

平成 20 年 6 月 9 日運用開始
令和 5 年 11 月 6 日現在
気 象 庁

有珠山の噴火警戒レベル判定基準とその解説

目 次

1	想定する噴火の規模・様式、噴火場所、火山現象と影響範囲	・・・	2
1-1	過去の噴火実績（規模・様式、場所、伴う火山現象）	・・・	2
1-2	想定する噴火と影響範囲	・・・	2
2	火山活動の時間的な推移	・・・	4
2-1	火山活動の概念モデル	・・・	4
2-2	噴火活動の推移	・・・	7
3	噴火警戒レベルの区分け	・・・	7
4	噴火警戒レベルの判定基準とその考え方	・・・	8
4-1	判定基準設定の考え方と活用するデータ	・・・	8
4-2	各レベル判定基準の詳細	・・・	10
5	改善経緯と今後の課題	・・・	20
	参考文献	・・・	21

1 想定する噴火の規模・様式、噴火場所、火山現象と影響範囲

1-1 過去の噴火実績（規模・様式、場所、伴う火山現象）

有珠山の活動は1万8千～1万9千年前に始まり、洞爺カルデラの南壁で玄武岩質マグマの噴火が繰り返され、成層火山が形成された（Goto et al., 2013）。約8000年前には山頂部が大きく崩壊して南側に岩屑なだれ（善光寺岩屑なだれ）が流下した（Nakagawa et al., 2022）。その後、長い休止期を経て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。

1663年の活動再開以降は数十年ごとに噴火を繰り返しており、古文書や地質調査、20世紀以降の観測記録から、これまでに9回の噴火が知られている。いずれの噴火もデイサイト質マグマの活動によって引き起こされているが、その発生場所は、山頂と山麓に大別され、噴火の様式、噴火に伴う火山現象、及び影響範囲は両者で異なる（表1）。

山頂噴火は軽石噴火（プリニー式噴火）で、山麓に多量の火砕物（軽石・火山灰等）が降下したほか、しばしば火砕流・火砕サージも流下している。山麓噴火はマグマ水蒸気噴火や水蒸気噴火となり、火口周辺への大きな噴石の飛散や火砕サージが発生している。どちらの噴火も、火山性地震を伴いながら火口開口域の地盤が著しく隆起して、新山（潜在ドーム・溶岩ドーム）を形成している。

詳しい記録が残されている20世紀中に発生した4回の噴火活動のうち、1910年、1943～45年、2000年の噴火活動は山麓で発生し、1977～82年の噴火活動¹は山頂で発生した。山頂噴火、山麓噴火のいずれの噴火活動でも以下のような類似点がある。

○噴火前の激しい火山性地震活動

1910年、1943～45年、1977～82年及び2000年の噴火活動では、噴火に先立ち、マグマの貫入²に伴って発生すると考えられる多数の火山性地震が観測されている。19世紀以前の噴火活動でも、噴火の前兆として体を感じる地震が多数発生したことが古文書に残されている。

○噴火前の著しい地殻変動及び新山（潜在ドーム・溶岩ドーム）の形成

有珠山では噴火前後で著しい地殻変動（地盤の隆起・地割れ等）が生じる。1663年以降の9回の噴火活動のうち1663年以外では、新山（潜在ドーム・溶岩ドーム）の形成が確認されている（Matsumoto and Nakagawa, 2019）。

1-2 想定する噴火と影響範囲

将来の噴火活動も、図1に示す噴火の起こる可能性がある区域内（橙色破線域内）で山頂噴火または山麓噴火が発生し、表1に示す噴火に伴う火山現象とその影響範囲を想定する。

1 1977年8月に始まった噴火活動は1978年10月の噴火が最後だが、その後も新山（潜在ドーム）の形成や地盤の隆起を伴う地殻変動が1982年まで継続したことから、噴火活動期は1982年までとなり、本資料では「1977～78年の噴火活動」ではなく「1977～82年の噴火活動」と表記する。

2 マグマが岩盤を押し広げながら地下を上昇・移動すること。

表1 噴火場所による噴火様式、噴火に伴う火山現象、及びその影響範囲（横山・他（1973）、岡田・他（2002）による）

噴火場所	山頂	山麓
噴火様式	軽石噴火（プリニー式噴火） マグマ水蒸気噴火、水蒸気噴火を伴う場合あり	マグマ水蒸気噴火 水蒸気噴火
過去の噴火履歴	1663年、17世紀末頃、1769年、1822年、1853年、1977～82年	1910年、1943～45年、2000年
噴火に伴う火山現象とその影響範囲	<ul style="list-style-type: none"> 軽石の降下：山麓及び風下側の広範囲 大きな噴石の飛散：約2 km 以内 火砕流、火砕サージの流下：防災マップに示された到達範囲（図1、図2参照） 小さな噴石、火山灰の降下：風下側の広範囲 火山泥流（火口噴出型泥流、融雪型泥流）、降雨型泥流の流下：防災マップに示された範囲（図2参照） 地殻変動：新山（潜在ドーム・溶岩ドーム）周辺及び北麓を中心とした周辺地域 	<ul style="list-style-type: none"> 大きな噴石の飛散：約2 km 以内 火砕サージの流下：防災マップに示された到達範囲（図1、図2参照） 小さな噴石・火山灰の降下：風下側の広範囲 火山泥流（火口噴出型泥流、融雪型泥流）、降雨型泥流の流下：防災マップに示された範囲（図2参照） 地殻変動：新山（潜在ドーム・溶岩ドーム）を中心とした周辺地域

・下線は噴火に伴って発生し直ちに生命に危険を及ぼす火山現象を示す。これら以外の軽石・小さな噴石・火山灰の降下は、噴火警報で示す警戒が必要な範囲を越えて影響を及ぼす場合もあるので注意が必要である。



図1 噴火の起こる可能性がある区域及び噴火の影響を受ける可能性がある区域（有珠山噴火警戒レベルリーフレットより）



火口の位置によって危険区域は変わります!

山麓噴火はある限られた地域で起きるので、この危険区域全体が同じように危険だということを示しているわけではありません。火口の位置については事前に特定することが出来ないで**昭和**と**新山噴火**と同じくらい規模の**山麓噴火**が起こる可能性のある範囲の全域を結合して示してあります。実際の山麓噴火では、火口の位置によってこの図の**一部分が噴石や火砕サージの危険区域**となります。噴火がはじまった場合には、火口の位置にあわせた危険区域があらためて示されます。噴火の規模などによっても、危険区域の範囲は変わります。

<p>噴石・降灰</p> <p>火口から吹き出された噴石や火山灰による建物への被害(2009年噴火)</p>	<p>融雪泥流</p> <p>火口から周辺山麓斜面による建物などへの被害(2009年噴火)</p>	<p>火砕サージ</p> <p>道路に侵入する火砕サージ(1948年昭和23年噴火)</p>
<p>融雪型泥流(土石流)</p> <p>降り積もった火山灰が斜面によって泥流となつて流出(1978年7月噴火)</p>	<p>地盤変動</p> <p>噴火を契機として地盤が陥没した箇所(2009年噴火)</p>	<p>多数の火口</p> <p>多数の火口が同時に活動した(1910年噴火)</p>

図2 山頂噴火及び山麓噴火の危険区域予測図(有珠山火山防災マップより)

2 火山活動の時間的な推移

2-1 火山活動の概念モデル

図3に、これまでに蓄積された観測事実及び研究成果(Aoyama et al., 2009; Oshima and Ui, 2002; Onizawa et al., 2007; Tomiya et al., 2010; 中田, 2016; 森, 2007)に基づき、有珠山の地下構造に様々な火山現象を重ね合わせて描いたイメージ(概念モデル)を示す。以下では、有珠山の火山活動の概要について、図3(概念モデル)を用いて簡単に説明

