

草津白根山の噴火警戒レベル判定基準とその解説

1. 想定する噴火の規模、様式と現象

草津白根山では、有史以前は白根山山頂周辺、本白根山山頂周辺、及び逢ノ峰等で爆発的な噴火による火砕丘の形成と溶岩流の流下等、噴出物量が最大で1億 m³ オーダーのマグマ噴火が発生している。有史以降は、白根山山頂火口（湯釜、水釜、涸釜）周辺で火口周辺に噴石を飛散させる程度の水蒸気噴火が発生している。これらのことを踏まえ、噴火場所などを以下のように想定した。

噴火場所

有史以降噴火が発生しているのは白根山山頂火口周辺のみであり、現在の地震活動もその周辺に限られていることから、噴火場所として、白根山山頂火口周辺を想定する。

噴火の区分とその影響

噴火様式と規模の想定は下表の通りである。

噴火様式	規模	噴火に伴う現象	警戒が必要な範囲	過去事例
水蒸気噴火	小噴火	大きな噴石、降灰、空振	火口から半径約 1 km (大きな噴石)	1937 - 1939 年噴火 1982 - 1983 年噴火等
水蒸気噴火	中噴火	大きな噴石、降灰、空振、融雪型泥流	火口から半径約 2 km (大きな噴石) 居住地域近くまでの沢沿い(融雪型泥流)	有史以降の事例なし
マグマ噴火	大噴火	大きな噴石、降灰、空振、溶岩流、融雪型泥流	火口から半径約 3 km (大きな噴石) 火口から 7 km 程度(溶岩流) 沢沿いの居住地域(融雪型泥流)	約 3,000 年前 本白根火砕丘形成、殺生溶岩 等 有史以降の事例なし

- ・有史以降の水蒸気噴火について、噴石は火口から半径約 1 km 以内の範囲に飛散している。
- ・溶岩流の流下範囲は、地形的な影響により、山体の南東側に限られている。
- ・「大きな噴石」とは「風の影響を受けずに弾道を描いて飛散する大きな噴石」のことである

- ・火山灰や小さな噴石は、風に乗って警戒が必要な範囲を超えて広範囲に達することがある。空振も、警戒が必要な範囲を超えて広範囲に影響を及ぼす。降雨による土石流は、噴火が終息した後も継続することがある。

2. 火山活動の時間的な推移

草津白根山の水蒸気噴火については、マグマからの火山ガスの供給量増加により、浅部の流体貯留槽付近での地震活動の高まりや膨張を示す地殻変動、温度上昇による全磁力変化、また噴気中のガス成分の変化等が観測される場合がある。1976年噴火時は、山頂の北側の噴気地帯のガス組成に変化（ $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の増加）がみられ、新たな噴気の出現も1年以上前から観測されていた（Ossaka et al., 1980）。1982～1983年噴火時は、数年前から火山ガス（ H_2S ）濃度の減少（平林・大場, 1992）と噴火の10日前～直前に山頂直下の浅部で地震の増加や微動の発生がみられた。しかし、一般に水蒸気噴火は前兆に乏しいため、明確な前兆もなく噴火に至る場合もあり、静穏な状態から前兆現象が何も観測されないまま、突発的に発生する噴火の可能性に留意する必要がある。

一方、有史以前に発生しているマグマ噴火については、マグマの貫入に伴い、山体の膨張を示す地殻変動や体を感じる規模の地震多発等が予想されるが、観測実績がないため詳細は不明である。マグマ噴火の推移を他の火山の事例等も踏まえて推定すると、マグマの上昇により、マグマからの火山ガスの供給が更に増大し、地下水とマグマの相互作用により、マグマ噴火に先立って水蒸気噴火が発生する。更にマグマが上昇すると、マグマ中の揮発性成分の発泡により爆発的噴火が発生して噴出物により火砕丘が形成される。その後、山頂付近あるいは山腹斜面より、揮発性成分がマグマから抜けた結果として溶岩流が流下することが考えられる。

3. 噴火警戒レベルの区分け

レベル1（活火山であることに留意）

静穏な火山活動。レベル1であっても、火山性地震の多発や湯釜の湖水の変色、湯釜火口内で水柱など山頂火口内及び一部火口外に影響する程度の噴出の可能性がある場合は、噴火予報を発表し、警戒事項を変更する。

