

草津白根山（白根山（湯釜付近））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。有史以降の最も古い噴火は 1805 年の湯釜火口内で発生したもので、その後、1983 年まで白根山山頂火口（湯釜火口、水釜火口、涸釜火口及びその周辺を含む半径 500m の範囲（図 1）。以下、山頂火口という）で時折、火口周辺に大きな噴石を飛散させる程度の水蒸気噴火が発生している。また、2018 年 1 月には本白根山でも水蒸気噴火が発生している。

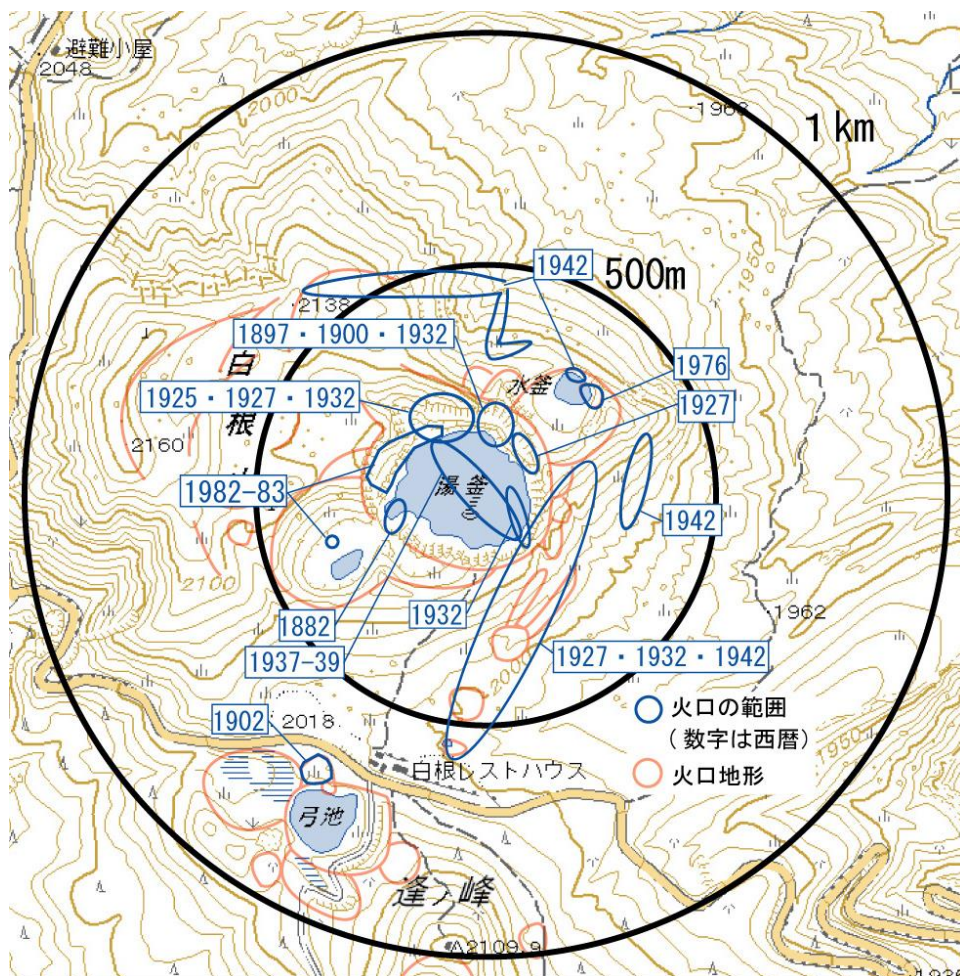


図 1 有史以降（1805 年～）の噴火口分布（水上（1984）、小坂他（1984）等）

これらのことを踏まえ、草津白根山（白根山（湯釜付近））の噴火警戒レベルでは、噴火場所などを以下のように想定した。

①噴火場所

草津白根山（白根山（湯釜付近））では有史以降の噴火の多くは山頂火口で発生していることから、噴火場所として、山頂火口を想定する。これ以外の弓池などの噴火場所については今後の課題とする。

②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	火口から概ね1 km 以内（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、融雪型火山泥流	火口から概ね2 km 以内（大きな噴石） 居住地域近くまでの沢沿い（融雪型火山泥流）	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、融雪型火山泥流	火口から概ね3 km 以内（大きな噴石） 火口から概ね7 km 以内（溶岩流） 沢沿いの居住地域（融雪型火山泥流）	約18000年前 白根火砕丘形成 有史以降の事例なし