する。ただし、実際の火山活動は概念モデルで描いた通りに進行するとは限らないことに十分留意する必要がある。

有珠山の地下には深さ 10km 前後の深部マグマだまりと深さ 4～6 km の浅部マグマだまりの存在が提案されている。浅部マグマだまりの上位には基盤岩等の各地層が浅い方ほど密度が小さくなる順に分布し、北側が浅くなるように傾斜していると推定されている。

非活動期には、20 世紀以降の噴火地点である山頂火口原や昭和新山等で弱い噴気及び地熱活動が続いているほか、過去の噴火で生じた新山（図 3 では貫入岩体³と記述）の冷却による長期的沈降とその周辺の浅い領域での定常的な地震活動がみられる。また、深部マグマだまりには定常的にマグマが蓄積されていると考えられている。

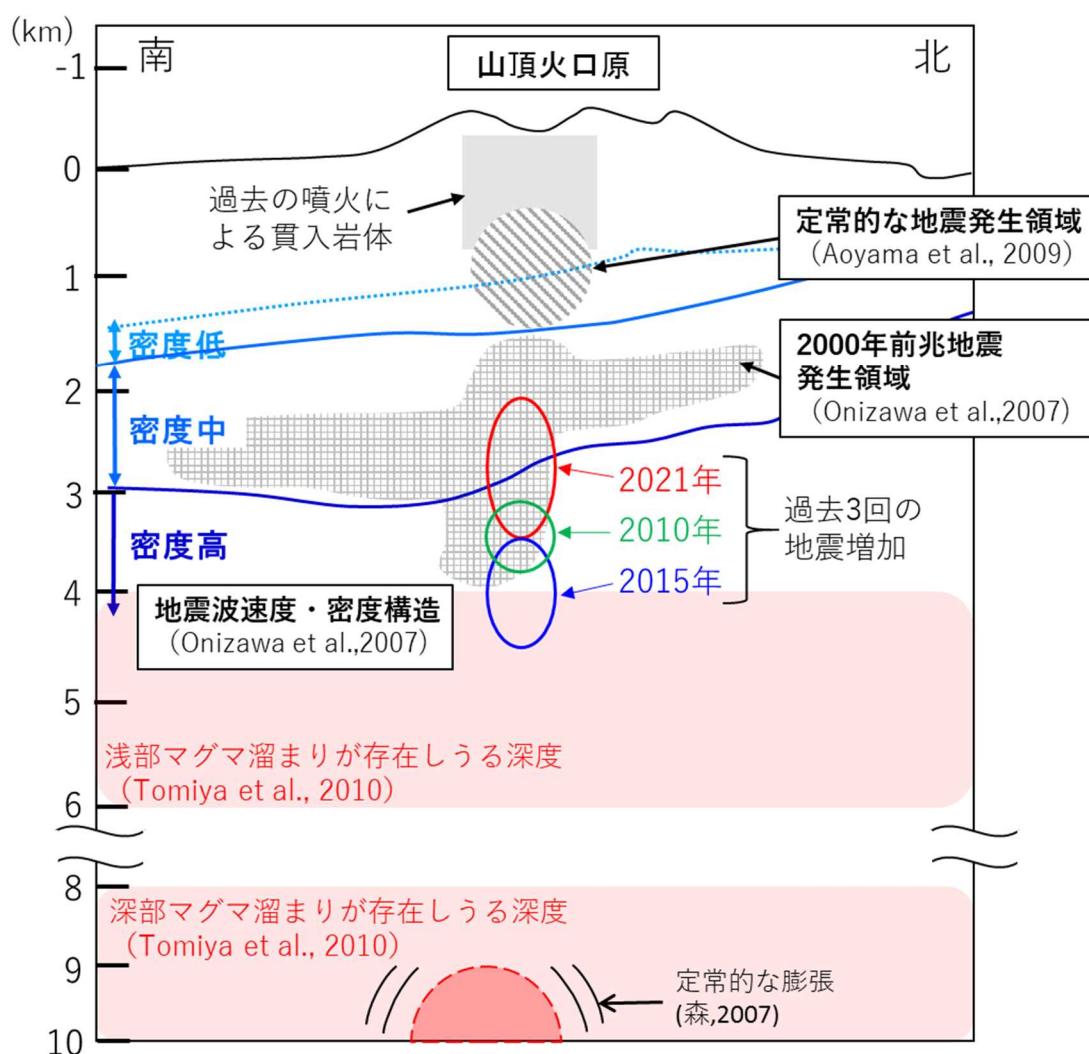


図 3 有珠山の概念モデル

3 深部から貫入したマグマが地下で固結した岩体で、地盤を隆起させて溶岩ドームあるいは潜在ドームを形成する。

活動期には、深部マグマだまりからマグマが上昇して浅部マグマだまりに到達し、その後浅部マグマだまりからデイサイト質マグマが山頂火口原に向かって上昇を開始する。マグマは地下の岩盤を押し広げながら上昇するため、その経路にあたる山頂火口原直下のやや深い領域（深さ2 km 以深）の岩盤に力がかわり、ひずみが蓄積して地震が発生すると同時に、周辺の岩盤が変形して膨張性の地殻変動が観測される。その後、マグマの上昇が進むにつれて、地震活動が活発化して発生頻度や規模の増大、顕著な地殻変動がみられる。

その後は、図4に示すように、マグマがさらに上昇して山頂火口原に到達した後に山頂から噴火を開始する場合（A：1977年山頂噴火事例）、マグマが山頂火口原に向かって上昇せずに傾斜した地層に沿って移動した後に山麓で噴火を開始する場合（B：2000年山麓噴火事例）、マグマが上昇・移動せずに深さ2 km 前後でとどまり噴火発生に至らない場合（C：2021年地震増加事例）の3つのシナリオが考えられる。