レベル2（火口周辺規制）

山頂火口の中心（湯釜火口）から1km以内に影響する小噴火の可能性はある。浅部を震源とする地震活動の活発化や浅部の膨張を示す地殻変動、浅部の温度上昇を示す全磁力変化、火山ガスや湯釜の湖水の成分の変化など、マグマから浅部の流体貯留槽への火山ガスの供給量が増加し、火山活動が高まった状態。

レベル3（入山規制）

山頂火口の中心（湯釜火口）から2km以内に影響する中噴火の可能性はある。マグマからの火山ガスの供給量が増加し、地震活動や地殻変動、噴気や湯釜の湖水の成分など、

レベル2で想定している現象を上回る規模で変化するなど、火山活動が活発な状態。

レベル4（避難準備）から5（避難）

マグマの上昇により、有感地震の多発や顕著な地殻変動等がみられるなど、居住地域に重大な被害を及ぼす噴火が発生することが予想、もしくは切迫していると考えられる状態。

4. 噴火警戒レベルの判定基準とその考え方

【レベル1】

レベル1であっても、以下の現象の有無により、山頂火口内及び一部火口外に影響する程度の噴出の可能性を評価し、噴火予報を発表する。

- ・湯釜火口の水柱、噴気地帯の噴気の活発化、新たな噴気の出現などの表面現象
- ・山頂火口付近浅部の地震活動の高まり（日地震回数が概ね20回以上）
- ・山頂火口付近浅部の膨張を示す地殻変動、または、温度上昇を示す全磁力変化
- ・噴気や湖水中の組成にマグマの関与の増加を示す明瞭な変化

（解説）

活動が活発な草津白根山では、レベル1で上記の現象が通常見られているが、上記の現象がいずれもみられない場合は、火山活動が静穏で山頂火口内及び一部火口外に影響する程度の噴出の可能性が低いと考えられるため、レベル1で更に活動が低下した場合も想定している。

【レベル2】

（判定基準）

< 火口周辺に影響を及ぼす噴火の可能性 >

レベル1の段階で、次のいずれかの現象が観測された場合、レベル2に引き上げる。

傾斜変動を伴う火山性微動（水釜北東観測点UD成分で振幅概ね50 μ m/s以上で継続時間概ね5分以上）の発生

山頂火口付近浅部の地震活動の高まり（日時震回数が概ね40回以上）、かつ、以下のいずれかの現象が観測された場合

- > 山頂火口付近浅部の膨張を示す地殻変動
- > 山頂火口付近浅部の温度上昇を示す全磁力変化
- > 噴気や湖水の化学組成にマグマの関与の増加を示す明瞭な変化
- > 山頂火口付近浅部の低周波地震の増加

< 火口周辺に影響を及ぼす噴火が発生 >

噴火により火口から半径1km以内に大きな噴石飛散

（引き下げ基準）

噴火の発生がなく、地震活動も静穏時のレベルに戻り、山体膨張や熱消磁、噴気や湖水の化学組成にマグマの関与の増加を示す変化がなくなる傾向が明瞭になった場合。ただし、静穏時に戻る傾向が明瞭であると判断してレベル1に下げた後に、再び火山活動が高まる傾向に転じたと判断した場合は、上記の基準に達していなくてもレベル2に戻す。

(解説：判定基準)

平林(2000)によると、草津白根山山頂直下には、マグマから供給された火山ガスなどが貯留された流体貯留槽があり、湯釜や周辺の噴気地帯で噴出している火山ガスはそこから供給されていると推定されている(図1)。草津白根山では、過去に噴火(1983年)や噴火に至らないまでも活動の高まり(1990~1991年、2011年、2014年~)が観測されているが、それらは流体貯留槽への火山ガスの供給量の増加によると考えられている。判定基準は、これらの活動の際に観測された現象を踏まえて設定している。

