

那須岳地域の新たな火山防災に向けて
– 噴火シナリオとリスク評価の検証結果から –

中村 洋一*・鈴木 美香**・棚田 俊收***

Towards the New Mitigation System of Nasu Volcano Area, Japan
– Based on the evaluation of event-tree diagram and risk-assessment –

Yoichi NAKAMURA*, Mika SUZUKI**, and Toshikazu TANADA***

*** *Utsunomiya University, Japan*

*** *Volcano Disaster Resilience Research Division,*

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan

Abstract

Nasu volcano is an active volcano located in approximate 150 km north from capital city Tokyo. According to historic records, a huge lahar, i.e. volcanic mudflow, due to the melted snow, was to cause more than 180 casualties during the 1408–1410 eruption of Nasu volcano. In order to consider volcanic disaster mitigation, hazards risk-assessments are conducted in the Nasu volcano area. The assessment results have clearly shown that the dense zone of tourist hotels, 10–20 km far from the summit, is very high-risk area of pyroclastic flows and lahars assumed by published hazard maps. As refereeing the present evaluation of event-tree diagram and risk-assessment results, the effective evacuation system is urgently required for over five million of visiting tourists before the future eruption of Nasu volcano.

Key words: Volcanoes disasters, Volcanic risk assessment, Disaster prevention, Nasu volcano

1. はじめに

那須岳地域には那須岳などの第四紀火山が関東平野北端に南北に分布し、全体として那須火山群と称されている。このうち那須岳(茶臼岳)は約 1.6 万年前の活動開始後から活動が繰り返され、1408–1410 年噴火の災害では犠牲者約 180 人などの被害が発生している。那須岳(図 1)は気象庁により活火山(活動実績: 1 万年活動指数 8.0, 100 年活動指数 2.0)に指定され、気象庁や防災科学技術研究所などにより常時観測体制がとられている。那須岳地域は国立公園に指定されていて、温泉宿泊施設、別荘分譲地、大型レジャー施設などが多数分布する国内有数の観光地域である。



図 1 那須岳(茶臼岳)山頂
山頂付近を西側から見る(那須町提供)。

Fig. 1 Summit of Nasu volcano.
View from the west.

* 宇都宮大学

** 宇都宮大学(現: 埼玉県立滑川総合高等学校)

*** 国立研究開発法人 防災科学技術研究所

わが国の活火山地域の多くはこの那須岳地域と同様に、火口近傍から周辺地域まで生活空間となっているため、噴火活動による災害リスクが高い地域でもある。こうした活火山地域で減災効果のある火山防災体制のあり方を検討することは、火山国であるわが国の重要な課題の1つである。そこで、那須岳地域をとりあげて、噴火イベントツリー・噴火シナリオ作成や火山災害リスク評価を実施して、火山防災対応の検討をすすめることにした。これらの成果は、他の活火山地域における今後の火山防災体制の検討のための貴重な事例となり、わが国における新たな火山防災体制の構築をすすめるための有効な資料となる。

2. 那須岳の噴火活動の履歴

2.1 那須火山群の形成史

那須岳地域は、福島県南部から栃木県北部までの地域に位置し、南北で約 25 km、東西で約 10 km の地域に第四紀火山が分布しており(図 2)、全体として那須火山群と総称されている(伴, 1993 など)。那須火山群の形成史は、北部地域で約 50 万年前に甲子旭岳(1,835 m)が活動を開始し、この南部地域で約 40–30 万年前に三本槍岳(1,917 m)が活動を開始した。約 20–10 万年前に朝日岳(1,896 m)と南部の南月山(1,776 m)が活動を開始した(伴・高岡,

1995;山元・伴, 1997;Ban and Yamamoto, 2002 など)。最新の活動は最南端よりやや北部に位置する那須岳(1,915 m)の活動で、約 1.6 万年前に活動を開始して現在に至っている。那須火山群のそれぞれの火山は



図 2 那須岳(茶臼岳)と那須火山群の火山(国土地理院数値地図を使用)

Fig. 2 Volcanoes of Nasudake Volcanic group (Modified from the map of Geospatial Information Authority of Japan).

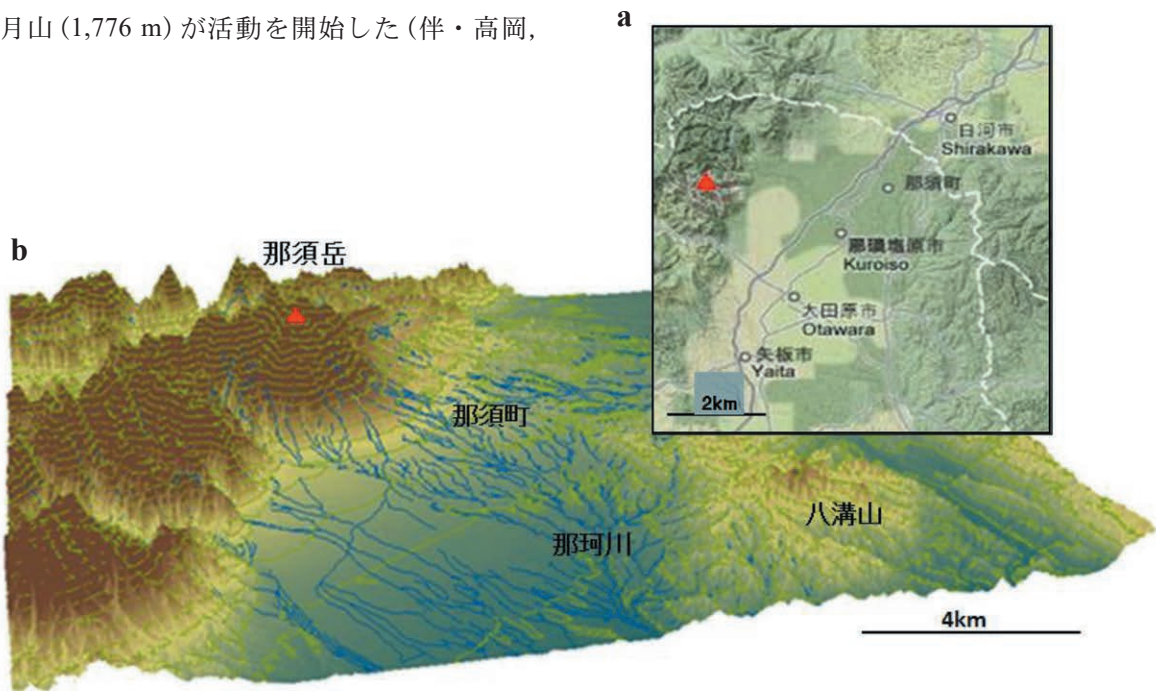


図 3 那須岳火山の位置と地形

a 那須岳火山の位置, b 那須岳地域の地形(国土地理院数値地図を使用して ArcGIS で作成)

Fig. 3 Location and topography of Nasu volcano.

a Location of Nasu volcano, b Topography of Nasu volcanic area (Drawn by ArcGIS)

典型的な成層火山地形を示さないが、全体として南北に伸びた山稜をもつ火山地形となっている。この那須火山群は東北日本に連なる火山フロント上に位置している。那須火山群の西側は脊梁山脈で、南東には八溝山地が分布し、北西から南東方向に展開した那須野ヶ原地域に那須岳の火山噴出物が分布している。那須岳の南東麓地域に、那珂川水系である黒川、余笹川、箒川などが北西から南東へ流走している(図3)。

2.2 那須岳の噴火活動史

最も新しい那須岳の活動は、朝日岳の東に開く大きな山体崩壊の凹地形の中から開始された(伴・高岡, 1995; 尾関ほか, 1996; 山元・伴, 1997)。那須岳の最初の噴火活動は安山岩質マグマによるブルカノ式噴火で、最も規模の大きい活動であった。噴出物の降下火砕物は山頂から約10 kmで層厚30 cm以上堆積し、火砕流は最大約10 km流下し、溶岩流の流出があった。この後の約1.1万年前には降下火砕物、火砕流、溶岩流を噴出する活動があった。約8千年前には降下火砕物、火砕流、溶岩流を噴出して、現在の山体の大部分が形成された。約6千年前には水蒸気噴火があり、この後は数百年に1回の水蒸気噴火が繰り返された。約2.6千年前に規模の大きな噴火活動で山頂地域での火砕丘が形成された。この後、1408-1410年の大規模噴火があったが(下記に噴火経過を詳述)、その後の活動では水蒸気噴火の小噴火などが繰り返された(表1)。この間の噴

火活動の噴火規模をみると、噴火規模がVEI 5以上の噴火履歴はなく、マグマ噴火(VEI 3程度)が8回、水蒸気噴火(VEI 1~2程度)が約10回繰り返された。なお、本稿での噴火規模の尺度にはVEI (Newhall and Self, 1982)を用いる。