- ・有史以降の水蒸気噴火について、大きな噴石は火口から概ね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」とは主として風の影響を受けずに弾道を描いて飛散するものことである
- ・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家屋の窓ガラスなどを破壊するなど被害をもたらすことがある。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。
- ・湯釜の南火口壁付近で噴火が発生した場合、火口壁が決壊して泥流（積雪期には融雪型火山泥流）が発生する可能性がある。

2. 火山活動の時間的な推移

平林（2000）によると、草津白根山（白根山（湯釜付近））山頂直下には、マグマ起源の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。

（1）水蒸気噴火

過去の水蒸気噴火（1982～1983年）や火山活動の高まり（1990～1991年、2011年、2014～2016年、2018年）は、マグマから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（図2）。マグマからの火山ガスの供給量が増加すると、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、また噴気中のガス組成の変化等（ $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 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、2018年1月に発生した本白根山の水蒸気噴火のように、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。

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。

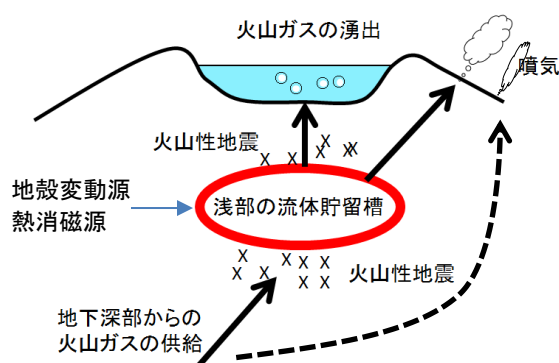


図2 火山活動から想定した草津白根山（白根山（湯釜付近））の浅部イメージ

（2）マグマ噴火

一方、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に感じる規模の地震多発等が予想されるが、白根山（湯釜付近）では、有史以降、事例はなく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大きな噴石を飛散させ、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

①レベル1（活火山であることに留意）

地震活動の高まりや湯釜の湖水の変色、湯釜火口内で水柱などが認められず、火山活動が極めて静穏な状態。もしくは、地震活動の高まりや湯釜の湖水の変色、湯釜火口内で水柱などが認められ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のあるものの静穏な状態。

②レベル2（火口周辺規制）

山頂火口の中心（湯釜火口）から概ね1 km 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。もしくは、山頂火口の中心（湯釜火口）から概ね1 km 以内に影響する小噴火が発生した状態。

③レベル3（入山規制）

山頂火口の中心（湯釜火口）から概ね2 km 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更に増加し、地震活動や地殻変動、湯釜湖面の急激かつ激しい変色など、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。

もしくは、山頂火口の中心（湯釜火口）から概ね2 km 以内に影響する中噴火が発生した状態。

④レベル4（避難準備）から5（避難）

マグマの上昇により、体に感じる規模の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の状態であっても、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、火山の状況に関する解説情報を発表する。

- ・湯釜火口の水柱、噴気地帯の噴気の活発化、新たな噴気や浮遊物（硫黄等）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（任意の24時間以内の地震回数が概ね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
- ・噴気や湖水の化学組成に高温の火山ガス成分の増加を示す明瞭な変化

(解説)

草津白根山（白根山（湯釜付近））では、レベル1で上記の現象が通常みられているが、上記の現象がいずれもみられない場合は、火山活動が極めて静穏な状態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の静穏時の状態から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)

<山頂火口から概ね1 km以内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。

- ①傾斜変動を伴う火山性微動（水釜北東観測点上下動で振幅概ね $50 \mu\text{m/s}$ 以上で継続時間概ね5分以上）の発生
- ②山頂火口付近浅部の地震活動の高まり（任意の24時間以内の地震回数が概ね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高温の火山ガス成分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>
- ③噴火により火口から概ね1 km以内に大きな噴石飛散

(引下げ基準)

噴火の発生がなく、地震活動が低調な状態に戻り、地殻変動や全磁力の観測データ及び火山ガスや湖水の化学的観測データから火山活動が静穏時の状態に戻る傾向が明瞭になったと判断してレベルを1に引き下げる。ただし、静穏時に戻る途中で、地震の増加など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に戻る。

(解説：判定基準)

2014年及び2018年の火山活動を踏まえ、湯釜付近の浅部について図2のようなイメージを想定し、一連の火山活動について以下のⅠ～Ⅴのステージで推移すると考えた。これらの事例では噴火に至らなかったものの、ステージⅠ～Ⅱでは特に噴火に至る可能性が高く、その後徐々に噴火の可能性は小さくなる。

