明した.</p>
1 への 引下げ	<p>やや深い領域（深さ 2km 以深）における規模の小さな火山性地震が統発しなくなり、概ね 1 週間の経過観察を経ても再度の火山性地震増加が認められない場合は、レベルを引き下げる.</p>	<p><u>やや深い領域³⁾</u>で規模の小さな火山性地震が統発しなくなり、<u>地震活動が低下²⁾</u>して概ね 1 日経過後も再度の火山性地震増加が認められない場合は、レベルを引き下げる.</p>	<p>7) 参考文献リストの追加 判定基準の解説の巻末に基準設定にあたり使用した参考文献リストを追加した.</p>

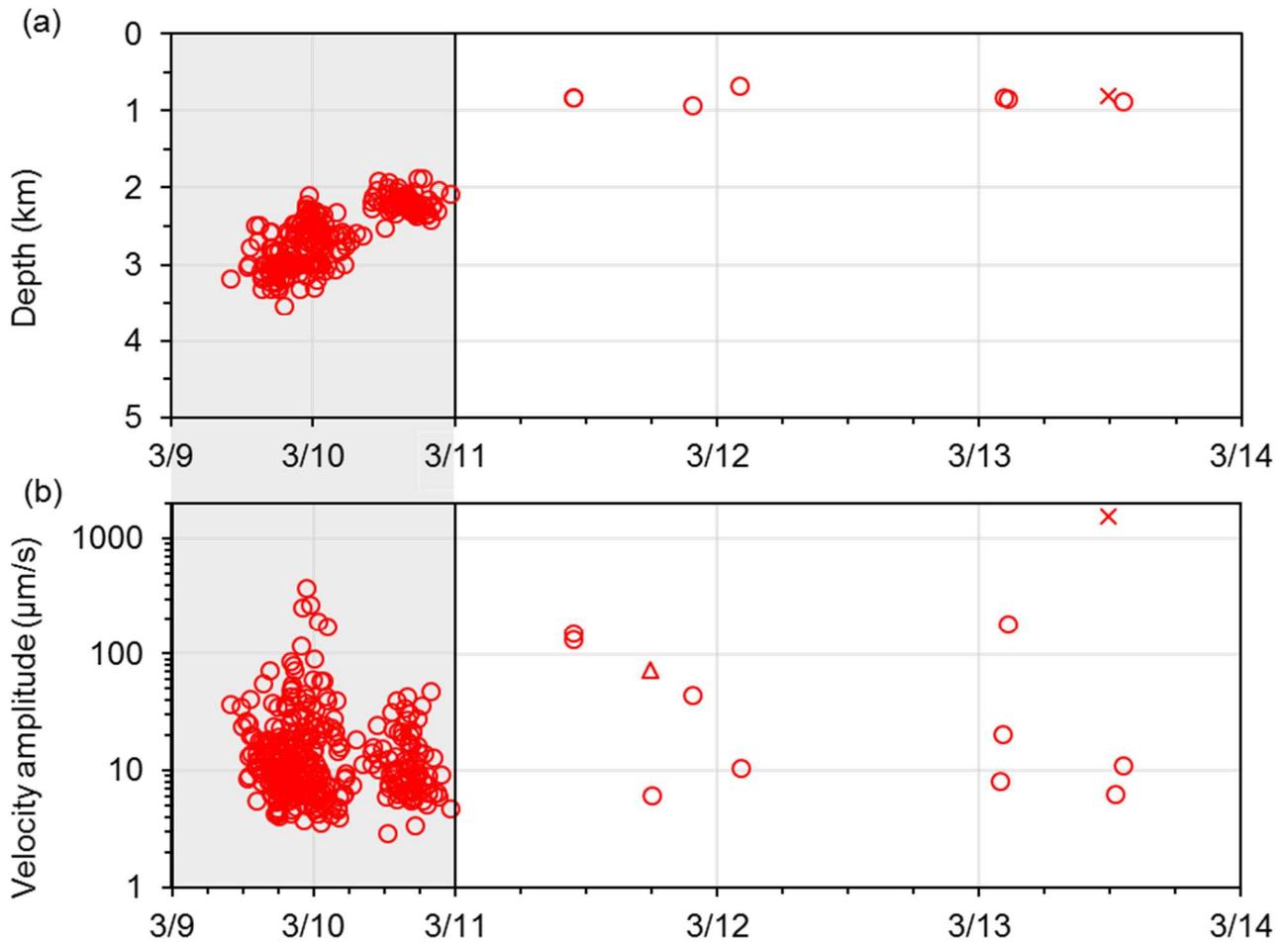


Fig. S1 Hypocenter depths and amplitudes from 2021 FES data. Red cross and triangle indicate the $M_j = 1.5$ and lower-frequency earthquakes, respectively. Other symbols correspond to those in Fig. 5.