2.3 1408-1410年の噴火活動

1408(応永15)年2月24日に規模の大きい水蒸気噴火が発生した(表2)。降下火砕物の岩石換算体積は $7.5 \times 10^{-3} \text{ km}^3$ (噴出物体積を 2.5 g/cm^3 で変換した値)と推定される(尾関ほか, 1996; 山元・伴, 1997など)。火口付近の熱水変質による硫化変質物が降下して、那珂川などの河川水が黄変した。那須岳から5 km程度離れた東山麓でも堆積物の確認ができる(山元, 1997など)。また、那須岳北側の峰の茶屋から明礬沢上流部では変質火山灰の多い土石流堆積物が確認される。

1410(応永17)年1月21日には噴火活動が再開し、鳴動や噴石を伴う噴火が発生した。この噴火活動ではブルカノ式噴火(噴火活動での規模はVEI 3)による火砕物の大量放出(岩石換算体積は $3.6 \times 10^{-2} \text{ km}^3$)があったと推測される(山元・伴, 1997; Ban and Yamamoto, 2002)。この噴火活動に続いて山頂火口からの溶岩の流出があり、山頂には溶岩ドーム(茶臼岳)が形成された(岩石換算体積 $6.2 \times 10^{-3} \text{ km}^3$)。この溶岩ドームの崩壊による火砕流も発生した。3月5日に、高温噴出物によって山頂西側では積雪が溶けて、那珂川には融雪型泥流が発生した(震災予防調査会, 1918; 松田, 1901; 山元・伴, 1997)。

表1 那須岳火山の歴史時代の噴火活動
(松田, 1901; 震災予防調査会, 1918; 山元・伴, 1997などより)

Table 1 Historic records of Nasu volcano (Matsuda, 1901; Earthquake Investigation Committee, 1918; Yamamoto and Ban, 1997; and others).

年 月 日	噴 火 活 動 状 況
応永 3 年 (1397) 2月 7 日	噴火 那須岳爆発し、近傍の諸村に被害
応永 5 年 (1408) 2月 4 日	噴火 那珂川黄変
応永 7 年 (1410) 3月 5 日	噴火 噴石や埋没のため死者180余名、牛馬多数被害
弘化 3 年 (1840) 8月	噴火
明治 4 年 (1881) 7月 1 日	噴火 鳴動、噴石、那珂川の魚被害
昭和 7 年 (1942) 10月 1 日~2月	那須岳西斜面噴気活発化
昭和 8 年 (1943) 12月	那須岳西斜面噴気活発化
昭和 28 年 (1953) 10月 24・29日	小噴火 旧火口の西側斜面で噴火し、降灰は南6 kmに及ぶ
昭和 35 年 (1960) 10月 1 日ごろ	微噴火 噴石北方0.8 kmまで降灰
昭和 38 年 (1963) 1月 20 日	那須岳西側斜面の無間火口で小爆発、付近に降灰
昭和 53 年 (1977) 1月 3 日・3 日	地震群発 有感地震4回 最大揺動は3.0日2.3時2.5分(震度3)
昭和 61 年 (1986) 7月 1 日~3日	地震群発 有感地震2回 最大揺動は1.2日2.2時5.4分(震度2)

表2 那須岳火山の1408-1410年噴火の経過
(松田, 1901; 震災予防調査会, 1918; 山元・伴, 1997などより)

Table 2 Eruption progress of 1408-1410 Eruption of Nasu Volcano (Matsuda, 1901; Earthquake Investigation Committee, 1918; Yamamoto and Ban, 1997; and others).

1408年(応永15年)	噴火活動 1月21日 2月24日 水蒸気爆発により、火山灰降下。 那珂川の水が黄変。 この後も水蒸気爆発活動が断続的に続く。
1410年(応永17年)	3月5日 大規模なマグマ噴火活動が開始。 火山灰、火山弾の放出。 溶岩ドームの成長。 溶岩ドームの崩壊による小規模火砕流の発生。 融雪型泥流が発生し、180余名の死者、牛馬多数の被害。 茶臼岳溶岩ドームの形成。

2.4 那須岳の噴火活動による災害履歴

那須岳の噴火活動史とその災害履歴は以下の通り(松田, 1901; 震災予防調査会, 1918; 山元・伴, 1997; 奥野ほか, 1996 など)。噴火活動は約 1.6 万年間で、噴出物である火山岩塊や火山弾による落下範囲は火口からほぼ 2.5 km 以内、溶岩と火砕流はおもに東南山麓地域に分布している。1408–1410 年のブルカノ式噴火活動(VEI 3)が最も甚大な被害を出した。これは山頂西側で積雪が溶けて融雪型泥流が発生し、那珂川などを下ったため、その被害は「埋人百八十余、打殺于牛馬其数不知」と記録に記載されている。その他に、複数回の水蒸気噴火の活動記録があるが、犠牲者の記録は残されていない。1410 年以降の約 400 年間は静穏な状態が継続し、1846 年 8 月と 1881 年 7 月には、那須岳山頂西側の火口(無間地獄)や北西側の火口での水蒸気噴火が発生している。

2.5 近年での噴火活動と観測体制の現況

1942 年, 1943 年, 1953 年, 1960 年, 1963 年には水蒸気噴火が那須岳西斜面で発生している。この後は、那須岳西斜面での噴気活動はやや沈静化の傾向にむかっている。これら噴気活動は、盛衰はあるが現在も継続している(気象庁, 2013; Tanada and Nakamura, 2020; 気象庁, 2021)。

気象庁は那須岳を常時観測体制で、地震計、監視カメラ、GNSS、傾斜計、空振計を設置して監視している(気象庁, 2013)。また、防災科学技術研究所は高感度地震計、広帯域地震計、埋設型傾斜計、GNSS を用いて火山研究を行っている(Tanada *et al.*, 2017)。また、国土地理院は GNSS を、東北大学は地震計や GNSS を用いて、広域の観測を実施している。

気象庁による火山月報などの情報・資料によると、那須岳の最近の地震活動は山頂付近の地下約 3 km より浅い所に震源を持つ地震活動が、1～2 年に 1 回程度の割合で短期間活発化がみられるが、火山性微動は観測されていない。また、噴気高度と噴気温度は近年低いレベルで推移している(気象庁, 2021 など)。

3. 那須岳の噴火活動の様式と規模の特徴

3.1 噴火履歴からみた活動様式と火山災害

那須岳で今後の発生する災害予測のために、過去

約 1.6 万年間の活動実績から整理した結果、那須岳の噴火活動はその活動様式と規模(気象庁の噴火規模にほぼ準じる)から下記の 4 タイプとなる。

- ① 大規模なブルカノ式噴火(数万年に 1 回の頻度、噴出量は岩石換算体積で 1 km^3 以上)
山頂から風下へ約 10 km の範囲で層厚 30 cm 以上の降下火砕物が堆積し、火砕流も谷沿いに流下して山頂から最大約 10 km 流下し、溶岩流は山頂から 5 km 程度流下する。
- ② 中規模なマグマ噴火(数千年に 1 回の頻度、噴出量は $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{ km}^3$ 程度)
山頂から風下へ 10 km 前後の範囲で層厚 15 cm 以上の降下火砕物が堆積し、火砕流も谷沿いに最大約 6 km 流下し、溶岩流の流下距離は 1.5 km 以下である。弾道軌道を描く火山岩塊や火山弾などの噴石の落下範囲は、火口から 2.5 km 以内である。
- ③ 小規模なマグマ噴火もしくはマグマ水蒸気噴火、規模の大きめな水蒸気噴火(数百年に 1 回の頻度、噴出量は $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ km}^3$ 程度)
降下火砕堆積物の分布は火口から 5 km の範囲に限定され、噴出量が小規模のため、堆積物の野外での正確な分布範囲を確認することは困難である。
- ④ かなり小規模な水蒸気噴火(数十年から数年に 1 回程度の頻度、噴出量は 10^{-5} km^3 程度)
火砕物放出や火山灰降下が火口から数百 m の範囲で発生する。

したがって、那須岳における噴火活動では活動史の初期に最も規模の大きな噴火(噴出物の岩石換算体積が 1 km^3 を越える)が発生した。噴火活動での噴出物の岩石換算体積は、最も規模の大きな噴火が 1 km^3 を越えるが、その後小さくなる傾向が認められる。那須岳の平均マグマ噴出量は $1.0 \sim 1.2 \times 10^{-5} \text{ km}^3/\text{年}$ と見積もられる。那須岳の噴火活動の規模と発生頻度は、わが国の活火山の噴火履歴を参照すると(中村ほか, 2021)、わが国の活火山の活動としてはほぼ平均的である。

那須岳噴火による最大の被害は、1408–1410 年の活動に伴った融雪型火山泥流の発生である(犠牲者数 180 余名)。1408–1410 年の活動以降では数回の水蒸気噴火が発生して、降下火砕物による構築物や農地への被災記録が残っている。したがって、那須

