

平成 19 年 12 月 1 日運用開始
平成 28 年 12 月 20 日現在
気 象 庁

阿蘇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

(1) 噴火場所

中岳火口

阿蘇山の有史以来の噴火の大部分は中岳火口で発生している。阿蘇山で近代的な火山観測が開始された 1931 年頃は、第 1、第 2、第 4 火口が噴火をしており、1929 年までは第 4 火口が活発であったとされるが、1930 年以降第 4 火口、1934 年以降は第 2 火口の活動が衰え、その後現在まで第 1 火口のみが活動している。また、約 4800 年前には溶岩を流出している。

中岳火口以外

1816 年に湯ノ谷温泉で水蒸気噴火が発生し、人的被害があった。また、過去 1 万年間では、杵島岳や往生岳等から噴火が発生し、溶岩を流出している。これらの場所からの噴火については、噴火警戒レベルは設定されていないが、阿蘇山の火山噴火緊急減災対策砂防計画検討委員会での議論の状況も踏まえ、今後さらに検討していく必要がある。

(2) 噴火の区分とその影響

噴火規模	火山現象	影響範囲
ごく小規模噴火	火山灰、小さな噴石	火口近傍
小規模噴火	上記に加え、 <u>大きな噴石</u> 、 <u>空振</u> 、 <u>火砕流</u> （または火砕サージ）、 <u>降雨による土石流</u>	火口から概ね 1 km 以内
中規模噴火		火口から概ね 1 km を超え、概ね 4 km 以内
大規模な噴火	上記に加え、 <u>溶岩流</u>	居住地域に達する

- ・ 噴火の規模表現は、火山学的な噴火規模（噴出物量）とは異なり、弾道を描いて飛散する大きな噴石、火砕流等の到達する範囲（影響範囲）を基準に設定している。
- ・ 火山灰や小さな噴石は、風に乗って影響範囲を超えて広範囲に到達することがある。空振も、影響範囲を超えて広範囲に伝わる。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。
- ・ 噴火警戒レベルは、噴火に伴って発生し、生命に危険を及ぼす火山現象（発生から短時間で火口周辺や居住地域に到達し、避難までの時間的猶予がほとんどない現象、上表に下線で示した現象）の危険が及ぶ範囲をもとに設定している。
- ・ 以上のほか、火山灰等が火口内にとどまるような土砂の噴出（「土砂噴出」、「土砂噴」と呼ぶことがある）がみられることがある。火口から外に火山灰が放出された場合に、「噴火」と記録することとしている。

(3) 爆発的噴火の基準

上述の噴火の区分とは別に「爆発的噴火」という呼称を使うことがある。阿蘇山における爆発的噴火とは、爆発地震があり、古坊中（火口から約1 km）の観測点で30Pa以上の空振、もしくは仙酔峡（火口から約2 km）の観測点で20Pa以上の空振を伴うものとしている。

2. 火山活動の時間的な推移

阿蘇山の噴火警戒レベルは、主に過去の噴火活動における時間的推移から作成した噴火シナリオに基づいて設定した。また、必要に応じて他の火山における噴火活動の推移を参考にした。

(1) 中岳火口の活動

これまでの観測成果により、典型的な活動経過は次の通りであることがわかっている。

火山活動が静穏な時期には、第1火口に緑色の湯だまりが存在している。火山活動が高まるにつれ、地下からの熱によって湯だまりの温度上昇や湯量の減少、さらには小規模な土砂噴出が始まる。規模が大きな場合には、火口から外にも土砂や火山灰を放出する、ごく小規模～小規模噴火が発生するようになる。本格的な噴火活動に移行すると、湯だまりは消失し、ストロンボリ式噴火と呼ばれる赤熱した噴石を間歇的に放出する噴火が起きることがある。火山活動が高まっている段階で、爆発的噴火が発生することもある。爆発的噴火では、大きな噴石に加え、火砕流（火砕サージ）を発生させることもある。