- I 地下深部から流体貯留槽への火山ガスの供給量が増加する。火山性地震の多発や流体貯留槽の増圧による膨張を示すと考えられる地殻変動が現れる。
- II 流体貯留槽の熱水活動の活発化。流体貯留槽からの火山ガスの流出量が増加することで噴気・湖水の化学組成に高温の火山ガス成分の増加が現れる。全磁力観測では高温の火山ガスが供給されたことによる温度の上昇を示すと考えられる熱消磁傾向が現れる。
- III 流体貯留槽からの火山ガスの流出量の増加。湯釜湖水の湧出の活発化が顕著になるなど、流体貯留槽からの火山ガスの流出量の増加を示す変化が観測される。それに伴い、流体貯留槽の膨張を示す地殻変動や熱消磁を示す全磁力変化は鈍化し始める。
- IV 地下深部からの火山ガスの供給の減少。火山性地震の活動は低調な状態に戻る。膨張を示す地殻変動や熱消磁傾向を示す全磁力変化はさらに鈍化する。流体貯留槽からの火山ガスの流出は継続するため、湯釜湖水の化学組成は高温の火山ガス成分の比率の高い傾向が継続する。
- V 流体貯留槽からの火山ガスの流出量の減少。噴気や湯釜湖水の化学組成に高温の火山ガス成分の減少傾向がみられる。膨張を示す地殻変動は概ね停滞もしくは収縮を示す。全磁力観測では概ね停滞もしくは帯磁に転じる。

<山頂火口から概ね 1 km 以内に影響を及ぼす噴火の可能性>

- ①2011 年 5 月に火山性微動が発生したが、噴火は発生しなかった。ただし、これまでに発生した火山性微動と比較して規模が大きなことや火山性微動とともに傾斜変動を引き起こしたことから同様な火山性微動を想定した。
- ②草津白根山（白根山（湯釜付近））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、火山性地震の任意の 24 時間以内の回数が 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、噴気の化学組成に高温の火山ガス成分の増加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、1982 年 10 月の噴火事例のように、噴気の化学組成に高温の火山ガス成分の増加がみられているなか、地震活動が高まり噴火に至る場合もある。

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至る事例が、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>

- ③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した場合は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 に引き上げることにした。

(解説：引下げ基準)

レベル1への引下げは、流体貯留槽への火山ガスの供給量の低下した状態を想定している。その際は、噴火の発生がなく、地震活動は2週間以上にわたって任意の24時間の地震回数が10回未満で火山性微動が発生しないといった低調な状態となり、地殻変動が概ね停滞、全磁力観測で地下の温度の上昇を示す熱消磁の傾向が概ね停滞、噴気や湖水の化学組成において高温の火山ガス成分の減少を示す変化に転じるなど、静穏時に戻る傾向が明瞭になった場合にレベル2からレベル1へ引き下げる。

なお、噴気や湖水の化学組成で高温の火山ガス成分の減少を示す明らかな変化がみられ、地殻変動が収縮となり全磁力変化が帯磁傾向が続くといった静穏時の状態に戻るまでは、浅部の流体貯留槽の熱水活動はやや高まっている可能性が考えられるので、以下のような火山活動の再活発化がみられた場合は、レベル2に戻すこととした。

- ・火山性地震が任意の24時間以内に10回以上観測される
- ・火山性微動が発生する
- ・地殻変動が再び膨張に転じる
- ・全磁力が再び熱消磁に転じる
- ・噴気や湖水の化学組成に高温の火山ガス成分の急増を示す変化や噴気量の急増

【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>

- ① 噴火の拡大傾向（山頂火口から概ね1 kmを超えて大きな噴石の飛散が予想される）
- ② 振幅の大きな（水釜北東観測点上下動で振幅概ね $10 \mu\text{m/s}$ 以上）火山性地震の増加（任意の24時間以内の地震回数が概ね20回以上又は、1時間に5回以上）
- ③ 振幅の大きな火山性微動（水釜北東観測点上下動で振幅概ね $100 \mu\text{m/s}$ 以上で継続時間概ね5分以上）の発生
- ④ 山頂火口付近浅部の膨張を示す明瞭な地殻変動（ $1 \mu\text{rad/h}$ ）
- ⑤ 湯釜湖面で急激かつ非常に激しい変色活動（硫黄の浮遊等）
- ⑥ 噴火が発生し、泥流が発生、もしくは発生する可能性がある場合
- ⑦ 噴火が発生したが噴火の規模が不明な場合

<山頂火口から1～2 kmに影響を及ぼす噴火が発生>

- ⑧ 噴火により火口から1～2 kmの範囲に大きな噴石飛散

(引下げ基準)