岳の噴火活動による災害においては融雪型火山泥流と降下火砕物が主要な加害要因(付録1参照)となる。これはわが国での火山災害履歴の傾向と同様の傾向である(中村ほか, 2021)。

3.2 今後の噴火活動と災害の予測

噴火イベントツリーや噴火シナリオの検討をすすめるために、今後の噴火活動の規模と発生する噴火事象などを予測した。那須岳の噴火履歴などをふまえると、今後発生する可能性のある噴火活動の規模と頻度、発生する噴火事象と被害などは、以下の①～④のように想定される。なお、活動規模(VEI)と発生頻度を考慮して、マグマ水蒸気噴火と水蒸気噴火については、小規模な噴火(VEI 2, 数百年に1回程度の頻度)とかなり小規模な噴火(VEI 1以下, 数十年から数年に1回程度の頻度)との2つに区分することにした。

① 大規模なマグマ噴火(VEI 4, 数万年に1回程度の頻度)

この規模の大規模マグマ噴火(大噴火)は、今後の発生の可能性はかなり低い。この規模のマグマ噴火の活動は数年あるいは数カ月間継続する可能性が高いが、時間経過とともにマグマ噴出量が減少する傾向がある。また、活動に伴う噴火事象としては、大規模な火砕物放出、溶岩流、溶岩ドームの崩壊(崩落)に伴う火砕流などの発生が想定される。地域の自然・社会環境にもよるが、火山災害もある程度規模の大きい被害が想定される。

② 中規模なマグマ噴火(VEI 3, 数千年に1回程度の頻度)

この中規模のマグマ噴火は、今後の発生が予測される。この噴火活動は数年前から前駆的な水蒸気噴火が継続し、その後に爆発的なマグマ噴火に移行すると予想される(那須岳におけるこの規模の最後の噴火は1408–1410年で、現在までに約600年が経過)。火砕物放出、溶岩流、溶岩ドームの崩壊に伴う溶岩ドームなどが想定される。火口近傍から周辺地域まで、直接的な噴出物や間接的な火山泥流などによる火山災害が発生する可能性がある。

③ 小規模な噴火(VEI 2, 数百年に1回程度の頻度)

この規模の噴火活動は、少量のマグマ噴火、マグマ水蒸気噴火、あるいは大規模水蒸気噴火の活動が想定される。山頂部周辺にかなりの降灰が予測され、山麓谷沿いに二次的な土石流が発生する可能性があ

る。火口近傍から周辺地域までで、火山災害が発生する可能性がある。

④ かなり小規模な水蒸気噴火(VEI 1以下, 数十年から数年に1回程度の頻度)

この規模の水蒸気噴火では火砕物放出や火山灰降下、火口の周辺数百m内で発生することが予測される。那須岳山頂西側と北西側の火口内の噴気活動は現在も衰えていないので、この近傍で発生する可能性がある。山麓地域である程度の規模の火山災害が発生する可能性は少ないが、土石流の発生には注意が必要となる。現在の那須岳での最も発生の確率が高い噴火活動である(那須岳におけるこの規模の最後の噴火は1963年)。

4. 那須岳の火山防災の現状

4.1 噴火イベントツリーと噴火シナリオによる火山防災

活火山地域では観測機器がよく整備されて、精度の高いデータ収集が可能となっており、得られたデータの検証をすることで噴火予測の精度が向上しつつある。こうした噴火予測研究の成果をふまえて、活火山地域では平時から関係自治体が専門家などの支援を得て、あらゆる噴火事象を前もって想定しておき、シナリオを作成しておくことでなるべく抜けの無い(想定外の無い)火山防災体制づくりをすすめることなどが、近年の防災関係の研究成果から提案されている(Fel'pet *et al.*, 2007; Neri, *et al.*, 2008; Marzocchi *et al.*, 2012 など)。

リスク評価では起因となる事象発生から「望ましくない状況」、あるいは「好ましくない結果」までを事象推移の順に整理して(日本規格協会, 2019 など)、それぞれの事象が発生する確率値を算出して、確率値付きの系統樹(イベントツリー、イベント確率ツリー)を作成する。これを参照し事象推移の確率値を算出することで、リスクの予測・解析をすすめる手法も提案されている(UN/ISDR, 2004; Rember, 2011 など)。噴火シナリオは噴火履歴をもとに発生確率が高い典型的な噴火経過を抽出して作成されたもので、事象分岐を含まない活動推移を示したものであるため、優先的に必要とされる防災対応の検討に役立てられる。

こうしたリスク解析の手法をふまえて、火山研究者や防災担当者が火山災害を研究する際には、噴火

イベントツリーや噴火シナリオを作成して進めることが重要である。これらを活用することで、発生が予測される災害の加害要因に対して迅速な対応が可能となり、火山災害の防災対応のために推奨されている噴火イベントツリーや噴火シナリオを作成しておくことで、発生が予測される災害要因に対して迅速な対応が可能となるため、その活用が火山災害の防災対応のために推奨されている (Punongbayan *et al.*, 1996; Neri *et al.*, 2008; Marzochi *et al.*, 2012; Sobradelo *et al.*, 2013, 2015; 中田, 2016; 及川, 2018; 藤田, 2018 など)。さらに、従来の決定論的方策では記されなかった低頻度の事象発生に対する防災対応の混乱を避けられることで、効果的な火山防災体制が実現されることになる。

4.2 噴火イベントツリーと噴火シナリオを活用した 那須岳地域の防災

那須岳火山防災協議会は、噴火履歴に加えてわが国の活火山の噴火履歴を検討し、噴火イベントツリーを作成することにした。以下にその検討概要を記す。

那須岳山頂の北西および西側の標高 1,750 m 以上においては過去の噴火実績もあり、現在も噴気活動が活発であることから、那須岳山頂を中心とした半径 500 m の範囲を火口地域として想定した。噴火活動のタイプとしては 3 章で述べたように、今後の噴火活動をごく小規模な水蒸気噴火、小規模な噴火、中規模なマグマ噴火、大規模なマグマ噴火と想定して噴火イベントツリーを作成した (那須岳火山防災委員会; 2009, 中村, 2009)。那須岳では噴火実績数が多くないことから、個々の事象発生の確率算出にあたり信頼性の高い推定は困難であった。そのため、これまでの実績や他火山での履歴を参照した上で、想定される事象の発生頻度をおおよそで分けし、その区分に対応した 4 種類の矢印で発生頻度を表すことにした (那須岳火山防災協議会編, 2010; 中村ほか, 2021)。

那須岳火山防災ハンドブック平成 26 年度改定版には、この噴火イベントツリーを簡略化して掲載した (図 4)。那須岳では、小規模な水蒸気噴火が活動の活発化によりマグマ噴火に移行した実績がある。そのため、本イベントツリーでは規模の異なる事象への移行も確認できるようになっている。また次の事象への移行判断には火山観測データの活用が不可

欠である。観測されている現象と次に起こるであろう事象との紐づけができるよう、分岐箇所想定される前兆現象や観測データに関する情報を事象分岐の箇所(ノード)に付記し、イベントツリー上で確認できるようにした。

那須岳火山防災協議会では検討の際の意見を参考に、噴火イベントツリーとは別に、噴火シナリオの作成を検討することにした。噴火イベントツリーは想定された複数の噴火事象をつないで噴火活動を表現したものである (図 4)。それに沿って防災計画を作成しようとする、それぞれの事象ごとに網羅的にあらかじめ防災対応を検討しておくことが必要となる。しかし、このような対応は計画作成上現実的ではない。本協議会で取り扱う噴火シナリオは噴火履歴をもとに今後発生し得る噴火経過を抽出して作成した (表 3)。那須岳では、規模の小さい水蒸気噴火と規模の比較的大きいマグマ噴火の 2 タイプの噴火活動を抽出して、実績を考慮して水蒸気噴火からマグマ噴火に移行する噴火経過を想定噴火シナリオ (図 5) とした。

この噴火シナリオをもとに、どのような噴火事象が発生して、どのような噴出物が加害要因となるか、これらの噴火事象にはどのような防災対応が必要とされるかを検討した。この噴火シナリオに基づいた防災対応によって、住民避難、道路規制等の優先順位の高い防災対応が抽出されて、火山災害への防災体制の効率的な策定が可能となる。しかし、想定外の事態を招かないためにも、噴火推移によっては発生頻度がより低い噴火事象の防災対応について、噴火イベントツリーで検討することが必要である。

4.3 那須岳の火山防災マップおよび火山防災ハンドブック

4.3.1 火山防災マップの作成

活火山が密集している日本は、人口密度が高いため活火山近くにまで人が暮らし、観光資源を求めて火山付近に多く観光施設が分布する。このため、噴火活動による深刻な被害を過去に数多く出している。マグマ噴火活動が活発化すると、溶岩、火砕流、火山灰や軽石・岩塊の噴出で周辺地域に被害を出す。また、マグマが地表に出ない場合の水蒸気噴火、火山性地震活動、山体変動、山体崩壊、火山ガスでも被害が発生する。火山災害へ備えるための防災対策としては、活火山の過去の活動史を明らかに