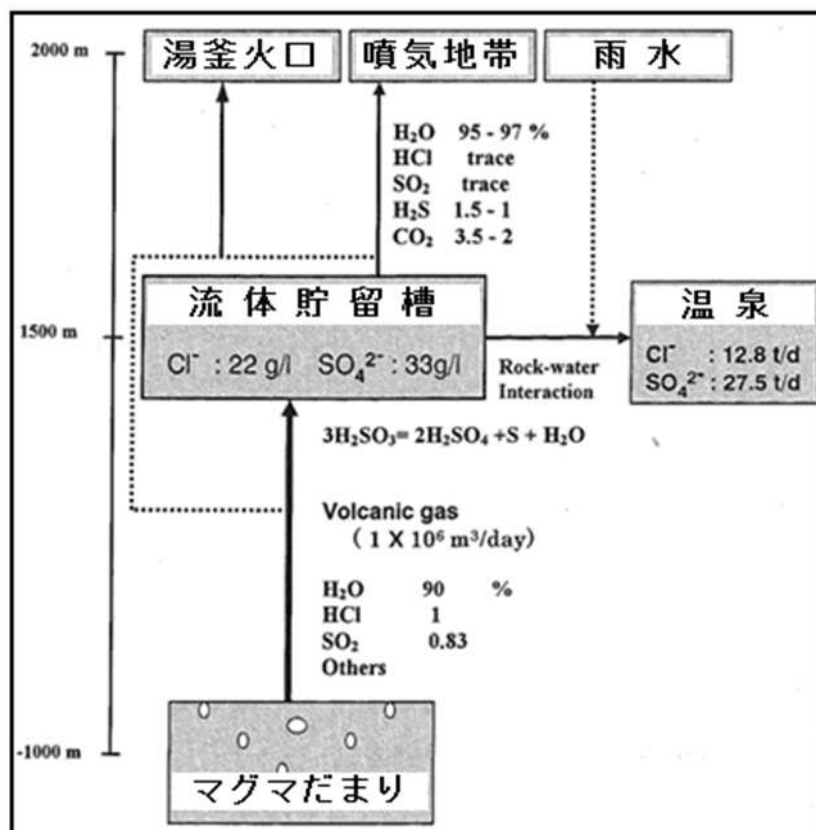


図1 草津白根山の浅部熱水システム(平林, 2000 に加筆)

< 火口周辺に影響を及ぼす噴火の可能性 >

2011年5月に発生した火山性微動では、噴火は発生しなかったが、傾斜変動を伴い、その体積変化率は数100万 m³/日程度にもなる。この値は、他の火山で観測された同様の事例と比較しても大きい部類にはいることから、この火山性微動を超える規模を想定した。

草津白根山の過去の事例では、マグマからの火山ガスの供給が増加し火山活動が高まると、火山性地震の日回数が40回を超えるような浅部の地震活動の高まりに前後して、浅部の膨張を示す地殻変動、浅部の温度上昇を示す全磁力変化、ガス成分の変化などが観測されているため想定した。必ずしも地震活動の高まりが先行するとはかぎらず、1983年10月噴火事例のように、噴気の化学組成にマグマの関与の増加を示す明瞭な変化がみられているなか、地震活動が高まり噴火にいたる場合もある。

低周波地震については、回数は少ないながらも低周波地震が発生するようになって噴火にいたる事例が、御嶽山など他の火山でも観測されていることから想定した。

< 火口周辺に影響を及ぼす噴火が発生 >

水蒸気噴火の予測は難しく、突発的に火口周辺に影響するような小噴火が発生すれば、レベルを引き上げる。また、火口周辺に火山灰を降下させる程度のごく小規模な噴火であっても、念のため、レベルを2に引き上げることとした。

(解説：引き下げ基準)

火山活動がレベル1の状態に戻った場合、レベル2からレベル1へ引き下げるが、地震活動は他の観測種目に比べ、早く元の状態に戻るのに対し、地殻変動や全磁力変化、ガスや湖水のマグマ由来の成分の濃度は、元の状態に戻るまで時間がかかる場合が多いので、戻る傾向が明瞭になった場合にレベル1へ引き下げるとした。ただし、レベル1に戻る傾向が明瞭になったと判断してレベルを下げたが、ひとつの観測データでも再び活動の高まりに転じた場合は、レベル2の判定基準に達していなくてもレベル2に戻すこととした。