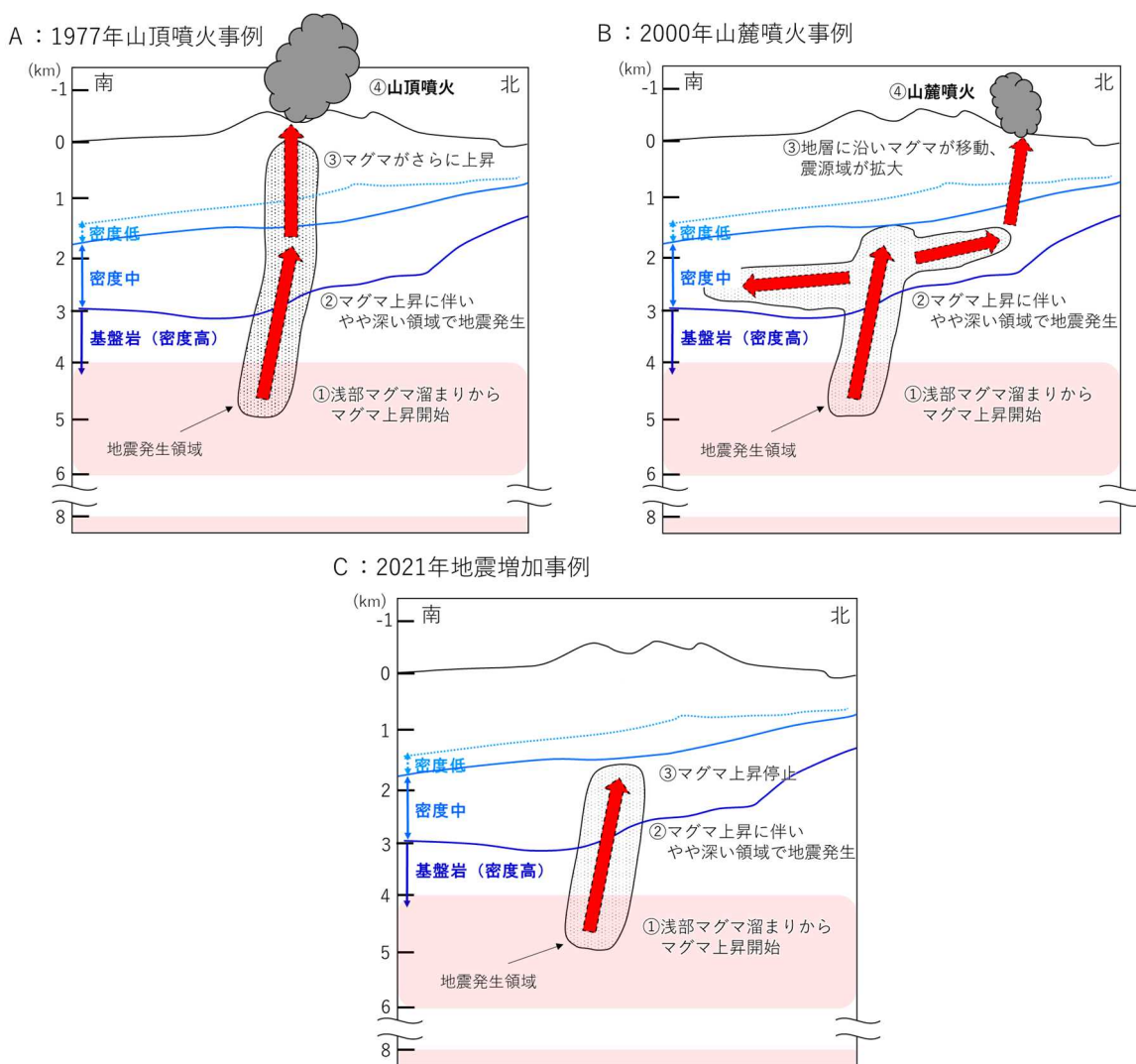


図4 有珠山の代表的な3つの過去事例（活動の推移）

なお、1943～45年の噴火活動は、活動の初期段階までは山麓噴火だった2000年の噴火活動と同様に経過していたが、それ以降の最初の噴火発生までの経過（地震の増減、震源及び隆起中心の移動を伴いながら地震活動及び地殻変動が約6ヵ月間継続）が大きく異なることに注意する必要がある。

2-2 噴火活動の推移

図5に、有珠山の活動が非活動期から活動期に移行し、前兆現象、噴火発生、新山形成、そして噴火活動が終息し非活動期に戻るまでの大まかな時間的推移を示す。ここでは、主に1910年、1943～45年、1977～82年、2000年の噴火活動の実績に基づき、噴火発生に至る推移を発現する火山現象に沿って整理する。

1977～82年の噴火活動では、規模の小さな火山性地震が増加し始めてからわずか約32時間後に噴火が発生した。その他の噴火活動でも、規模の小さな火山性地震の増加開始から3～10日ほどで噴火に至っており、前兆火山性地震活動の開始から噴火発生までの時間が短いことが特徴である（ただし、1943～45年の噴火活動を除く）。

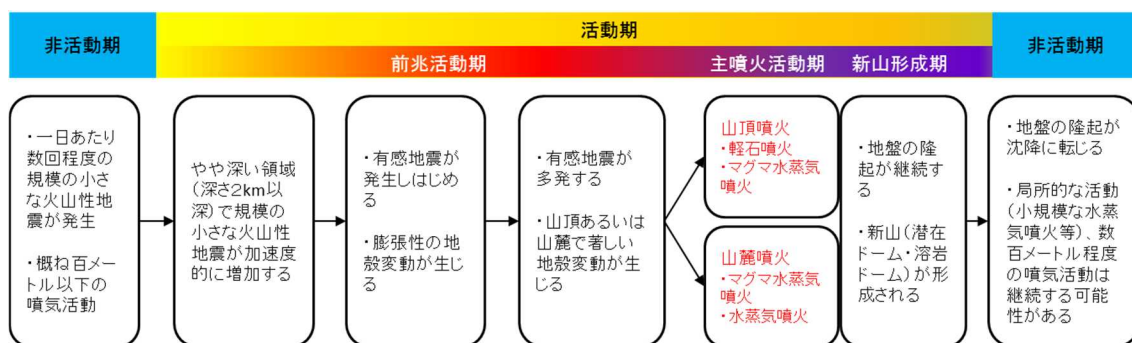


図5 有珠山における噴火活動の時間的推移

3 噴火警戒レベルの区分け

有珠山は、想定火口域に洞爺湖温泉街や居住地域を有し、年間を通じて多くの観光客が訪れるため、噴火が発生した場合は、噴火場所にかかわらず人命に関わる重大な被害につながる可能性が高い。1663年以降に発生した9回の噴火活動は、今の噴火警戒レベルに当てはめるとすべてレベル5に達する。

上記及び2章でまとめた火山活動の時間的な推移を考慮して、噴火警戒レベルの区分けを行った。

◎レベル1

噴気活動は20世紀以降に噴火した山頂火口原や昭和^{よそみやま}新山、明治新山(四十三山)、西山西麓火口群において認められる。山頂火口原の噴気高度は一時的に火口縁上200m程度に達することもあるが、概ね100m以下で推移する。その他の噴気活動はごく弱い。直近の噴火活動で生じた新山や全山規模のゆっくりとした沈降が続き、新山周辺の浅い領域で

の地震活動は、規模の小さな火山性地震の発生が1日あたり数回以下と総じて低調（一時的に1日あたり10回程度となる増加はありうる）で、火山活動は静穏な状態である。なお、非活動期にも、やや深い領域（深さ2km以深）で規模の小さな火山性地震の一時的な増加及びそれに伴うわずかな地殻変動がみられる場合がある。

また、噴火活動の終息後においても活動状況によっては、山頂火口原内及び近傍に影響する程度の火山灰の噴出等の可能性がある。

◎レベル2

活動期には、深部からのマグマ貫入により、やや深い領域（深さ2km以深）で発生する規模の小さな火山性地震の加速度的な増加があり、噴火活動に発展する可能性がある状態である。一方、活動期から非活動期に至る過程（図5参照）では、噴出物の飛散が火口近傍に留まる程度のごく小規模な水蒸気噴火が発生することがある。

◎レベル3

噴火による噴石、降下火砕物や火砕流・火砕サージ及び火山泥流が居住地域の近傍に達すると判断される状態である。

なお、過去9回の噴火活動による影響範囲は、いずれも現在の山麓の居住地域を含んでいる。このうち7回の噴火活動では、前兆となる火山性地震活動が観測され始めてから噴火が発生するまでの時間が短い（1日半～10日間）という記録が残っている。このため、火山性地震活動の活発化により噴火の発生が想定される状況下では、避難等の防災対応の時間を確保するために、レベル3の運用は行わず、噴火警戒レベルを4または5に引き上げる。

◎レベル4

マグマ貫入が進み、体を感じる地震の発生等、地震活動のさらなる活発化がみられ、山体を隆起中心とする膨張性の地殻変動が検出される等、居住地域に重大な被害を及ぼす噴火の可能性が高まっている状態である。

なお、噴火活動の低下によりレベルを引き下げる過程で、レベル4は運用しない。

◎レベル5

居住地域に重大な被害を及ぼす噴火が発生した場合、または、マグマ貫入がさらに進み、体を感じる地震が多発する等、地震活動の急激な活発化がみられ、著しい地殻変動が目視でも確認される等、噴火が切迫している状態である。