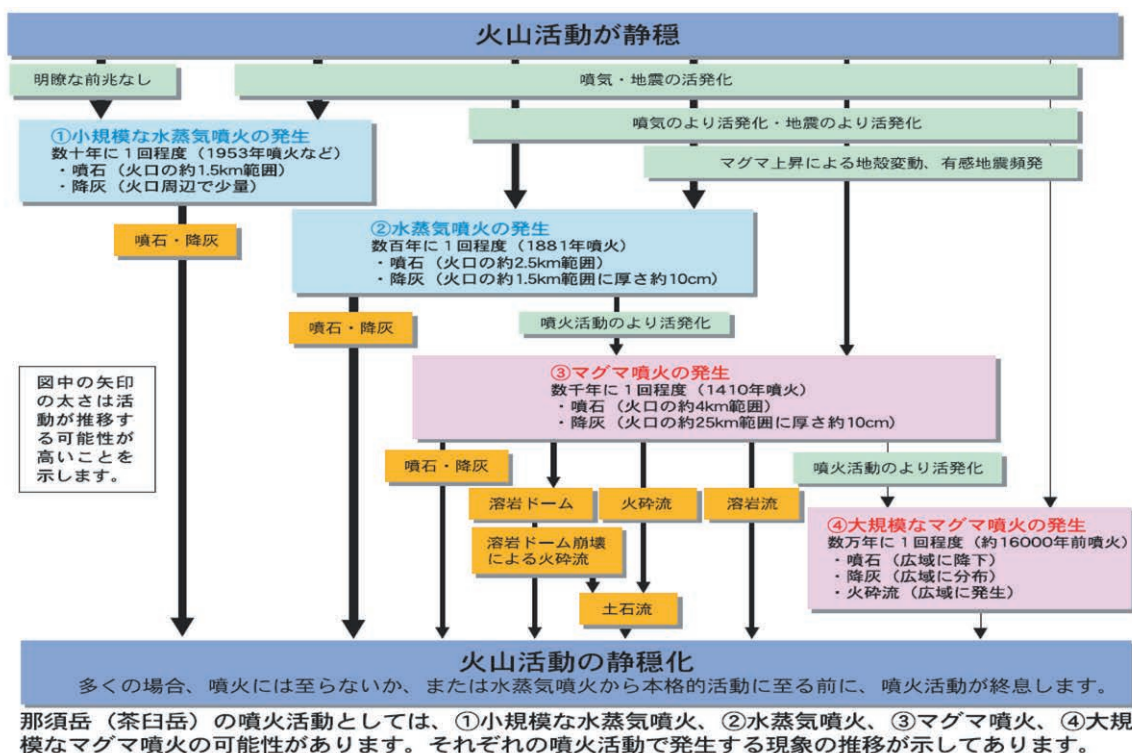


図4 那須岳火山の噴火活動の推移を示した噴火イベントツリー
住民公表用に明快な表示とした(火山防災ハンドブック, 平成26年度改定版より)。

Fig. 4 Eruption Event-tree of Nasu volcano.
Simplified Diagram for local residents (Nasu Volcanic Handbook, 2014).

表3 噴火警戒レベルで想定した噴火活動と噴出物の影響範囲
噴火履歴からモデル噴火を抽出して、噴火様式と噴出物などを想定した。

Table 3 Area covered by volcanic products assumed by Volcanic Alert Level of Nasu volcano, JMA.

	ごく小規模噴火	小規模噴火	中規模噴火	ブルカノ式噴火
モデル噴火 (噴火履歴)	1953, 1960年, 1963の噴火	有史以降史実なし	1881年噴火	1408～1410年噴火活動 (水蒸気噴火の頻発→ブルカノ式噴火→火砕流発生)
噴石	火口内及びそのごく近傍	山頂から約1.5km(史実なし)	山頂から約2.5km(史実なし, ハザードマップによる)	山頂から約4km(史実では20cm程度の噴石が2.5km程度まで飛散, 防災マップによる)
溶岩流				山頂から約3kmの範囲
火砕流				山頂から約8kmの範囲
融雪型泥流				那珂川及びその支流沿いで, 東北自動車道に至る範囲の広い地域

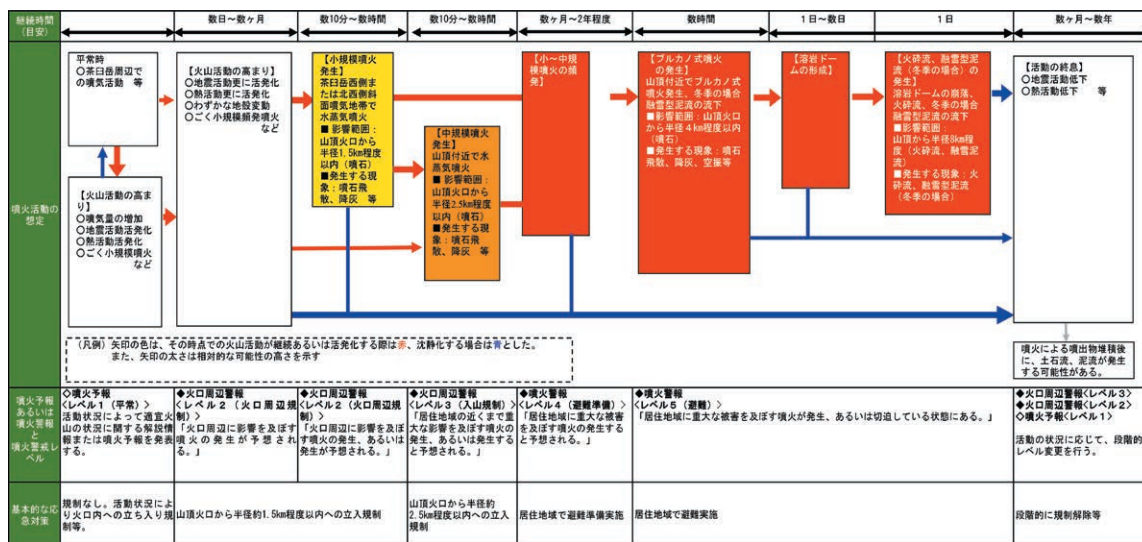


図5 那須岳火山の噴火シナリオとその防災対応
噴火活動の推移での必要とされる防砂対応などを噴火シナリオにより策定した。
Fig. 5 Eruption scenario and Disaster prevention measures of Nasu volcano.
Disaster prevention measures were referred from eruption scenario.

して、その火山の特性、噴火の頻度、規模などを把握しておくことは肝要である。将来起る可能性の高い噴火活動による被害を想定した図を示した火山防災マップ(火山災害予測図や火山ハザードマップをほぼ同意語で用いることもあるが、火山防災マップを本稿では使う)の作成は欠かせない。火山防災マップと地域防災計画を整備することが有効な火山災害対策となる。

火山防災マップの作成の状況を見ると(中村, 2005; 中村ほか, 2013), 1983年にわが国で最初に北海道駒ヶ岳で、次いで1987年に十勝岳で火山災害予測図が作成公表された。この後はしばらく新規火山防災マップの公表は無かったが、雲仙普賢岳1991年噴火後に「火山噴火災害危険区域予測図作成指針」が公表され、また気象庁による当時の常時精密観測と常時普通観測の対象火山の公表があった。2000年に三宅島と有珠山の噴火があって、これ以降に多くの火山で火山防災マップが公表されている。これらの作成公表の経緯をみると、雲仙普賢岳1991年噴火、および三宅島と有珠山の2000年噴火のような規模の大きな火山災害の発生が契機となって火山防災意識が高揚し、火山近傍地域自治体での作成公表が推進される傾向が明瞭である。

4.3.2 那須岳地域の火山防災マップ・ハンドブックを活用した火山防災

栃木県は、1992年より「那須岳火山災害監視システム配置検討委員会」を設置し、那須岳の噴火履歴と災害履歴から火山活動の把握方法と災害軽減のための対策について検討した(栃木県, 1994)。1995年からは「那須岳火山砂防計画検討委員会」が、1999年からは「那須岳火山想定災害調査検討委員会」が噴火活動による災害予測などを検討した(栃木県, 1999)。その結果、那須岳火山防災マップおよび火山防災ハンドブックにおいては、①水蒸気噴火と②マグマ噴火の両活動を想定して、火山灰や噴石の到達範囲を図示した。それらの概要は以下の通りである。①水蒸気噴火(数百年に1回程度の発生頻度)では、災害の加害要因としてとなる事象として噴石の放出と火山灰の降下を想定して、その危険区域を設定した。②マグマ噴火(数千年に1回程度の発生頻度)での災害要因となる事象としては、噴石、火山灰、火砕流、溶岩流、および融雪型泥流の二次的発生を想定して、災害要因となる事象ごとの被害が起り得る範囲を危険区域と設定した。それぞれの危険区域の具体的な設定は、シミュレーションを実施して決定された。これらの結果から、水蒸気噴火とマグマ噴火とを別に図示して火山防災マップとした。火