【レベル3】

(判定基準)

レベル1～2の段階で、次のいずれかの現象が観測された場合、レベル3に引き上げる。

< 山頂火口から1～2 kmに影響を及ぼす噴火の可能性 >

噴火の拡大傾向(山頂火口から1 km以遠に大きな噴石の飛散が予想される)

レベル2の段階で、以下のいずれかの現象が観測された場合

- > 大きな火山性微動(レベル2よりも規模大あるいは継続時間長)
- > 山頂火口付近浅部の地震活動のさらなる活発化(レベル2よりも規模大あるいは回数多)
- > 山頂火口付近浅部の膨張を示す明瞭な地殻変動(レベル2よりも規模大)
- > 湯釜の水温のさらなる高温化

< 噴火による火口湖決壊泥流発生の可能性 >

湯釜火口内の南火口壁付近で噴火が発生し、火口壁が決壊して泥流が発生する可能性がある場合

< 山頂火口から1 kmを超え、2 km以内に影響を及ぼす噴火が発生 >

噴火により火口から 1 ~ 2 km の範囲に大きな噴石飛散

(引き下げ基準)

火口から 1 ~ 2 km に影響を及ぼす噴火が発生せず、上記の現象がみられなくなった場合。

火口から 1 ~ 2 km に影響を及ぼす噴火の発生後、噴火が発生しなくなる、もしくは、火口周辺に影響を及ぼす程度の噴火にとどまる活動に低下した場合、レベル引き上げ後の活動評価を基本に、防災対応の状況や必要に応じて火山噴火予知連絡会での検討結果も考慮してレベルの引き下げを判断する。

(解説：判定基準)

<火口から 1 ~ 2 km に影響を及ぼす噴火の可能性>

草津白根山の有史以降の噴火では、大きな噴石が火口から 1 km 以上に飛散した記録はない。そこで、マグマから山頂火口直下浅部の流体貯留槽への火山ガスなどの供給量が更に増加するなどにより、レベル 2 を上回るような噴火の可能性が高まった場合を想定した。

火口周辺に影響を及ぼす程度の噴火を繰り返すなかで、大きな噴石の飛散距離に拡大傾向がみられ、1 km 近くまで飛散するようになった場合は、今後 1 km を超えて大きな噴石が飛散する可能性があることから設定した。

マグマから湯釜火口直下浅部の流体貯留槽への火山ガスの供給量が更に増加した場合、流体貯留槽付近の圧力や温度が更に上昇し、地震活動が更に活発化、膨張を示す明瞭な地殻変動や湯釜の水温の高温化が観測されることが想定されることから設定した。

<噴火による火口湖決壊泥流発生の可能性>

草津白根山山頂の湯釜火口には、火口湖が存在する。湯釜火口の南側火口壁は火口縁の中では最も標高が低く、この付近で噴火が発生した場合、火口壁が決壊して、湖水があふれ泥流が発生することが想定されることから設定した。

<火口から 1 km を超え、2 km 以内に影響を及ぼす噴火が発生>

有史以降、草津白根山では大きな噴石が 1 km を超えて飛散した記録はないが、他の火山の水蒸気噴火では、まれに 1 km を超えて噴石が飛散した例があることから設定した。

(解説：引き下げ基準)

レベル 2 における警戒が必要な範囲(火口から概ね 1 km)を超えて、火口から 2 km まで影響を及ぼす噴火が発生しない状況で、レベル 3 の判定基準で示している火山性微動、地震活動、地殻変動、及び湯釜の水温の上昇が見られなくなった場合にレベル 2 に下げる。また、レベル 3 相当(火口から 1 ~ 2 km 以内に影響を及ぼす噴火)の噴火が発生した後に、噴火発生がない、またはレベル 2 相当(火口周辺に影響を及ぼす程度にとどまる噴火)の噴火発生にとどまっている場合、レベル引き上げ後の活動評価に基づき、防災対応の状況や必要に応じて火山噴火予知連絡会での検討結果も考慮してレベルの引き下げを判断する

こととしている。

【レベル4】

(判定基準)