上記現象がみられなくなった後1週間程度、活動の推移を観察し、火山性地震や火山性微動、地殻変動等に明らかに火山活動の低下が認められればレベル2に引下げを判断す

る。

規模不明の噴火発生では、現地調査をした後、影響範囲が1 kmを超えておらず、噴火の拡大傾向が認められない場合はレベル2に引き下げる。

(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（白根山（湯釜付近））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。

①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。

②③④⑤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急速に増加した場合、流体貯留槽付近の圧力や温度が急速に上昇し、振幅の大きな火山性地震の発生や振幅の大きな火山性微動の発生、山頂火口付近浅部の急速な膨張を示す明瞭な地殻変動が観測されることが想定される。また、流体貯留槽への供給に先行して噴気の中に含まれる硫化水素ガス成分の急激かつ継続的な減少や、流体貯留槽に供給されつつ湯釜湖水に漏れ出す流体からのマグマ由来の成分の急速な供給によって、湖水の化学組成の顕著な変化や、湖面の一部が黒く変色した1989年1月の活動の規模を大きく上回るような湯釜湖面の急激かつ非常に激しい変色活動（大量の硫黄等の浮遊）も観測されることが想定されることから設定した。ただし、火山性微動の振幅が基準に達した場合に、火山性微動の振動源や傾斜の変動源から、明らかに湯釜付近の火山活動ではないと特定できる場合を除くこととする。

⑥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。

⑦噴火が発生しても、雲に覆われている状況や即時に大きな噴石が概ね1 km を超えているかどうかをすぐに判別できない場合は、明らかに湯釜火口内にとどまっていると判断されるごく小規模な噴火を除き、一旦レベルを3へ引き上げることとした。

<山頂火口から1～2 km 以内に影響を及ぼす噴火が発生>

⑧有史以降、草津白根山（白根山（湯釜付近））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：引下げ基準)

流体貯留槽に急速に火山ガスが供給されたものの、その後供給量が減少し、流体貯留槽から徐々に火山ガスが漏れ出すことにより内部圧力が減少すれば、山頂火口から1～2 kmに影響を及ぼす噴火の発生の可能性は低下すると考えられる。上記の状態になっているかどうか、火山活動を1週間程度注視した上で判断することにした。

噴火の規模が不明なため一旦レベル3に引き上げたが、現地調査により噴火の規模が判明し、大きな噴石の影響範囲が1 kmを超えておらず、尚且つ噴火の拡大傾向が認められない場合はレベル2に引き下げるものとする。また、噴火が発生しても流体貯留槽の更なる膨張等がなければ、山頂火口から1～2 kmに影響を及ぼす噴火が発生の可能性が低いと考えられるため、火山活動を1週間程度注視した上でレベル引下げを判断することにした。

【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>

- ① 山体内で規模の大きな地震が多発
- ② 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
- ③ 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】

(判定基準)

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>

- ①溶岩流（積雪期には融雪型火山泥流）が居住地域に切迫
- ②溶岩流（積雪期には融雪型火山泥流）が居住地域に到達
- ③概ね3 km以内に大きな噴石が飛散するような噴火が切迫
- ④噴火が発生し、概ね3 km以内に大きな噴石の飛散

(引下げ基準)

レベル4及びレベル5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（白根山（湯釜付近））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、状況を見ながら判断することとした。また、3000年前の本白根山の噴火で、大きな噴石が火口から3 km 付近に飛散した事例があり、同様の噴火を想定し判定基準に加えている。

(解説：引下げ基準)

引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及び3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、2018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。また、数値基準については、その設定が適切であるか常に検討し、活動の推移によって適宜改定していく。
- (2) 草津白根山（白根山（湯釜付近））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、火山性地震の発生原因については、十分に理解されていない。また、草津白根山では、山頂火口付近以外にも逢ノ峰付近や山田峠付近でも地震活動がみられているが、それらと火山活動との関連性についても不明である。今後、より適切に火山活動を監視・評価するためには、地震回数だけではなく、活動ステージに応じてどのような地震活動がみられるか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踏まえながら、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いく。
- (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。
 - (6) 火山活動推移のイメージは現在の知見に基づく想定であり、想定とは異なる現象が起こる可能性がある。新たな知見や観測データが得られる度に再検討する必要がある。
 - (7) 火砕流に関して、有史以降の事例がないため想定される現象に含めていないが、今後検討を行う必要がある。

参考文献

- 早川由紀夫・由井将雄 (1989) : 草津白根山の噴火史 第四研究, 28, 1-17.
- 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.
- 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.
- 小坂丈予 (1984) : 温泉 (火山ガス). 草津温泉誌 自然・科学編 I (草津町役場), 97-172.
- 水上武 (1984) : 草津白根山. 草津温泉誌 自然・科学編 I (草津町役場), 35-95.