山防災マップをより理解するために必要となる解説を火山防災ハンドブックに掲載した。2002年3月にA3版サイズの火山防災マップとA4版サイズの16頁の火山防災ハンドブックが作成・公表されて、住民公表資料として各戸に配布された(那須町・黒磯市・栃木県, 2002; 那須町防災会議, 2004; 中村, 2005)。

これら資料配布時はそれぞれの自治体で住民向け説明会が、那須町では2回(2002年3月19日, 26日)、旧黒磯市で1回(2002年3月19日)実施された。その際、作成委員会の委員が那須岳火山防災マップと火山防災ハンドブックを解説するとともに、両自治体における火山防災に関する住民意識調査の結果も紹介した。その結果を踏まえて住民の火山防災意識の向上を目的とし、火山防災避難訓練では想定噴火条件を変えるなど工夫も交えながら実地および図上訓練をできるだけ毎年繰り返し実施してきた。那須岳火山防災協議会では那須岳の火山防災体制のあり方について引き続き検討し、地域防災計画や那須岳火山防災マップと火山防災ハンドブックの内容を2度改定してきた。

気象庁による噴火警戒レベルの2007年12月運用開始の発表をうけて、那須岳での噴火警戒レベル導入に向けて、2008年6月に那須岳火山防災協議会のもとに「噴火警戒レベル導入検討委員会」を設置して検討をすすめた。火山防災協議会では火山防災マップ・ハンドブック、および噴火イベントツリーと噴火シナリオに基づいて、噴火警戒レベルの設定をすすめた。噴火警戒レベルを導入するにあたって、那須岳では小規模水蒸気噴火、中規模水蒸気噴火、小～中規模マグマ噴火、ブルカノ式噴火が想定され、それぞれの噴火規模に応じて影響を受けると予想される範囲を図表に示した。噴火警戒レベル導入を2009年3月に決定し、住民向けパンフレットを作成した。

5. 那須岳地域の新たな火山防災へ向けての検討

5.1 那須岳地域での火山災害リスク評価の実施経過

那須町の住民は約2.5万人であるが、観光客が那須岳地域には年間500万人以上が訪れ、さらに別荘地にも多くの非定住民が滞在している。観光シーズンである春や秋には、50万人を超える非定住民が滞在している。那須岳地域の火山防災体制は、こうし

た多数の非定住民に対しての効果的な減災のための防災対応のあり方が重要な課題となる。その課題を解決するためにすすめた火山災害リスクの評価方法とその結果の概要を以下に記す。

活火山地域のリスク評価では、GISによる地域情報を活用した評価方法が数多く提案されている(UN/ISDR, 2004; Felpet *et al.*, 2007; Nakamura *et al.*, 2008; Rember, 2011; Bartolini *et al.*, 2013; Sobradelo, 2015 など)。最近での火山地域でのリスク評価の手法の多くは、ハザード、脆弱性、価値についてその構成要素を抽出して、それぞれの要素から項目評価する手法が提案されている(Rember, 2011; Roy *et al.*, 2012; Sparks *et al.*, 2013; Jenkins *et al.*, 2014 など)。なお、ハザードは、一般に事故・災害への危険の要因として危害要因などの語があてられる。本稿での火山災害のリスク評価値の算出は、ハザード、脆弱性、価値の評価項目を個別に数値化して評価し、それぞれの評価値から得られた統合値をリスク値として算出した(付録参照)。火山災害のリスク評価法とその算出法の詳細は中村ほか(2021)および付録に記した。

5.2 那須岳地域の地域基礎情報

那須岳地域の火山活動としての災害が及ぶ影響範囲は、那須火山の過去約1万年の噴火履歴と公表されている火山防災マップなどを参考資料として、那須岳地域として栃木県那須町、那須塩原市、および福島県西郷村、下郷町、天栄村、白河市とした。地域基礎情報は、国土地理院の数値地図や市販のデジタル地図情報を基図として、地形、道路や鉄道、人口動態、各種公共施設、宿泊施設、避難施設や対策本部などの防災施設について、自治体提供の統計資料や地域防災計画での各種データを入力し、構造化・統合化データファイルを作成して、評価用のデジタルデータファイルを作成して、GISシステム(Arc View)をもちいて図化作業などをすすめた。作成された那須岳周辺地域の自治体の人口分布と各種公共施設の山頂からの距離と施設数を図6aと図6bに示した。

5.3 那須岳地域における火山災害の脆弱性と価値のリスク値の特徴

那須岳地域において算出したリスク値の特徴を、①公共施設(市町村役場など、学校など教育施設、医療関係、消防関係、警察関係、郵便局)や住民居住地、②避難施設(公民館、集落センター、地区体

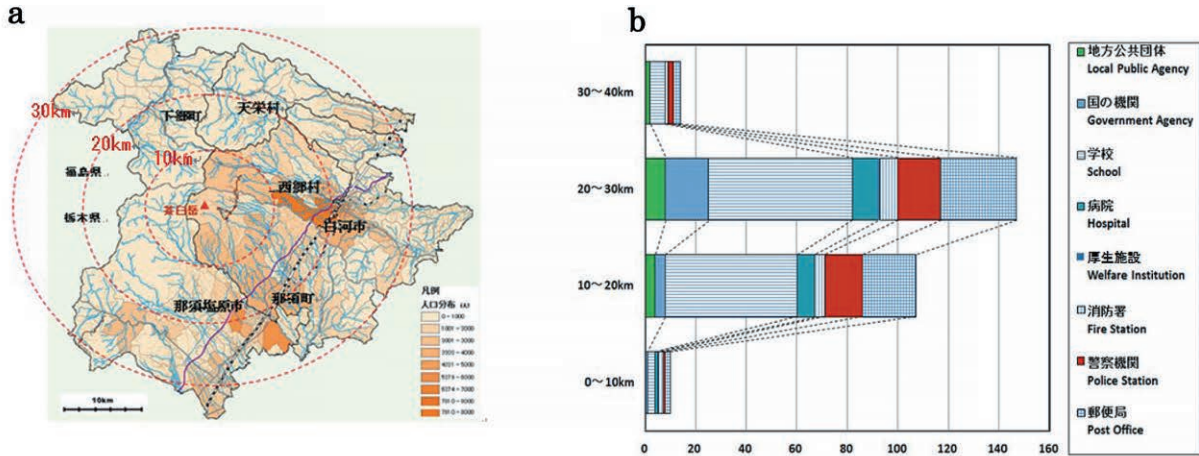


図 6 那須岳周辺地域の自治体と各種公共施設の分布(施設数はそれぞれの部署区分ごとの集計値)
 a 各自治体の人口分布, b 各公共施設の山頂からの距離(縦軸)と施設数(横軸)
 Fig. 6 Locations showing facilities of local governments and public institutions (Numbers of facilities are overall results based on administrative institutions).
 a Population distribution, b Diagram showing the distance of public institutions from the summit.

育館, 小中学校)などの防災施設, ③観光・宿泊施設について記す. ①から③の評価項目のリスク評価の値は表 4 に示した. また, 那須岳火山防災マップで示された噴火活動時に想定される噴出物の分布図(図 7)と那須岳地域の各種施設の分布を GIS で重ね合わせた図を作成した(図 8). これら図 7 と図 8 とを比較すると, 那須岳地域の火山災害リスクがよく反映されていることがわかる.

① 公共施設などの分布状況を見ると, 0 ~ 10 km 以内の対象施設の数はい少ない. 小規模な水蒸気噴火降下火砕物(噴石と火山灰)によるリスク値はかなり低くなる. 規模の大きい水蒸気噴火や

マグマ水蒸気噴火では降下火砕物の分布範囲が拡大するため, 火口から 10 km 域に分布している居住施設, および避難施設などの公共施設ではリスク値は高くなる. さらに, 規模の大きいマグマ噴火では, 火砕流や泥流も加害要因に加わり, 火口から 20 km までの周辺地域の居住地域や公共施設が存在する東南麓の広域でリスク値は高くなる.

② 避難施設などの分布状況を見ると, 那須岳周辺地域の自治体指定の避難施設は, 火口から 10 ~ 30 km 内に数多く存在する. 避難施設の内訳は集会所が全体の 50% と最も多く, 次いで学校が

表 4 各公共施設の分布(火口からの距離)から損出価値のリスク評価結果例
 e.g. Total Risk Value (j, a): $3504 = 4*(0*3+4*3+1*3+2*2+1*2+3*3+402*2+14*3)$

Table 4 Risk assessment values of public institutions (distances form the summit).