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。

<居住地域に重大な被害を及ぼす噴火の可能性>

山体内に規模の大きな地震が多発

多量のマグマ上昇を示す顕著な地殻変動等、従来観測されたことのないような規模の山体膨張を示す地殻変動

溶岩流（積雪期には融雪型火山泥流）が居住地域に到達する可能性

【レベル5】

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。

<居住地域に重大な被害を及ぼす噴火が切迫、あるいは発生>

溶岩流（積雪期には融雪型火山泥流）が居住地域に切迫

溶岩流（積雪期には融雪型火山泥流）、大きな噴石が居住地域に到達

(引き下げ基準)

各レベルに該当する現象が観測されなくなった場合には、活動状況を勘案しながら、必要に応じて火山噴火予知連絡会での検討結果も踏まえ、総合的に判断する。

(解説：判定基準)

草津白根山のマグマ噴火については、観測実績がないため詳細は不明であるので、他の火山の事例等を踏まえ、マグマの貫入に伴い、噴火の前兆現象としてこれまで観測されたことのないような山体の膨張を示す地殻変動や規模の大きな地震の多発等が想定されることから設定した。溶岩流については、居住地付近に到達するには数時間以上かかると考えられることから、状況をみながら判断することとした。

(解説：引き下げ基準)

引き下げについても観測実績がないので、火山活動の低下を確認した上で、必要に応じて火山噴火予知連絡会での検討結果も踏まえて、居住地域への影響を再評価した上で判断する。

(留意事項)

以上で示した基準のほか、これまで観測したことのないような観測データの変化や火山現象を観測した場合、新たな観測データが得られた場合は、それらも加味して評価した上でレベルを判断する。

5. 今後検討すべき課題

以上示した判定基準は、現時点での知見や監視体制を踏まえたものであり、今後、知見や監視体制の充実に合わせて、高度化していくことが重要である。特に、以下の各課題については、引き続き取り組み、判断基準の高度化を進める必要がある。

- (1) レベル2の判定基準については、1983年の事例のような噴火事例だけではなく、1990年や2011年、2014年のように活動の高まりがみられたが、噴火には至らなかった事例も、噴火発生の可能性がある事例として考え、判定基準設定の参考とした。今後は、これらの事例について、地殻変動や熱観測結果などを用いた物質収支や地下構造などにも注目し、判定基準をより精緻化していくことが重要である。
- (2) 草津白根山では、火山活動が高まると地震活動も高まる傾向がみられるが、どういった火山現象に起因するのかは、十分に理解されていない。例えば、草津白根山ではBT型地震も時折観測され、Nakano et al.,(2005)はそれらの周波数変化が熱水システムの変化によると推定している。今後、より適切に火山活動を監視・評価するためには、地震活動についても回数だけではなく、地震活動と火山現象を関連付けるためにも、波形の特徴と火山活動の関連などについても調査を進める。
- (3) レベル4以上の判定基準、特に融雪型火山泥流については、火山防災協議会における噴火時の避難計画等防災対応の検討をふまえながら、より具体的な数値基準を設定していく。
- (4) 平成28年12月より運用を開始した火口近傍のデータの活用等、新たな項目を判定基準に取り込む検討を続ける。特に、噴気や湖水の化学組成は火山の活動状態を示す指標となることから、今後、気象庁でどのように監視していくか検討して行く。
- (5) 噴火場所として、湯釜周辺を想定しているが、過去の噴火では弓池付近や本白根山でも噴火の記録がある。これらについては、活動の推移をみながら、適宜検討を加える。

参考文献

- 平林順一・大場武(1992)：草津白根山の地球科学的観測，第3回草津白根山の集中総合観測報告書，3-12.
- 平林順一(2000)：火山ガス放出量と火山活動，月刊地球，22，333-340.
- Nakano, M, H. Kumagai (2005): Response of a hydrothermal system to magmatic heat inferred from temporal variations in the complex frequencies of long-period events at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan. J. Volcanol. Geotherm. Res., 147, 233-244.
- Ossaka, J., T. Ozawa, T. Nomura, T. Ossaka, J. Hirabayashi, and A. Takaesu (1980): Variation of Chemical Compositions in Volcanic Gases and Waters at Kusatsu-Shirane Volcano and Its Activity in 1976. Bull. Volcanol., 43, 207-216.