4 噴火警戒レベルの判定基準とその考え方

4-1 判定基準設定の考え方と活用するデータ

噴火警戒レベルの判定基準の設定にあたっては、2章で整理した火山活動の時間的な推移、3章で示した噴火警戒レベルの区分けを念頭に置き、1910年及び、1943～45年、1977～82年、2000年の噴火活動の観測記録を主に用い、それより古い噴火活動は古文書（横山・他、1973）を参考にした。

詳しい記録が残されている、20 世紀に起こった4回の噴火活動でも、噴火前に噴煙量の増加や地熱地帯の拡大等に関する記載がなかったことから、レベル判定基準の設定にあたっては、過去8回の噴火活動で報告されている火山性地震の増加や規模増大のほか、膨張性の地殻変動や明瞭な地形変化を指標とする。また、判定基準の客観化及び定量化を進めるため、可能な範囲で地震及び地殻変動の観測データを活用する。

有珠山の過去2回の噴火事例（1977年山頂噴火、2000年山麓噴火）及び噴火発生に至らなかった2回の地震増加事例（2015年、2021年）について、最初の火山性地震発生から噴火開始までに観測された地震振幅データから算出した地震波エネルギー放出率⁴の時間経過を図6に示す。2回の噴火事例では、最初の地震発生から1日以内で地震波エネルギー放出率が概ね 10^9 J/day の水準（橙色の破線）に達している。特に、噴火規模が比較的大きかった1977年山頂噴火事例では、最初の地震発生から半日程度とかなり早い段階で放出率が概ね 10^{11} J/day の水準（紫色の破線）にまで達している。一方、噴火規模が比較的小さかった2000年山麓噴火事例では、最初の地震発生から約2日後にようやく放出率が概ね 10^{11} J/day の水準に達しており、1977年山頂噴火事例と比べるとゆっくりと推移している。また、噴火発生に至らなかった地震増加事例では、最初の地震発生から1～2日程度でピークに達



図6 過去の噴火事例及び地震増加事例における地震波エネルギー放出率の時間的推移（最初の地震発生から噴火開始または地震活動終息までの経過を表示）

4 地震の振幅データから求めた地震波エネルギー放出量を1日あたりの放出率に換算した値で、J（ジュール）はエネルギーを表す単位のこと。

しているが、2事例の中で最大だった2021年地震増加事例でも放出率は概ね 10^9 J/dayの水準に近づく程度でとどまり、その後は約1日で概ね 10^8 J/dayの水準（灰色の破線）以下に低下し、地震活動は終息している。

不破・宮村（2022）は、井口・他（2019）によるマグマ貫入速度⁵の大小から噴火の規模・様式を予測する考え方を有珠山に適用させて、1977年噴火以降の3事例（1977年山頂噴火、2000年山麓噴火、2021年地震増加）について、活動の初期段階における地震及び地殻変動データからマグマ貫入速度（有珠山の場合はやや深い領域に貫入した1日あたりのマグマの体積量）を推定し、それらの大小関係を比較検討した。その結果、マグマ貫入速度が最も大きかった1977年山頂噴火事例では、最初の地震発生直後からすでに噴火発生の可能性が高い状態となっており、その後半日程度とかなり短時間のうちに噴火発生が切迫した状態になったと考えられる。一方、2000年山麓噴火事例ではそれよりも貫入速度が一桁程度小さく、最初の地震発生から半日程度で噴火発生の可能性が高まった状態となり、その約2日後には噴火発生が切迫した状態になったと考えられる。貫入速度がさらに小さかった2021年地震増加事例では、マグマ貫入が途中で停止したと考えられる。これらの結果は、図6に示した各事例における地震波エネルギー放出率の時間発展の違いと非常によく似ており、地震波エネルギー放出率でマグマ貫入速度を近似的に把握できると考えられる。

以上のことを踏まえ、地震波エネルギー放出率をマグマ貫入に伴う地震活動の状況を示す定量的指標として活用することとし、レベル4（噴火の可能性の高まり）及びレベル5（噴火の切迫）の従来の判定項目に追加し、いずれかの項目が基準を満たした場合には即座にレベルを引き上げることとする。また、地震増加によってレベル2に引き上げた後の地震活動の低下によるレベル1への引下げの判定にも活用する。

4-2 各レベル判定基準の詳細

以下では、各レベルの引上げ及び引下げの判定基準の運用及び数値基準設定の根拠について詳しく説明する。

◎レベル2

以下の基準により、レベル2への引上げ及びレベル2からの引下げを行う。

（引上げ基準）

静穏な火山活動が続いている中で次の現象が観測された場合はレベルを2に引き上げる。

【噴火の可能性を示す現象を観測した場合】

やや深い領域（山頂火口原直下の深さ2 km 以深）で発生する体を感じない規模の小さな火山性地震が、南山麓観測点⁶で1時間あたり10回以上観測され、その後も加速度的な

5 深部から貫入したマグマの体積量を1日あたりの値に換算したもの。

6 有珠山の観測点配置図は気象庁ホームページ（以下のURL）に掲載されている。

https://www.data.jma.go.jp/vois/data/sapporo/112_Usu/112_Obs_points.html

増加が認められる場合。

【ごく小規模な水蒸気噴火が発生した場合】

噴火活動の終息に伴いレベル1に引き下げた状況で、噴出物の到達範囲が活動火口近傍に留まる程度のごく小規模な水蒸気噴火が発生した場合は、レベル2に引き上げる。

(引下げ基準)

<レベル1からレベル2に引き上げていた場合>

または

<噴火が発生せず、レベル4またはレベル3からレベル2に引き下げている場合>

やや深い領域（山頂火口原直下の深さ2km以深）で体に感じない規模の小さな火山性地震が継続しなくなり、地震活動が低下して概ね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。

<噴火活動の終息に伴って引き下げる場合>

新山の沈降が継続し、1ヶ月以上水蒸気噴火の発生がないこと、及び火口温度の上昇や噴気活動・地熱活動の拡大傾向がないことを確認できた時点で、レベルを引き下げる。

●解説

(引上げ基準)

【噴火の可能性を示す現象を観測した場合】

過去9回の噴火活動のうち8回の事例では、噴火の前に顕著な火山性地震の増加があったことが記録に残されている。これらのうち、地震計による観測記録がある1977～82年及び2000年の噴火活動では、体に感じる地震の発生に先行して、規模の小さな火山性地震の加速度的な増加が捉えられている。いずれの活動でも、規模の小さな火山性地震の回数が1時間あたり10回を越えてから加速度的に増加し、その後の体に感じる地震の発生、さらに体に感じる地震の多発（地震規模の増大）へと発展し、噴火発生に至っている。

2章でも述べた通り、これらの顕著な火山性地震の増加は、地下からのマグマ貫入に伴い周囲の岩盤にひずみが蓄積することで発生すると考えられる。活動期における火山性地震の発生場所は、非活動期に山頂火口原浅部等の過去の噴火活動で生じた貫入岩体の周辺に発生する火山性地震とは明らかに異なることから、発生場所の条件を「山頂火口原直下のやや深い領域（深さ2km以深）」とした（図3参照）。

詳細な震源分布を把握できる現在の観測体制となって以降、やや深い領域で火山性地震が1時間10回以上に増加したが噴火に至らなかった事例は、2015年4月と2021年3月の2回あった（2010年11月地震増加は1時間10回未満）。2015年4月の事例では、20日の夕刻から深さ4km付近で規模の小さな火山性地震が増加し始め、前1時間の地震回数が23時07分に10回、23時38分に15回となったものの、その後は加速度的な地震増加はみられずに、徐々に減少に転じ、体に感じる地震の発生もなかった。2021年3月の