施設の種別 Type of Facilities	リスクランク値 (RV1) Risk Rank Value	火口からの距離 Distance from Crater			
		0~10km (α)	10~20km (β)	20~30km (γ)	30~40km (δ)
市町村施設 Town Office (a)	3	0	4	8	2
避難所 Agency Office (b)	3	4	108	240	65
医療施設 Hospital (c)	3	1	7	10	0
消防関係施設 Fire House (d)	2	2	4	1	0
警察関係施設 Police Station (e)	2	1	15	17	2
教育機関 Educational Fac. (f)	3	3	39	70	11
観光宿泊施設[小] Small Accommodation (g)	2	402	81	16	1
観光宿泊施設[大] Large Accommodation (h)	3	14	1	3	1
施設数総計 Total No. of Facilities (i)		427	259	365	82
リスク値総計 Total Risk Value (j)		3504	996	2122	308

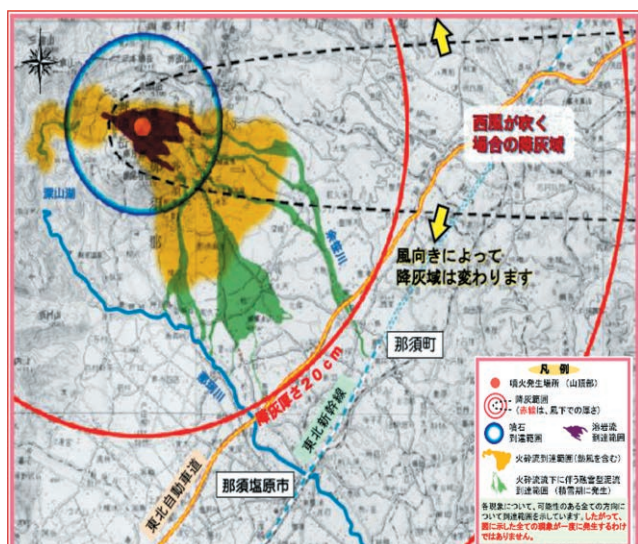


図7 那須岳火山のマグマ噴火での危険区域予測
携帯端末電波状況，現在地番号，情報提供QR
コードを掲載した（那須岳火山砂防マップ，平
成14年3月版より）。

Fig. 7 Volcanic hazard map of magmatic eruption occurred at Nasu volcano.
Radio wave condition of mobile phone, current location number, and QR code are shown (After Nasu Volcanic Sabo map, 2002).

27%で、避難施設（避難施設として指定されている学校も含まれる）の分布と公共施設とが密接している（図6b）。そのため、小規模な水蒸気噴火が発生した場合火口から10～20 kmで、中規模のマグマ噴火が発生した場合は火口から20～30 kmまでの地域内で、降下火砕物（小規模な水蒸気噴火）や火砕流や泥流（規模の大きいマグマ噴火）によるリスク値は高くなる。

- ③ 宿泊施設の分布状況をみると、宿泊施設は、火口から5～10 km地域に全体の42%が、次いで10～20 km地域が28%、20～30 km地域が29%と分布している。那須町に限れば、宿泊施設の82%が火口から5～10 kmの範囲に分布する。これは温泉湧出地がこの付近の河川沿いに多く、その周囲に宿泊施設が分布することに起因する。よって、小規模な水蒸気噴火の降下火砕物によっても被災する可能性が高く、リスク値は高くなる。さらに、規模の大きいマグマ噴火による火砕流や泥流の影響も加わり、火口から20 kmまでの宿泊施設や観光レジャー施設にも影響が及び、リスク値は高くなる。

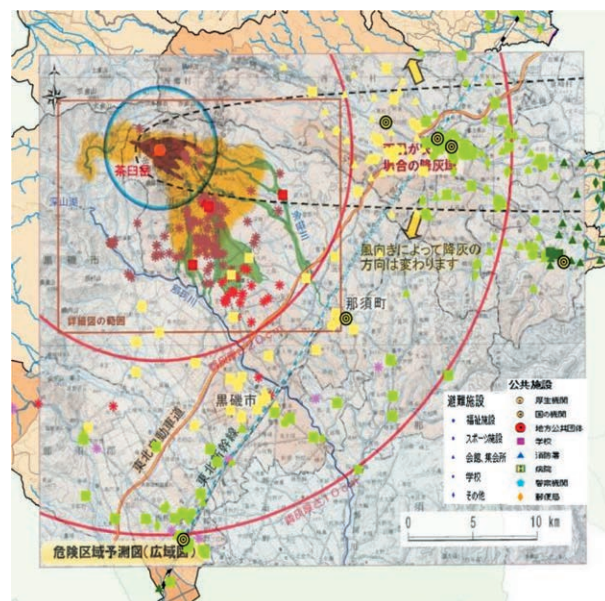


図8 那須岳周辺地域の噴出物想定分布域と公共施設・宿泊施設の分布
那須岳火山防災マップ（平成14年3月版）と国土地理院標高データからArcGISで作成

Fig. 8 Locations of public institutions and hotels shown on the volcanic hazard map.
Map by ArcGIS using with Japan elevation data of Geographical Survey Institute.

6. 那須岳での火山災害リスク評価を活用した防災体制

6.1 火山災害リスク評価結果の検証をふまえた防災体制の検討

那須岳地域の火山災害リスク評価の結果と現況を比較検証し、今後の火山災害への防災対応のあり方を検討する。5.3章で述べた結果をふまえ、那須岳火山防災協議会は新たな防災対策をすすめた。まず、同協議会は2種類の噴火シナリオで示した噴火事象（水蒸気噴火とマグマ噴火）への対策を那須岳地域防災計画に加えた。活動推移によっては、より網羅的に噴火事象をとりあげている噴火イベントツリーで適宜確認をして、その防災対策を検討する旨も同計画に追加した。気象庁が発表する噴火警戒レベルと噴火シナリオとが矛盾を生じないように、噴火シナリオにおける水蒸気噴火は火口周辺警報（噴火警戒レベル2・3）に対応させた。噴火シナリオにおけるマグマ噴火は、噴火警報（噴火警戒レベル4・5）に対応するとした。

この噴火警戒レベル・噴火シナリオに基づいて、同協議会は、自治体、関係機関および住民参加型の机上と実地の火山防災訓練を実施した。その訓練結

果などを検証して得られた成果は、避難計画(平成 26 年度, 令和元年度)や防災マップやハンドブックの改定版(平成 22 年度版, 平成 26 年度版)でその都度反映させた。例えば実地訓練の結果から、那須岳火山防災協議会では多数の山頂登山者向けの防災対応を検討して、登山者向け情報提供 QR コード, 携帯端末電波状況, 現在地番号を山頂付近図として改定版防災マップに掲載することにした(図 9)。また, 噴火時などでロープウェイが利用不能になった際の緊急避難のための下山路を指定して図に掲載して配布資料とした(なお, 一部の下山路は必要性が認識されて, 那須山岳救助隊の支援で新規に開道された)。



図 9 現在地番号を掲載した火山防災マップの山頂付近図携帯端末電波状況, 現在地番号, 情報提供 QR コードを掲載した(那須岳火山防災マップ平成 22 年版より)。

Fig. 9 Summit area of Nasu volcanic hazard map, showing the current location number and QR code (After Nasu volcanic hazard map, 2010).

6.2 那須岳地域での火山防災体制の検討課題

那須岳地域で実施された火山災害リスク評価の結果, 高いリスクがある地域での噴火活動の活発化に伴う避難体制に係わる課題の検討が必要である。小規模な水蒸気噴火では, 加害事象による影響での諸施設の密集した地域(火口から 10 km の地域)での避難方法を検討しなければならない。また, マグマ噴火での加害事象では影響範囲が広域化するため, 広域に分布する各種公共施設, 東南麓広域に分布する観光関係施設の防災対応を検討しなければならない。さらに, 那須火山周辺地域を訪れる観光客数は約 480 万人/年(2015–2019 年平均の観光入込み客数, 那須町調べ)で, 8 月と 5 月がハイシーズンで(図 10a), 次いで 9 月–10 月である。那須岳登山者

数でみると(環境省登山カウンター調べ), 10 月が 400 ~ 1,000 人/日と多く(図 10b), 次いで 8 月となっている。これらから, 観光客や登山者に対しては季節(ハイシーズンなど)に応じた避難方法を検討しなければならない。

平時での地域への防災情報の周知, 避難計画や訓練の実施, 住民の防災意識の向上など, 自治体や防災機関, および防災関係委員会での連携による防災体制の見直しをすすめることが重要である。また, 那須岳地域は自然環境と社会環境を反映して, 避難路にもなる交通網はかなり偏りのある分布となっている。こうした交通網をもつ住民居住地, 宿泊施設, さらに各種公共施設の分布状況を減災効果の高い防災体制へすすめるのは, ソフト的な防災体制に加えて, 中・長期的な地域社会のインフラ構築に係わるハード的な防災体制の検討が必要とされる。このように, 那須岳地域がもつ火山災害への防災対応の課題が火山災害リスク評価を実施することで明らかになった。