以上のような表面現象の変化に加え、火山活動の盛衰に伴って、火山性微動（以下、「微動」という。）の頻度や振幅が変動することが知られている。一般に、活動の高まりに伴って微動の振幅が増大するが、火口が閉塞し、微動の振幅が急激に小さく（微動停止現象）なった後に、爆発的噴火が発生することもある。近年、GNSS観測で草千里付近直下にあるマグマだまりの膨張収縮が観測されたり、火山ガス観測で二酸化硫黄の放出量の増減なども観測できるようになっており、活動評価に利用している。

観測開始以来最大規模の噴火は、1932～33年の噴火で、第1火口だけでなく、第2火口でも噴火が発生、火口にマグマプールの出現したが、火口外にあふれ出ることはなかった。しかし、このような活動がさらに活発化した場合には、約4800年前の噴火のように溶岩の流出が始まり、居住地域に迫ることも想定される。

(2) 中岳火口以外の場所での活動

観測開始以降、噴火活動はなく詳細な時間推移は不明であるが、他の火山での経験等を踏まえて、次のような経過が想定されている。

現在、噴気活動がある地獄・湯ノ谷地熱帯については、活動の活発化により、噴気が増大、温泉の湯量や温度変化、局所的な地殻変動などが検出されると考えられる。さらに活発化すると水蒸気噴火が発生し、噴石の飛散や火山灰を噴出する。また、地すべりや土石流のリスクが高まっていく。

長期にわたって火山活動の兆候のない杵島岳、往生岳、米塚付近については、多くの火山で

見られる（マグマ噴火に至る）一般的な推移を想定している。それは、地震活動の活発化や地盤の隆起に始まり、地震の多発、微動の発生、地磁気の変化や噴気の発生などを経て、小規模噴火が発生し、さらには本格的なマグマ噴火（溶岩流出や噴石・スコリア丘の形成）に至る、というものである。

3. 噴火警戒レベルの区分け

現時点で噴火警戒レベルが設定されているのは中岳火口からの噴火のみである。

（１）レベル１（活火山であることに留意）

静穏な火山活動。若干の火山性地震、微動の発生はありうる。中岳火口の場合、火口内にとどまる程度の土砂噴出等の可能性がある。

（２）レベル２（火口周辺規制）

火口から 1 km 以内に影響する小規模噴火の可能性がある。中岳火口の場合、火口内の顕著な温度上昇、湯だまり量が減少、ごく小規模～小規模な噴火の発生など、火山活動が高まった状態を指す。

（３）レベル３（入山規制）

火口から 1 km を超えた範囲に影響する中規模噴火の可能性がある。近代的な観測を開始した 1930 年代以降では、大きな噴石や火砕流（火砕サージ）は、最遠で約 1.5km まで達している。

（４）レベル４（避難準備）から５（避難）

レベル３の段階から、噴火活動がさらに活発化、あるいは活発化すると想定される現象が観測され、居住地域に噴火による重大な災害を及ぼす現象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２】

（判定基準）

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。

<火口周辺に影響を及ぼす噴火の可能性>

（１）次のいずれかが観測された場合

火山性微動の振幅増大（中岳西山腹観測点 NS 成分で 1 分平均振幅 $2.5 \mu\text{m/s}$ 以上が 1 時間以上継続）

規模の大きな火山性微動（現地で震度 1 相当以上）の発生

土砂噴出活発化（中規模以上（高さ 30m 以上））

（２）以下の現象が複数項目観測された場合

・火山ガス（二酸化硫黄）の 1 日あたりの放出量が概ね 1,500 トン以上

・火山性微動（中岳西山腹観測点 NS 成分の 1 分間平均振幅 $1.5 \mu\text{m/s}$ 以上）が 1 時間以上継続

- ・湯だまりの量が急激に減少または消失（量 = 3 割以下、火山性微動や表面現象を伴わないままゆっくり減少、または消失した場合を除く）
- ・火口底赤熱（火口底の 3 割以上）
- ・山体膨張を示す地殻変動（GNSS 等で観測される比較的緩やかな地殻変動）
- ・中岳火口（中岳第 1 火口以外）で熱異常域の発現