事例では、9日午前から深さ3km付近で規模の小さな火山性地震が増加し始め、15時18分には前1時間の地震回数が10回を超え、その後も徐々に増加が続き17時48分には前1時間の地震回数が20回を超え、震源は深さ2km付近まで移動、20時～23時にはマグニチュード1を超える地震が6回発生し、山体付近に設置された傾斜計では最大0.5 μ rad程度の傾斜変動が観測された。しかし、地震回数の加速度的な増加には至らず、10日に入って以降は地震回数が減少し、昼前から午後にかけて再び地震増加がみられたものの、夜遅くには終息した。

以上のことから、活動ステージが非活動期から活動期（噴火警戒レベル1→2）へ移行したことを判断する基準は「やや深い領域（山頂火口原直下の深さ2km以深）で発生する体に感じない規模の小さな火山性地震が、南山麓観測点で1時間あたり10回以上観測され、その後も加速度的な増加が認められる」とする。

なお、現在の有珠山の観測体制では、前兆となる火山性地震活動が開始する時点で、噴火場所はあらかじめ特定できない。このため、噴火の可能性を示す現象を観測した場合は、山頂火口原から山麓へ下山に時間を要することから、山頂火口原、及びその周辺を警戒が必要な範囲とする。

【ごく小規模な水蒸気噴火が発生した場合】

噴火活動の終息に伴い新山の隆起が停止から沈降に転じた直後には、噴出物の到達範囲が火口近傍に留まる程度のごく小規模な水蒸気噴火が発生することがある。

噴火活動の終息に伴いレベル1に引き下げた状況で、このような噴火が発生した場合は、活動火口近傍を警戒が必要な範囲としたレベル2に引き上げる。

(引下げ基準)

<レベル1からレベル2に引き上げていた場合>

火山性地震の増加が一時的なもので、その後、地震活動の低下が認められた場合は、噴火には結びつかない地震活動であると判断し、レベルの引下げを行う。活動終息の判断は、有珠山から東方へ約20km離れた気象庁登別観測点（図8右）の地震振幅データから算出した地震波エネルギー放出率が概ね 10^8 J/day未満の水準に低下し、概ね1日経過後も再度の地震活動活発化がないことを確認した上で行うこととする。

<噴火が発生せず、レベル4またはレベル3からレベル2に引き下げている場合>

火山活動の高まり（体に感じる地震の発生・多発、地殻変動の発現）によってレベル4またはレベル5への引上げを行ったが、噴火の発生には至らず、その後、火山活動の低下（地殻変動停止・沈降、体に感じる地震の発生なし）に伴って順次レベル4またはレベル3からレベル2に引き下げられた状況で、規模の小さな火山性地震の減少（1日に数回以下）が認められれば、一連の活動は終息したと判断し、レベルの引下げを行う。

<噴火活動の終息に伴って引き下げる場合>

新山の沈降が継続し、火山性地震の発生回数が噴火前の状態（1日に数回程度）となり、

1ヶ月以上水蒸気噴火が観測されない場合は、火山活動が静穏に戻ったと判断した時点で、レベル1への引下げを行う。

なお、噴煙・噴気の高度や火口温度、地熱の高い状態は、噴火活動終息後も継続するため、レベルの引下げにあたっては、これらの現象に増大・上昇傾向がないことを確認する。

◎レベル3

(引上げ基準)

火山性地震活動の活発化により、レベルの引上げを行う過程で、レベル3は運用しない。

(引下げ基準)

<噴火が発生した場合>

新山の隆起がほぼ停止する、あるいは沈降に転じた状況で、噴出物の飛散が火口近傍に留まるごく小規模な水蒸気噴火のみとなり、概ね1ヵ月間を経ても噴火活動の再活発化が認められない場合は、レベル2に引き下げる。

<噴火が発生しなかった場合>

噴火が発生しないままレベル5からレベル3への引下げが行われ、その後体を感じる地震が続発せず、地盤の隆起の停止あるいは沈降の傾向が1ヶ月以上継続している場合は、レベル2に引き下げる。

●解説

(引上げ基準)

有珠山では、過去の噴火活動において、噴火の前兆と考えられる現象（地下浅部へのマグマ貫入に伴う火山性地震活動及び地殻変動等）が発現し始めてから噴火が発生するまでの火山活動の推移が早い。このため、レベル1からレベル2へ引き上げた後に、火山活動のさらなる活発化（体を感じる地震の発生・膨張性の地殻変動）が認められる場合には、避難等の防災対応の時間を確保するために、レベル3は運用せず、即座にレベルを4以上に引き上げる。

一方、新山形成期（隆起率を減じながら新山の形成が続く期間）にマグマ水蒸気噴火あるいは水蒸気噴火が発生している状況で、活動火口が限定され、噴石や火砕流・火砕サージ及び火山泥流が居住地域にまで到達しなくなったと判断できた場合、または噴火に至らないまま火山性地震活動に低下傾向が認められ、地盤の隆起も停止あるいは沈降に転じたと判断される場合は、レベル5からの段階的な引下げを行う過程においてレベル3を運用する。

(引下げ基準)

<噴火が発生した場合>

新山の隆起が停止及び沈降に転じたことが確認された後も、規模の小さな水蒸気噴火

の発生はありうるが、軽石噴火や規模の大きなマグマ水蒸気噴火へ移行する可能性は低い。新山の隆起が停止及び沈降に転じた状況で、噴出物の飛散が火口近傍に留まるごく小規模な水蒸気噴火のみとなった時点から、1ヶ月程度の経過観察を行い、噴火活動の再活発化が認められない場合は、レベル2に引き下げる。

<噴火が発生しなかった場合>

噴火の切迫性に伴いレベル5に引き上げた後、噴火に至らず、火山性地震活動や地殻変動の低下によりレベル3に引き下げた状況で、体に感じる地震の発生がなく、地盤の隆起の停止あるいは沈降が1ヶ月以上継続している場合は、噴火の可能性は低くなったと判断し、レベル2に引き下げる。

◎レベル4

(引上げ基準)

【噴火の可能性の高まり】

やや深い領域（山頂火口原直下の深さ2km以深）で体に感じない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、レベル4に引き上げる。

- ・体に感じる地震が発生する等、地震活動のさらなる活発化
- ・山体を隆起中心とする膨張性の地殻変動を検出

(引下げ基準)

<噴火が発生した場合>

噴火活動の低下によりレベルを引き下げる過程で、レベル4は運用しない。

<噴火が発生しなかった場合>

レベル2からレベル4への引上げを行った後、体に感じる地震が続発せず、膨張性の地殻変動が検出されなくなった場合は、レベル2に引き下げる。

●解説

(引上げ基準)

【噴火の可能性の高まり】

有珠山では、山頂噴火・山麓噴火ともに、噴火の前には地下浅部へのマグマ貫入に伴い膨張性の地殻変動が顕在化し、火山性地震活動が活発化（火山性地震の回数・規模がともに増大）する。

20世紀以降、火山性地震活動の高まりが認められる中で体に感じる地震が発生した事例では、すべてが噴火に至っている。また、体に感じる地震の発生から噴火に至るまでの時間は、最短で約32時間（1977～82年の噴火活動）と短い。防災対応の時間を少しでも長く確保するため、やや深い領域（山頂火口原直下の深さ2km以深）において体に感じ

ない規模の小さな火山性地震が多発している状況（レベル2に相当）で、山体を隆起中心とする膨張性の地殻変動が検出される、または体に感じる地震が発生した場合はレベル3を運用せず、レベル4に引き上げ、想定される噴火の影響範囲全域（図1の太い赤線で囲まれた領域）を警戒が必要な範囲とする。