今回の那須岳地域で火山災害へのリスク評価を実施したが, リスク評価に必要なとされる評価項目, 特に脆弱性や価値を算出するための地域基礎情報の収集が様々な理由で充分でなかった。このため, リスク評価値の算出が十分には実施でなかった。今後, こうした地域基礎情報の整備がすすむことで, さらに精度よいリスク評価が実現されることを期待したい。

7. 火山災害リスク評価を活用した新たな火山防災

今回実施した火山災害リスク評価において重要なことは(1)評価対象とする項目と要素の抽出, (2)ランクの設定, (3)評価算出方式を適切に選択することである。高リスクとなった評価項目やその要素, その影響を受ける対象を確認することで, 必要とされている改善点の抽出が容易となり, 優先されるべき中・長期的な防災体制の検討も可能となる。これらをふまえての新たな火山防災のあり方を展望した。

米国の活火山のリスク評価, NVEWS でのリスク評価手法(Ewert *et al.*, 2006)と同一の手法で試行して比較した。NVEWS の脅威指数(Threat Score, NVEWS)上位 2 位は Kilauea と St. Helens 火山で, それぞれ 324 と 267 である(なお, 桜島火山は 272)。

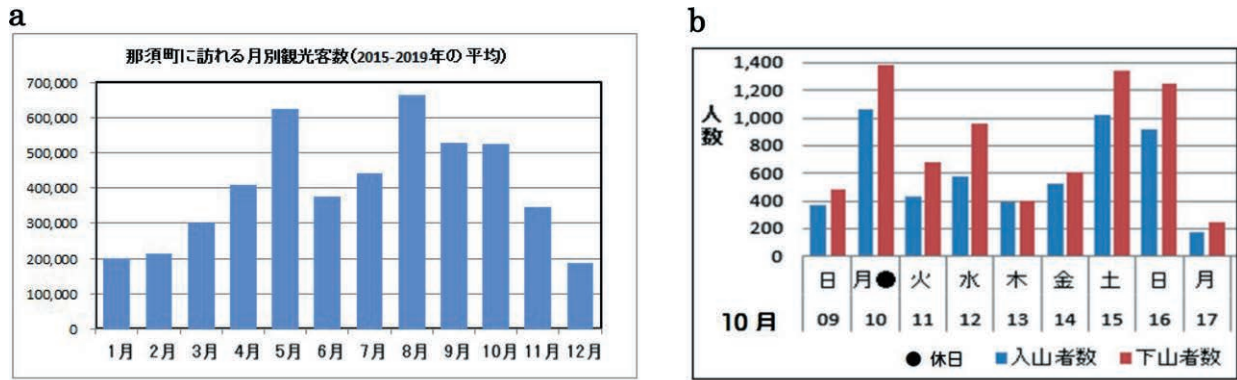


図 10 那須岳周辺地域を訪問する観光客数
 a 月別観光客数(過去5年間平均)
 観光入込客数は平均で約480万人/年(那須町2015-2019年調べ)
 b ハイシーズン(10月)の茶臼岳登山客数(環境省2016年調べ)
 那須岳登山客数はこの他にロープウエーで約5,000人/日がある。

Fig. 10 Numbers of tourists visiting Nasu volcanic area.
 a Monthly numbers of tourists visiting Nasu volcanic area (5-year average).
 b Numbers of climber of Nasu summit area (Data by Ministry of the Environment).

那須岳地域を、NVEWS のリスク評価の算出方式で計算すると、脅威指数は130となる。米国活火山地域の脅威指数と比較すると、この値は上位15位にはいる高さである。このことは、脅威指数には曝露量が反映されているため、米国と比べてわが国の活火山地域においては土地利用状況が高いために曝露量が高めとなり、脅威指数が高く算出されることになる。

これらのことは、活火山周辺地域の自然環境や社会環境・インフラ整備などに米国との差異があるためである。したがって、火山災害のリスク評価では、各評価項目やその構成要素抽出とそのランク値の設定およびリスク値評価などの手法で、それぞれの国のもつ社会環境や自然環境をよく反映したリスク評価手法を十分に検討したうえで、火山災害のリスク評価法の採用がなされるべきであることを示唆している。

わが国の歴史時代においては、犠牲者の多い噴火事例が数多くある(気象庁, 2013; 中村ほか, 2011など)。那須岳地域では火砕流と泥流による災害リスクが高い傾向を示す。この原因は、観光施設や住宅地等が温泉湧出地域を中心として密接に市街化したためと考える。このような観光施設や住宅地等の発達形式はわが国の多くの活火山地域で広く認められる。そのため、那須岳地域と同様に災害リスクが高い傾向となる。わが国の火山地域の多くはほぼ共

通した自然環境や社会環境をもつ火山地域である。このためにも、活火山地域で地域基礎情報のデジタル化の整備をすすめて、GISを活用した火山災害リスク評価手法を開発し、評価結果を活用して減災効果の高い防災体制構築が期待される。

御嶽山2014年噴火の災害を教訓として、活動火山対策特別措置法が2015年に改正されて、火山防災協議会を充実して、火山防災マップ(あるいは火山ハザードマップ)を活用し、噴火イベントツリー・シナリオを作成することで、発生する噴火加害事象から地域住民や非定住民を迅速に安全な避難できるような地域防災計画火山編の再検討などが推奨されている(山里, 2008; 気象庁, 2013; 内閣府, 2018)。さらに、噴火活動予測に対しては確率的評価の導入と定量的な火山災害リスク評価方法を取り入れて効率的な火山防災体制の構築が求められている。本稿での那須岳地域で実施したリスク評価などでの成果が、今後のわが国の火山災害の減災に向けて新たな進展にむけての一助となることを期待する。

謝辞

本稿作成に際しては、那須岳周辺自治体、特に那須町、宇都宮地方気象台、環境省日光国立公園那須管理官事務所からは貴重な地域情報の資料の提供を受けた。那須岳火山防災協議会および同コア専門部会構成機関や委員からは資料や貴重な意見を頂いた。

また、データの GIS 化作業などでは、防災科学技術研究所火山防災研究部門の河野裕希博士、宮城洋介博士、長井雅史博士など多くの方々や、久保智弘博士(山梨県富士山科学研究所)から研究支援を受けた。さらに、閲読者の有意義な指摘によって本論文の質が高まった。ここに記して厚く謝意を表します。

付録

1. 火山災害リスク評価の算出法

本稿での火山災害のリスク評価値の算出は、ハザード、脆弱性、価値を数値化して、得られた値を乗じることによってリスク値として評価する手法を用いた。火山災害のリスク評価法の詳細は、中村ほか(2021)を参照されたい。

$$\text{リスク値} = \text{ハザード} \times \text{脆弱性} \times \text{価値}$$

なお、一般的な事故・災害などのリスク評価では(UN/ISDR, 2004; 日本規格協会, 2019; など), リスクは危害の語があてられ、リスク評価の要因のひとつのハザードには危害要因の語があてられる。ハザードは予見不可能で、リスクが予見可能とされている。本稿では、自然災害としての火山災害において、リスクの要因としての火山現象(噴火事象)に着目させた加害事象をハザードとした。火山現象(噴火事象)の災害としての加害要因であるハザードは、例えば火砕流や土石流の高速の碎屑物の流動現象による生命の危険や避難の困難性などがリスクとなる。

2. 評価項目とその要素

(1) ハザード項目と要素

2つの噴火タイプ(水蒸気噴火とマグマ噴火)における加害要因であるハザード項目は、降下噴出物(火山弾, 降下火山灰), 溶岩流, 火砕流, 火山泥流とした。水蒸気噴火(VEI 1~2)において、噴石などは火口から数 km 以内、降下火山灰は 10 km 程度に薄く堆積するとした。マグマ噴火(VEI 3~4)において、溶岩流は 5 km 以内、火砕流は 10 km 程度まで、その後の泥流が河川沿い 20 km 程度に達するとした。

ハザード項目の要素のランク化は次の通りである。火砕流と泥流のランク値は 3, 溶岩流と多量の火山灰(マグマ噴火)のランク値は 2, 火山岩塊と少量の火山灰(水蒸気噴火)のランク値は 1 とした。

また、噴火事象による火口からの距離区分として、10 km, 20 km, 30 km, 40 km 以内の地域にランク値 4~1 を設定した。

(2) 脆弱性項目と要素

火山災害に対する脆弱性項目は、自然環境, 社会環境, 防災体制とした。自然環境の要素は地形や気象である。社会環境の要素は、人口, 公的施設, 住宅地域, 観光宿泊施設や交通路などである。防災体制の要素は防災拠点・避難施設や防災体制とした。