< 火口周辺に影響を及ぼす噴火が発生 >

- ・大きな噴石が飛散（火口から半径 1 km 以内、火口内も含む）

（引き下げ基準）

レベル 2 の引き上げ基準に達しない活動が概ね 1 ヶ月続いたときを基本とするが、活動状況によってはレベル下げの期間を短縮（最短 3 日目から検討を始める）する。

（解説：判定基準）

中岳火口における火山活動が高まった際に観測される現象について、過去の観測データに基づき、火山活動が高まっていると判断される期間について、レベル 2 以上に判定できるように、それぞれの観測項目の閾値を設定している。

< 火口周辺に影響を及ぼす噴火の可能性 >

（ 1 ）

火山活動が活発化すると、火山性微動の振幅が次第に増大することが知られている。過去の観測データから、一定以上の振幅になった時点でレベルを引き上げることとする。

阿蘇山では、静穏期でも孤立型微動と呼ばれる別種の微動が多発することがあるが、それだけで即座に噴火につながることはない。ただし、規模の大きな単発的な微動は噴火に伴って発生する場合があることから、現地で震度 1 以上となる微動発生時にはレベルを引き上げることとする。

活動が活発化すると、湯だまりの湯量が減少し、土砂を噴き上げるようになる。規模が小さい場合、それ自体が火口周辺に危険を及ぼすことはないが、規模が大きくなると火口周辺に危険をもたらすので、一定以上の規模になった時点でレベルを引き上げることとする。

（ 2 ）（ 1 ）で示した現象は明らかな火山活動の高まりを示し、それぞれの現象のいずれかひとつが発生した場合にレベルを引き上げる。一方、これらの条件を満たさない程度の観測データの変化についても、判定基準に加えている。火山ガス（二酸化硫黄）の放出量増加や微動の 1 分間平均振幅の増大（上記の（ 1 ） に達しない程度）など、その他の現象が複数項目観測された場合にも、レベルを引き上げることとする。例えば、GNSS 等で山体膨張を示す地殻変動は、マグマだまりの膨張を示すことがあり、そのみでレベルを引き上げることはしないが、その他のデータに変化が現れた場合にはレベルを引き上げることとしている。

なお、1934 年以前には、中岳第 1 火口以外からの噴火も発生している。中岳第 1 火口以

外の場所で火口底に熱異常域が現れることは、地下での熱活動の高まりを示しており、中岳第1火口以外の火口からの噴火が想定されることからレベルを引き上げることとする。

<火口周辺に影響を及ぼす噴火が発生>

・一般に突発的な噴火は完全に予測できるものではなく、火口周辺に影響するような小規模な噴火が発生すれば、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する。

(解説：引き下げ基準)

レベル2の段階で、レベル2の引き上げ基準で示した現象が全て基準以下となって1ヶ月を経過し、その他のデータにも高まりが見られない場合は、レベル1に引き下げる。ただし、GNSS等で観測される比較的な緩やかな地殻変動は、中期的な活動の高まりを示すことから、それが収まることをレベル引き下げの条件とはしない。

過去の活動を見ると、レベル上げの判定基準を下回った直後は、しばらくの間は活動が不安定な状態が続く。一見静穏に戻っても短期間で再び活動が活発化、場合によっては噴火が発生することがある。過去データを用いたシミュレーション結果から、レベル上げの判定基準を下回った後も1ヶ月程度様子を見る期間をおくことが妥当であることがわかっており、1ヶ月様子を見て、その他のデータにも高まりが見られない場合は、レベル1に引き下げる。ただし、それよりも早い段階で判断できるケースもある。例えば大量の降水があって湯だまりが一気に回復して静穏化するようなケースや、土砂噴出(噴石を含まない)等のごく小規模噴火や小規模噴火が発生した場合でも、他の観測データに活動の高まりが全く見られず、一時的な現象であると判断できれば、1ヶ月を経るまでもなく、より短い期間(最短3日目から検討を始める)でレベル下げを判断することもある。

【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。警戒が必要な範囲は、火口から2km以内を原則とするが、大きな噴石の飛散距離や火砕流の到達距離によっては、さらに広げることもある。