- ・体に感じる地震が発生する等、地震活動のさらなる活発化

現地で体に感じる地震の発生を把握するためには、現地への聞き取り調査で時間を要する場合があるほか、地震が発生した時間帯やそれぞれの場所での地盤の違いが揺れの判断に影響する可能性があることを踏まえると、体に感じる地震の発生は観測データを用いて判断することが望ましい。現在、有珠山周辺で運用されている計測震度計はいずれも山頂火口原からやや離れた山麓に配置されており（図7右）、地震増加開始直後の震源域（山頂火口原直下のやや深い領域）からやや遠くなるため、最初に震度1以上を観測する時期がやや遅れる可能性が考えられる。例えば、2000年山麓噴火事例では、震源域に近い洞爺湖温泉地区の住民が最初に揺れを感じたのは3月28日01時31分だったが、伊達市梅本の計測震度計（山頂火口原から約9km）で最初に震度1を観測したのは3月28日10時48分であった（気象庁、2003）。

図7左には、2000年噴火活動の当時、気象庁が山頂火口原に近い北麓の壮瞥温泉（山頂火口原から約2km）に緊急対応として臨時に設置した計測震度計で観測した計測震度と地震の規模（マグニチュード、以下M）の関係を示す。計測震度0.5以上となる地震の最小規模はM1.3だが、臨時震度計の運用開始は3月28日19時だったため、それ以前のデータが取得できておらず最小Mの判断には不確定性が残る。さらに、レベル引上げに至らなかった2021年地震増加事例では、規模の小さい火山性地震が増加する中でM1.4の地震が3回発生している。以上を踏まえると、体に感じる地震に相当する規模をM1.5以上とするのが妥当と考えられる。

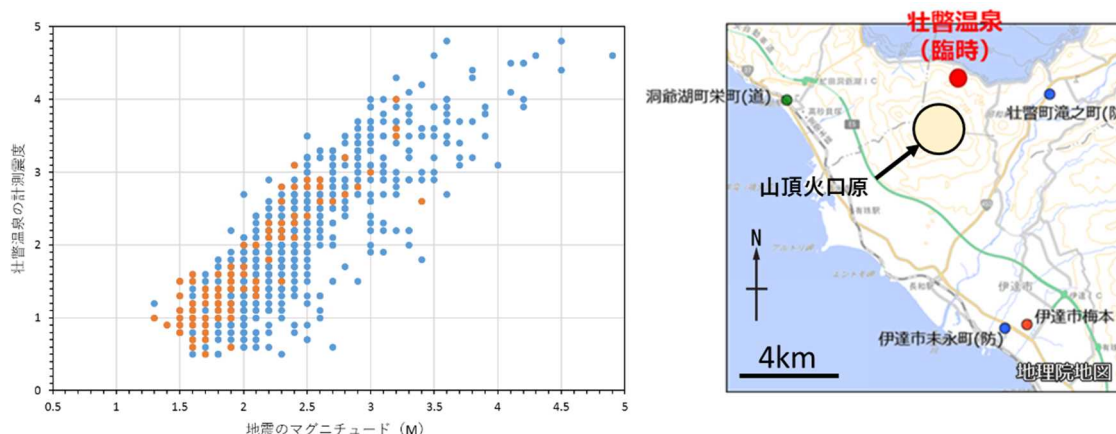


図7 2000年噴火前の壮瞥温泉（臨時震度計）の計測震度とマグニチュードの関係
（橙色：3月28日18時～29日17時、青色：3月29日17時以降）

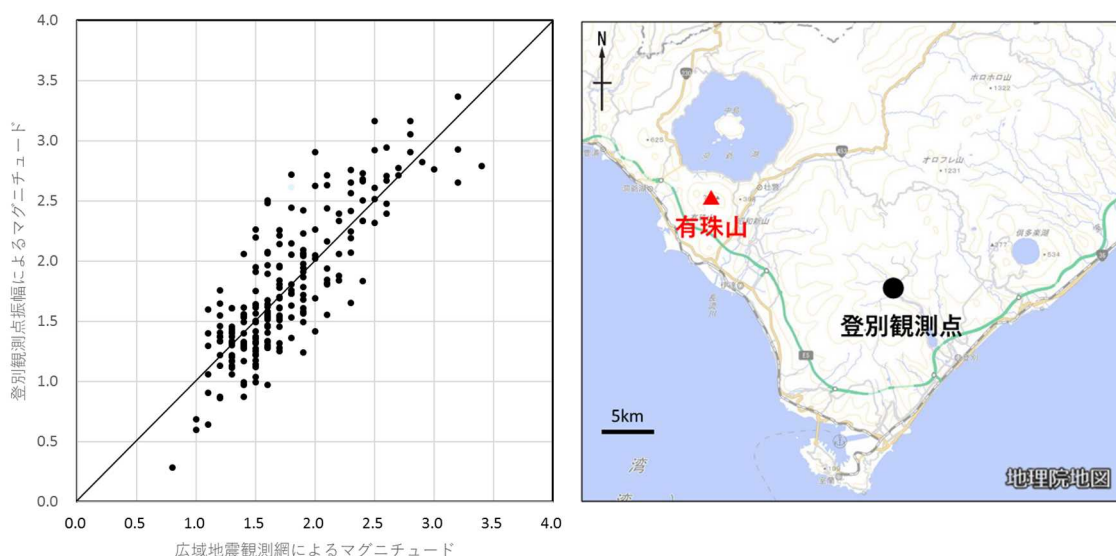


図8 気象庁登別観測点 (位置は右図) により推定したマグニチュードと
広域地震観測網により推定したマグニチュードの関係

なお、Mは通常、広域地震観測網のデータから算出しているが、緊急作業では有珠山から東方へ約 20km 離れた気象庁登別観測点 (図 8 右) の地震振幅データから推定したM (以下、登別M) を用いることとする。図 8 に広域地震観測網によるMと登別Mの関係を示す。

以上のように、有珠山周辺の計測震度計で震度 1 以上を観測した場合に加えて、登別Mが 1.5 以上の地震が発生した場合にも、噴火発生の可能性が高まったと判断し、レベル 4 に引き上げることとする。

また、前述の通り (p. 10)、マグマ貫入の進行に伴う地震活動のさらなる活発化は地震波エネルギー放出率によって定量的に捉えられると考え、気象庁登別観測点の地震振幅データから算出した地震波エネルギー放出率が概ね 10^9 J/day の水準に達した場合 (図 6) にも噴火発生の可能性が高まったと判断し、レベル 4 に引き上げることとする。

・ 山体を隆起中心とする膨張性の地殻変動を検出

マグマ貫入に伴う膨張性の地殻変動は、有珠山周辺で現在運用している傾斜計で検出できる可能性がある。2021 年地震増加事例では、特別地震回数が 10 回を超えた時間帯 (9 日 16 時~10 日 01 時、図 9 左の緑色破線枠内) に山体周辺に設置された複数の傾斜計で最大 0.5μ rad 程度の傾斜変化が捉えられた。この地震増加事例では噴火発生にまで至らなかったが、2000 年山麓噴火事例では、地震データから推定したマグマ貫入速度は $10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ 程度であった (不破・宮村, 2022)。山頂火口原直下の深さ 4 km の球状圧力源で $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ の体積増加を仮定した場合に山体周辺の傾斜計で期待される変化量は 1μ rad 程度となる (図 9 右)。ただし、2021 年地震増加事例のように、マグマ貫入が途中で停止する場合もありうることを考えると、傾斜変化の継続時間も同時に考慮する必要がある。