<火口から概ね2km以内、状況により概ね4km以内に影響を及ぼす噴火の可能性>

(1) 次のいずれかが観測された場合

- ・噴火活動中に火山性微動が概ね3時間以上停止
- ・規模の大きな火山性地震(現地で震度1相当以上)の多発
- ・火口底の赤熱現象の急激な進行
- ・火山性微動の振幅増大や火山性地震の多発と同時に火口直下の増圧を示す急激で顕著な地殻変動(概ね $0.1 \mu\text{rad/h}$ 以上の傾斜変化等)

(2) レベル2への引き上げ基準を満たす現象が観測される中、加えて以下の現象が複数観測された場合

火山ガス(二酸化硫黄)の1日あたりの放出量が概ね2,000トンを超えて急激に増加傾向(2~3倍程度)

火山性微動の急激な振幅増大(中岳西山腹観測点NS成分で1分平均振幅4 $\mu\text{m/s}$ 以上)または震動振幅の不安定な変化

火口直下の増圧を示す急速な地殻変動(概ね0.02 $\mu\text{rad/h}$ 以上の傾斜変化等)

長周期パルス(周期20秒程度。広帯域地震計:30 $\mu\text{m/s}$ 程度、傾斜計:0.3 μrad 程度)の発生

<火口から1kmを超え、概ね4km以内に影響を及ぼす噴火が発生>

- ・火口から半径1km以遠に大きな噴石飛散、火砕流等
- ・古坊中の空振計で150Pa以上の空振を伴う爆発的噴火の発生

(引き下げ基準)

火孔閉塞と思われる噴火活動中の火山性微動の停止に伴い、レベル3に引き上げた場合には、火山性微動が再開もしくは小規模噴火が発生して閉塞が解消された場合に引き下げを検討する。その他の要因でレベル3に引き上げた時は、上記のレベル3への引き上げ基準を下回ってから2週間後を基本とする。

(解説:判定基準)

阿蘇山で発生する中規模噴火(火口から1km以上大きな噴石を飛散、または、火砕流が1kmを超える)の可能性がある場合、もしくは、発生した場合をレベル3の判定基準としている。

<火口から概ね2km以内、状況により概ね4km以内に影響を及ぼす噴火の可能性>

(1) 過去の中規模噴火の際には、土砂の流れ込み等の影響で火孔が閉塞して、爆発的な噴火に至ったケースがある。そういった場合、微動の振幅が急激に低下する現象が見られることがある。そのような場合には、レベルを3に引き上げることとする。ただし、噴火が継続している場合に限り、噴火が断続的に起きている場合には適用しない。

中岳で繰り返し観測されている火山活動の高まりと比較して、さらに急速なマグマの貫入、上昇を示す顕著な現象が現れた場合、より規模の大きい噴火が発生するおそれも考えられることから、速やかにレベル3への引き上げや状況に応じて、警戒が必要な範囲を広めることとする。具体的には、有感規模の火山性地震の多発、急激な火口底の赤熱、微動の振幅増大や火山性地震の多発と同時に古坊中の傾斜計で0.1 $\mu\text{rad/h}$ 程度(火口直下2kmで約4,000 m^3/h のマグマ貫入に相当)かそれ以上の顕著な地殻変動のうちの一つでも認められた場合には、レベルを引き上げることとする。

(2) 中岳では本格的なマグマ噴火時以外にも山体の緩やかな膨張が GNSS で観測されたり二酸化硫黄の放出量が増加する等の火山活動の高まりがみられたりするときには、水蒸気噴火やマグマ水蒸気噴火がしばしば発生している。けれども、大きな噴石や火砕流が火口から 1km を超えるか否かをあらかじめ予測することは容易ではない。

しかしながら、各種データがそろっている 2014 年以降の活動、特に、2016 年 10 月 8 日 01 時 46 分の爆発的噴火（大きな噴石が火口から 1km を超えて飛散したレベル 3 に相当する噴火）の前には、レベル 2 の判定基準を満たした状態から新たに火山活動の高まりを示す複数の現象が見られた。具体的には、GNSS でゆっくりとした山体膨張が見られ、二酸化硫黄放出量が急激に増加し、中岳火口下の増圧を示唆する傾斜変動（やや深部では山上がり、直下では山下がり）が検知された。

また、火山性微動振幅が徐々に増大したあと、噴火前には B 型地震が多発し、平均振幅が不安定に変動した。さらに、噴火直前には長周期パルスが観測された。噴火後には、多い状態ながらも二酸化硫黄の放出量は 2,000 トン前後で安定しており、地震や地殻変動にも地下で内圧が高まることを示す急激な変化はみられない。

この事例を参考に、以下のように閾値を設定することとし、これらに類似した現象が複数観測された場合にはレベル 3 へ引き上げることとしている。

阿蘇山でレベル 2 の火山活動時には、二酸化硫黄の放出量が一日あたり概ね 1,000 ~ 2,000 トンで経過しており、多いときでも 4,000 トンに達していない。2016 年 10 月 8 日の爆発的噴火前には、9 月 27 日に 2,100 トン（参考値 2016 年 10 月 6 日に 1,800 トン）から 10 月 7 日に 15,000 トンと 7 倍に急激に増加した。

10 月 7 日 10 時頃から微動振幅の急激な増大が始まり、11 時 10 分頃に中岳西山腹観測点 NS 成分で 1 分間平均振幅が $4 \mu\text{m/s}$ 以上となった。その後、微動振幅はやや低下したが 17 時 20 分頃から再び 1 分間平均振幅が $4 \mu\text{m/s}$ 以上となり徐々に大きくなっていった。その後 22 時 50 分頃から 8 日 01 時 10 分頃まで B 型地震の多発により 1 分間平均振幅が $10 \mu\text{m/s}$ 程度から $4 \mu\text{m/s}$ 程度まで不安定に変動した。

10 月 7 日 23 時 41 分から 8 日 01 時 11 分に古坊中傾斜計の東西成分で火口方向成分が隆起する $0.039 \mu\text{rad}$ の傾斜変動が認められた。隆起速度は、 $0.026 \mu\text{rad/h}$ であった。なお、火口直下の増圧は、古坊中傾斜計では火口方向成分が隆起する変化をする場合と逆の場合があることに注意が必要である。

噴火 5 分前に長周期パルス（古坊中の広帯域地震計で周期 20 秒程度、 $39 \mu\text{m/s}$ 、古坊中の傾斜計で $0.3 \mu\text{rad}$ ）が発生した。2014 年以降振幅が $20 \mu\text{m/s}$ を超える長周期パルスは、2014 年 11 月 28 日と 2015 年 10 月 23 日と 2016 年 10 月 8 日に観測している。このうち 2014 年 11 月 28 日のものは振幅が $30 \mu\text{m/s}$ であったが、傾斜計では観測されておらず火山性のものではなかった可能性がある。また 2015 年 10 月 23 日のものは、噴火と同時に発生したが、振幅は $22 \mu\text{m/s}$ と今回より小さなもので、大きな噴石の飛散は火口から 1 km 以内であった。

上記の現象が複数観測された場合には、速やかにレベル3への引き上げや状況に応じて警戒が必要な範囲を広めることとするが、これらの現象が観測されても噴火までの猶予時間がほとんどないものもあることに注意が必要である。それぞれの判定基準の数値は今後のデータの蓄積により随時見直すこととする。

< 火口から 1 km を超え、概ね 4 km 以内に影響を及ぼす噴火が発生 >

- ・前述のとおり、阿蘇山において大きな噴石や火砕流が火口から 1km を超えるか否かをあらかじめ予測することは難しい。レベル1もしくは2で、大きな噴石や火砕流が火口から 1km を超える噴火が発生した場合、または、天候等の状況により噴火による大きな噴石や火砕流が直接確認できない場合に古坊中（火口から約 1 km）で 150Pa 以上の空振を伴う爆発的噴火が発生した場合にはそれが判明次第速やかにレベル3に引き上げることとしている。これは、2016年10月8日の噴火で古坊中の空振計で 189Pa を観測したことや桜島では、3合目（火口から 1,300m ~ 1,800m）まで大きな噴石が達した時の9割の噴火で、火口から約 4 km の空振計で 40Pa（火口からの距離を考慮するとほぼ同等の振幅）以上の空振を観測していることも考慮し設定したものである。