2021年に観測された傾斜変化 ↑北・東up方向

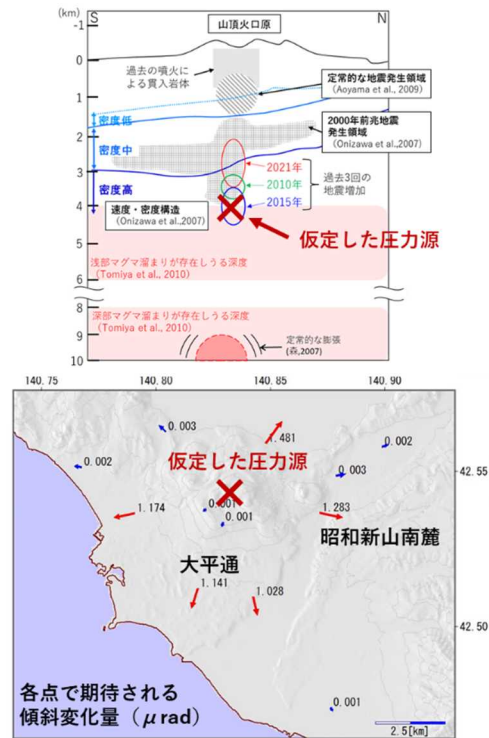
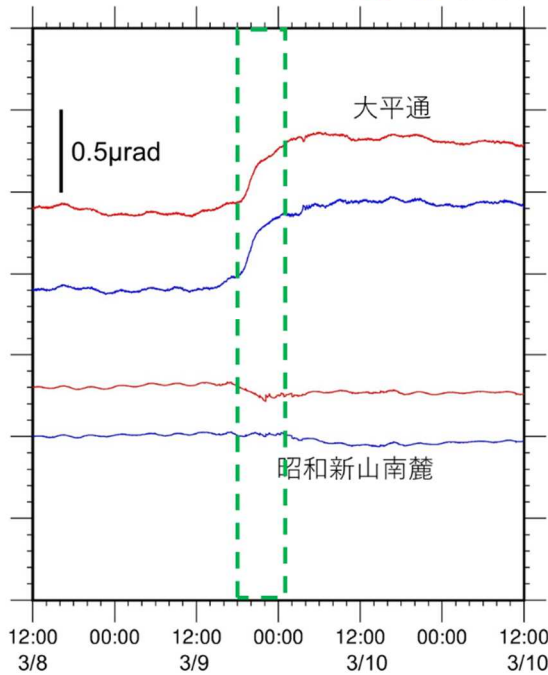


図9 2021年地震増加時に山体周辺の傾斜計で観測された傾斜変化(左)及び深さ4 kmに仮定した球状圧力源から期待される各点の傾斜変化量(右)

以上のことから、マグマ貫入に伴う小さな火山性地震が多発している状況において、山体を隆起中心とする膨張性の地殻変動を山体周辺の傾斜計で24時間で $1 \mu\text{rad}$ 程度以上の傾斜変化を観測した場合にも、噴火発生の可能性が高まったと判断して、レベル4に引き上げる。

(引下げ基準)

体を感じる地震の発生あるいは地震波エネルギー放出率の高まりによりレベル4への引上げを行い、その後、体を感じる地震が発生せず、かつ膨張性の地殻変動が認められない場合は、噴火の可能性は低くなったと判断し、レベル2に引き下げる。また、膨張性の地殻変動の検出によってレベル4に引き上げた場合は、さらなる膨張性の変動が認められず、かつ火山性地震活動の活発化が認められなければ、噴火の可能性は低くなったと判断し、レベル2に引き下げる。

◎レベル5

(引上げ基準)

【噴火が切迫】

次のいずれかの現象が観測された場合、レベル5に引き上げる。

- ・体に感じる地震が多発する（1時間あたり10回以上）等、地震活動の急激な活発化
- ・山体または山麓で目に見える地形変化が発現

【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。

(引下げ基準)

＜噴火が発生した場合＞

最初の噴火発生直後は、火口開口域の広がりや噴出物の到達範囲に応じて、レベル5を維持したまま、警戒が必要な範囲の変更・縮小を行う。

その後、降下火砕物量の減少や噴出物到達範囲の縮小、さらに地震活動や新山隆起速度の低下傾向が認められ、噴石や火砕流・火砕サージ及び火山泥流が居住地域に到達しなくなったと判断された場合は、警戒が必要な範囲を再検討した上で、レベル3に引き下げる。

＜噴火が発生しなかった場合＞

レベル5への引上げを行った後、1週間程度経過しても噴火に至らない場合、次のいずれかの対応を取る。

【警戒が必要な範囲を変更せず、レベル5を維持する】

顕著な地盤の隆起が継続し、隆起域の局所化が認められず、体に感じる地震の回数が減少しない場合。

【警戒が必要な範囲を縮小して、レベル5を維持する】

顕著な地盤の隆起が継続する中で、体に感じる地震の減少、あるいは隆起域の局所化が認められる場合。(噴火の発生場所は特定できないため、隆起中心からの噴火を想定する)

【レベル3に引き下げる】

地盤の隆起速度が低下あるいは停止し、体に感じる地震が発生しなくなる。(隆起中心から居住地域近傍までを警戒が必要な範囲とする)

●解説

(引上げ基準)

【噴火が切迫】

噴火直前には、マグマが地下のごく浅部にまで貫入することに伴って、火山性の地震活動がより激しくなり、目に見える地形変化が発現することから、体に感じる地震が多発する等、地震活動の急激な活発化もしくは目に見える地形変化の発現を噴火切迫の指標とする。

- ・体に感じる地震が多発する（1時間あたり10回以上）等、地震活動の急激な活発化

体に感じる地震の時間別回数の記録が残されている1910年、1977～82年、2000年の噴火活動では、いずれも体に感じる地震が多発（1時間あたり10回以上）し始めた時点か

ら、約2日以内に最初の噴火が発生している⁷。このことから、1時間あたり10回以上の体を感じる地震発生を「噴火が切迫」の指標とし、この基準によりレベル5に引き上げる。なお、レベル4の判定と同様に(p.16)、体を感じる地震に相当する規模をM1.5以上と考え、気象庁登別観測点の地震振幅データを用いて推定したM1.5以上の地震回数も活用する。

また、前述の通り(p.10)、マグマ貫入が急激に進むことによる地震活動の急激な活発化は、地震波エネルギー放出率によって近似的に把握できると考え、気象庁登別観測点の地震振幅データから算出した地震波エネルギー放出率が概ね 10^{11} J/dayの水準に達した場合にも噴火が切迫したと判断して、レベル5に引き上げることとする。

・山体または山麓において目に見える地形変化が発現

地下のさらに浅部にまでマグマが貫入するにしたがい、地殻変動は広域的な変動からより局所的な変動へと移行する。1943～45年、1977～82年、及び2000年の噴火活動では、噴火直前に山頂火口原や外輪山及び山麓周辺の道路等に、地盤の隆起や亀裂等の現象が発現したことから、目に見える地形変化の発現を噴火の切迫性の指標とした。

【噴火が発生】

有珠山は、噴火の前兆となる火山性地震活動や地殻変動を捉えることにより、噴火発生前にレベル5への引上げを行うことが可能な火山である。しかしながら、レベル5への引上げが行われていない状況で噴火が発生し、居住地域に被害が及ぶと判断した場合は、噴火の発生場所に応じて警戒の必要な範囲を設定した上で、速やかにレベル5へ引き上げることとする。

なお、過去の山頂噴火では、多量の火砕物(軽石・火山灰等)が降下したほか、火砕流・火砕サージが山麓の広い範囲にまで流下している。1663年の噴火では火砕サージが太平洋岸にまで達し、1978年8月16日の新山形成期(図5)に発生したマグマ水蒸気噴火では、火砕サージ(低速・低温)が北東麓の洞爺湖岸まで到達した。山麓噴火においてもマグマ水蒸気噴火が発生し、それに伴い火砕サージが発生することがあったが、山頂噴火の場合と比較して、流下範囲は狭域である。1944年7月から8月にかけて発生した火砕サージは、火口から約2kmの洞爺湖岸沿いの保安林を吹き倒し、あるいは樹木の表皮を焼き焦がし、小屋を吹き飛ばす等の被害をもたらした。また、1910年以降の噴火活動で放出された噴石の飛散距離は2km以内であった。