（解説：引き下げ基準）

火孔閉塞と思われる噴火活動中の火山性微動の停止に伴い、レベル3に引き上げた場合で、微動が再開もしくは小規模噴火が発生して閉塞が解消され内圧の高まりがなくなるような現象が観測された場合には引き下げの検討を開始する。また、大きな噴石や火砕流が火口から 1km を超えた可能性があるとしてレベルを引き上げ、実際には火口から 1km 以内にとどまっていた場合も同様とする。

ただし、1958年6月24日の火砕サージを伴う水蒸気噴火時の事例では、直前は12日間の微動停止状態であったことがわかっている。そのため、閉塞が解消され内圧の高まりが解消されたと判断された場合を除き、2週間程度は様子を見ることとし、傾斜計の変化の解消や火山性微動の振幅の低下、長周期パルスが無発生、二酸化硫黄の放出量に急激な増減がない場合等、火山活動の低下が確認された場合には、レベルを下げる。

【レベル4】

（判定基準）

< 居住地域に噴火による重大な災害を及ぼす現象の可能性 >

- ・溶岩流が居住地域に到達する可能性

【レベル5】

（判定基準）

< 居住地域に噴火による重大な災害を及ぼす現象が切迫 >

- ・溶岩流が居住地域に切迫

(引き下げ基準)

各レベルに該当する現象がみられなくなるなど、観測データに活動低下が認められた場合には、必要に応じて火山噴火予知連絡会等の検討結果も踏まえながら、火山活動を評価した上で判断する。

(解説：判定基準)

最も近い居住地域でも、中岳火口から4 km以上離れている。火山防災マップ(噴火による影響範囲)では、火砕流の到達距離は火口から概ね4 kmとしているが、溶岩流は居住地域に達することも想定されている。噴火警戒レベルについても、溶岩流が居住地域に到達するおそれがある場合にレベル4、居住地域まで到達することが避けられなくなった場合にレベル5とする。

(解説：引き下げ基準)

引き下げについては、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や他の有識者との検討会等の検討結果も参考にしながら、居住地域への影響を再評価した上で判断することとする。

以上で示した基準のほか、これまで観測されたことのないような観測データの変化があった場合や新たな観測データが得られて総合的に評価した上でレベルを判断することもある。

また、上記に示した基準は、過去のデータに基づき、阿蘇山で想定される火山活動に基づいて定めている。火山活動が新たなステージになった場合など、火山活動の状況に応じて随時見直すこととする。

なお、レベルの引き上げ基準に達しない程度の火山活動の高まりや変化が認められた場合(例えばレベル1の状況において、小規模な土砂噴出(30m未満)や孤立型微動の増加(200回/日以上が3日以上継続)等)には、臨時的「火山の状況に関する解説情報」を公表することで、火山の活動状況や警戒事項をお知らせする。

5. 中岳火口以外の場所における火山活動の活発化、あるいは噴火の場合

噴火警戒レベルは運用していないが、火山噴火緊急減災対策砂防計画検討委員会で検討されている。火山活動に関係すると考えられる現象が観測された場合は、臨時的に観測を強化するとともに、その後の火山活動の推移や検討委員会の議論の状況に基づいた防災対応を支援する情報提供を行っていく。

6. 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、今後随時見直しをしていくこととする。特に、以下の各課題については、引き続き取り組み、判断基準の改善

を進める必要がある。また、阿蘇山の火山活動について新たな知見が得られればそれを積極的に取り入れていくこととする。

- (1) 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必要がある。
- (2) 火山噴火緊急減災砂防計画検討委員会では、地獄～湯ノ谷地熱帯及び杵島岳、往生岳、米塚付近からの噴火も検討されている。

しかし、現在の噴火警戒レベルは、中岳火口及びその近傍からの噴火に対して設定されたものであり、中岳火口以外からの噴火は含まれていない。地獄・湯ノ谷地熱帯の水蒸気噴火や杵島岳・往生岳、米塚付近の大規模噴火では居住地域に影響が及ぶことも想定されていることから、今後これらの場所を想定した対策についても検討していく必要がある。