(引下げ基準)

<噴火が発生した場合>

有珠山では、事前に噴火場所を特定することが困難なため、噴火が切迫した状態となっ

7 1977～82年の噴火活動では、1977年8月6日20時までの時間別地震回数データがないため、体を感じる地震が多発し始めた正確なタイミングは不明だが、8月6日の03時から11時までに25回程度、14時から20時までに約90回の体を感じる地震が発生したとされている(臨時火山情報第3号、第5号による)。このことから、20時以前には「体を感じる地震が1時間あたり10回以上」という基準に達していると考えられる。

てレベル5へ引き上げた直後は、想定される噴火の影響範囲全域（図1の太い赤線で囲まれた領域）を警戒が必要な範囲としている。このため、噴火発生直後は、火口開口域や噴出物の飛散範囲等の調査結果を基に、レベル5を維持したまま警戒が必要な範囲の縮小を行う。また、居住地域に堆積した火砕物の除去や、応急的な降雨型泥流防止工事、ライフラインや道路の復旧を進めるために、適時・的確な警戒事項と警戒が必要な範囲の変更を行う。

最初の噴火発生後、新たな火口の形成がなくなり、降下火砕物量の減少や噴出物の到達範囲の縮小、さらに新山隆起速度や地震活動の低下傾向が認められ、噴石、降下火砕物や火砕流・火砕サージ及び火山泥流が居住地域に到達しなくなったと判断された場合は、噴火に伴う堆積物や地殻変動による居住環境の変化を考慮した上で警戒が必要な範囲の再検討を行い、レベル3に引き下げる。

<噴火が発生しなかった場合>

過去の噴火活動では、レベル5（噴火が切迫）の判定基準を満たしたすべての場合で噴火に至っている。これらのうち、1943～45年の噴火活動では、1943年12月28日に始まった体を感じる地震の多発（噴火が切迫した状態）の後、体を感じる地震の増減や震源の移動、隆起中心の移動や隆起速度の増大、再度の地震の急増を経て、1944年6月23日（体を感じる地震の多発から約6ヵ月後）に、隆起中心付近（現在の昭和新山中央部に相当）で最初の水蒸気噴火に至った。

将来の噴火活動においても、1943～45年の活動と同様な経緯をたどることも考えられるが、噴火の発生がない状況で、想定される噴火の影響範囲全域を警戒が必要な範囲としたレベル5（噴火が切迫）を長期間継続することは現実的ではない。

このため、レベル5への引上げを行った後、1週間程度経過しても噴火に至らない場合、顕著な地盤隆起が継続している間は、想定される噴火の影響範囲全域を警戒が必要な範囲としたレベル5を維持するが、体を感じる地震の回数が減少する、あるいは地盤隆起域に局所化が認められれば、警戒が必要な範囲を、想定される噴火の影響範囲全域から隆起中心付近からの噴火を想定したものに見直す（レベル5は維持）。

レベル5を維持する中で、体を感じる地震が発生しなくなり、地盤の隆起速度が低下あるいは停止した場合は、噴火の切迫性が低下したと判断し、隆起中心から居住地域近傍までを警戒が必要な範囲としてレベル3に引き下げる。

上記の状況でレベルの引下げを行った場合、新たな地殻変動の発現、あるいは体を感じる地震回数の急激な増加が認められれば、再び隆起中心付近からの噴火を想定したレベル5への引上げを行う。

5 改善経緯と今後の課題

有珠山では、2010年に噴火警戒レベルの運用を開始し、2020年には有珠山火山防災協議会によるレベル改定と同時に判定基準の精査・公表を行った。ただし、レベル判定基準に活

用可能な過去事例データが限られているため、地震回数以外の判定項目は定性的表現にとどまっていた。

令和5年度の改定では、マグマ貫入に伴う地震活動の定量的指標として地震波エネルギー放出率、体を感じる地震発生の判定には地震の規模（マグニチュード）及びマグマ貫入に伴う膨張性地殻変動の検知には傾斜計記録をそれぞれ活用することによりレベル判定基準の客観化及び定量化を図ったほか、最新の観測結果及びこれまでの研究成果を概念モデルとして取りまとめ、有珠山における火山活動の推移を分かりやすく記述した。

今後も新たな観測事例や火山学的知見が得られた場合には、レベル判定基準に反映させるための検討を行う。特に、以下の各課題に引き続き取り組む必要がある。

- (1) 噴火発生前に噴火地点を特定するための地殻変動及び地震データによる定量的指標の検討（特に、山麓噴火の場合に重要）
- (2) レベル引下げや警戒が必要な範囲の限定に用いる定量的指標の検討

参考文献

- Aoyama, H., Onizawa, S., Kobayashi, T., Tameguri, T., Hashimoto, T., Oshima, H., Mori, H.Y. (2009) Inter-eruptive volcanism au Usu volcano: Micro-earthquakes and dome subsidence. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 187, 203-217.
- 井口・他 (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.
- 有珠山火山防災協議会 (2002) 有珠山火山防災マップ（北海道防災会議火山対策専門委員会監修）.
- Oshima, H. and Ui, T. (2002) The 2000 Eruption of Usu Volcano. Reports on volcanic activities and volcanological studies in Japan for the period from 1999 to 2002, 22-31.
- 岡田 弘・宇井忠英・中川光弘 (2002) 有珠山（補遺その1）, 平成12年有珠山噴火（噴火活動と火山地質）. 北海道における火山に関する研究報告書第14編, 北海道防災会議, 59 p.
- Onizawa, S., Oshima, H., Aoyama, H., Mori, H. Y., Maekawa, T., Suzuki, A., Tsutsui, T., Matsuwo, N., Oikawa, J., Ohminato, T., Yamamoto, K., Mori, T., Taira, T., Miyamachi, H. and Okada, H. (2007) P-wave velocity structure of Usu volcano: Implication of structure controls on magma movements and eruption locations. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 160, 175-194.
- 気象庁 (2003) 平成12年（2000年）有珠山噴火調査報告. 気象庁技術報告, 124, 247p.
- 気象庁 (2020) 有珠山噴火警戒レベルリーフレット.
- Goto, Y., Sekiguchi, Y., Takahashi, S., Ito, H. and Danhara, T. (2013) .The 18-19

- ka andesitic explosive eruption at Usu volcano, Hokkaido, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58, 529-541.
- Tomiya, A., Takahashi, E., Furukawa, N. and Suzuki, T. (2010) Depth and evolution of a silicic magma chamber: Melting experiments on a low-K rhyolite from Usu volcano, Japan. *J. Petrol.*, 51, 1333-1354.
- Nakagawa, M., Matsumoto, A. and Yoshizawa, M. (2022) Re-investigation of the sector collapse timing of Usu volcano, Japan, inferred from reworked ash deposits caused by debris avalanche. *Front. Earth Sci.*, 10.
- 中田節也 (2016) 噴火シナリオと確率論的予測. *火山*, 61, 199-209.
- 不破智志・宮村淳一 (2022) 有珠山におけるマグマ貫入速度による噴火事象予測の試み. *日本火山学会 2022 年秋季大会講演予稿集*, P2-16.
- Matsumoto, A. and Nakagawa, M. (2019) Reconstruction of the eruptive history of Usu volcano, Hokkaido, Japan, inferred from petrological correlation between tephra and dome lavas. *Island Arc*, 28, e12301.
- 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*, 64p.
- 横山 泉・勝井義雄・大場与志雄・江原幸雄 (1973) 有珠山, 火山地質・噴火史・活動の現況および防災対策. *北海道における火山に関する研究報告書第 3 編*, 北海道防災会議, 254p.