脆弱性のランク値は、噴火に際して防災施設の重要度と施設の加害要因への防災対応の程度からランク値 3~1 を設定した。なお一部の施設(農業関係施設など)で情報が十分に収集できなかったものはランク 1 の設定で評価したが、施設情報が全く入手できなかったものの評価は集計できなかった。

(3) 価値項目の要素

噴火事象により損失する可能性の価値(損失利益)の評価算出には、地域基礎情報などの整備がすすむことでさらに精度よいリスク評価が実現されることを期待したい。噴火事象による損失価値の算出の評価は、地域基礎情報の精度良い資料が必要とされる。しかし、市町村資料として未整備のものは、リスク評価値は暫定的な算出となった。地域情報として、市町村施設, 避難所, 医療施設, 教育機関, 大規模観光施設を 3, 消防施設, 警察施設, 小規模観光施設を 2, その他の施設を 1 に価値項目の要素のランクとして設定した。

参考文献

- 1) 伴雅雄(1993): 那須火山群の形成史と今後の噴火による噴出物の到達域の予測。火山災害の規模と特性, 文部省科学研究費 自然災害特別研究報告書, 269-277.
- 2) 伴雅雄・高岡宣雄(1995): 東北日本弧・那須火山群の形成史。岩鉱, **90**(6), 195-214.
- 3) Ban, M. and Yamamoto, T. (2002): Petrological study of Nasu-Chausudake Volcano (ca.16 ka to Present) northeastern Japan, *Bulletin of Volcanology*, **64**(2), 100-116.
- 4) Bartolini, S., Cappello, A., Marti, J., and Del Negro, C. (2013): QVAST: A new Quantum GIS Plugin for Estimating Volcanic 28 susceptibility. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **13**(11), 3031-3042.

- 5) Ewert, J. W., Guffanti, M., Cervelli, P., and Quick, J. (2006): The National Volcano Early Warning System (NVEWS), USGS Fact Sheet, FS2006-3142, 62pp.
- 6) Felpet, A., Marti, J., and Oritiz, R. (2007): Automatic GIS-Based System for Volcanic Hazard Assessment. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **166**, 106-116.
- 7) 藤田英輔 (2018) : 噴火事象イベントツリーの分岐判断条件の定量化に向けてー噴火・噴火未遂事象からの検討ー. *月刊地球*, **40** (3), 176-184.
- 8) Jenkins, S.F., Spence, R.J.S., Fnseca, J.F.B.D., Solidum, R.U., and Wilson, T.M. (2014): Volcanic Risk Assessment: Quantifying Physical Vulnerability in the Built Environment. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **276**, 105-120.
- 9) 気象庁地震火山部火山課 (2013) : 日本活火山総覧(第4版), Web掲載版. (https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/souran/menu_jma_hp.html, 2020.12.14)
- 10) 気象庁(2021):火山活動解説資料(2021年1月分) (https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/tokyo/21m01/301_21m01.pdf)
- 11) 松田繁 (1901) : 那須火山地質調査報文. 震災予防調査会報告, 第 **36** 号, 1-68.
- 12) Marzocchi, W., Garcia- Aristizabal, A., Gasparini, P. Mastellone, M.L., and Dirocco. A. (2012): Basic Principles of Mutliti-Risk Assessment: A Case Study in Italy, *Nat. Hazards*, **62**, 551-573.
- 13) 中村洋一 (2005) : 那須岳の火山防災マップ. 地球, 日本の火山ハザードマップ(下), **27** (5), 333-335.
- 14) Nakamura, Y., Fukushima, K., Jin, X., Ukawa, M., and Sato, T. (2008): Mitigation Systems by Hazard Maps, Mitigation Plans, and Risk Analyses Regarding Volcanic Disasters in Japan. *J. Disaster Res.*, **3**(4), 297-304.
- 15) 中村洋一・荒牧重雄・棚田俊収編 (2013) : 日本の火山ハザードマップ集 第2版. 防災科学技術研究所研究資料, **380**, 186pp.
- 16) 中村洋一・河野裕希・棚田俊収 (2021) : 火山災害のリスク評価を活用した火山防災. 防災科学技術研究所研究報告, 第 **85** 号, 39-58, <http://doi.org/10.24732/NIED.00003337>.
- 17) 那須町・黒磯市・栃木県 (2002) : 那須岳火山防災マップ・那須岳火山防災ハンドブック.
- 18) 那須岳火山防災協議会編 (2010) : 那須岳火山防災マップ(改訂版), 那須岳火山防災ハンドブック(改訂版), 那須町.
- 19) 那須町防災会議(2004) : 那須町地域防災計画(風水害編・震災編・火山災害編), 那須町.
- 20) 中田節也 (2016) : 噴火シナリオと確率的予測. *火山*, **61**, 199-201.
- 21) Neri, A., Aspinall, W., Cioni, R., Betagniri, A., Baxter, P. Zuccano, G., Andronico, D., Barsotti, S., Cole, P., Ongaro, T.E., Hincks, U., Macedono, G. Papale, P., Ross, M., Santacroce, R., and Woo, G. (2008): Developing an Event Tree for Probabilistic Hazard and Risk Assessment at Vesuvius. *J. Volcano. Geotherm Res.*, **17**(3), 397-415.
- 22) Newhall, C. and Self, S. (1982): The Volcanic Explosivity Index (VEI) An Estimate of Explosive magnitude for Historical Volcanism. *J. Geophys. Res.*, **87**, 1231-1238.
- 23) 日本規格協会 (2019) : JIS Q 31000:2019 リスクマネジメントー原則及び指針. 27pp.
- 24) 及川輝樹 (2018) : 噴火推移シナリオおよび分岐過程解析のための樹形図ーイベント・ツリー, フォルト・ツリーの紹介ー. *月刊地球*, **40** (3), 170-175.
- 25) 尾関信幸・奥野充・菊井稔宏 (1995) : 那須・茶臼岳火山, 14世紀末-15世紀初頭の噴火(演旨). 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, 98-98.
- 26) 奥野充・那須火山調査グループ (1996) : 那須・茶臼岳火山の歴史噴火. 地球惑星科学関連学会, 1996年合同大会予稿集, 399p.
- 27) Punongbayan, R.S., Newhall, C.G., Bautista, M.L.P., Garcia, D., Harlow, D.H., Hoblitt, R.P., Sabit, J.P., and Solidum, R.U. (1996): Eruption hazards assessments and warnings, 67-85. in Newhall, C.G., and Punongbayan, R.S., (Eds.).
- 28) Rember, A. (2011): GI Sasa Tool for Assessing Volcanic Hazards, Vulnerability, and Risk Area of the Three Sisters Volcanic Region, Oregon. Vol.13, *Papers in Resource Analyses*. 18pp. Saint Mary's University of Minnesota University Central Services Press. 32pp.

- 29) Roy, A., Kim, S.D., and Trivedi, S.K. (2012): Attack countermeasure trees (ACT) towards unifying the constructs of attack and defense trees. *Security and Communication Networks*, **5**, 929-943.
- 30) 震災予防調査会 (1918) : 日本噴火史. 1973 年復刻版, 稔書房.
- 31) Sobradelo, R., Bartolini, S., and Marti, J (2013): HASSET: A Probability Event Tree Tool to Evaluate Future Volcanic Scenarios Using Bayesian Inference. *Bull. Volcanol.*, **76**(1), 1-15.
- 32) Sobradelo, R. and Marti, J (2015): Short-Term Volcanic Hazard Assessment through Bayesian Inference: Retrospective Application to the Pinatubo 1991 Volcanic Crisis. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **290**, 1-11.
- 33) Sparks, R.S.J., Aspinall, W.P, Crowweller, H.S., and Hincks, T.K. (2013): Risk and Uncertainly Assessment of Volcanic Hazards. In Rougier, J., Sparks, R.S.J., and Hill, L. (Eds), *Risk and Uncertainty Assessment for Natural Hazards*, 365-397. Cambridge: Cambridge University Press.
- 34) Tanada, T., Ueda, H., Nagai, M., and Ukawa, M. (2017): NIED's V-net, the Fundamental Volcano Observation Network in Japan, *J. Disaster Res.*, Vol.12, No.5, 926-931, doi: 10.20965/jdr.2017. p0926.
- 35) Tanada, T. and Nakamura, Y. (2020): Subsurface Resistivity Imaging of Nasudake (Chausudake) Volcano Determined from Time Domain Electromagnetic Survey (TDEM), *J. Disaster Res.*, Vol.15, No.6, 735-744.
- 36) 栃木県 (1994) : 那須岳火山災害監視システム配置検討委員会資料(平成 6 年度), 栃木県.
- 37) 栃木県 (1999) : 那須岳火山想定災害調査検討委員会資料(平成 11 年度), 栃木県.
- 38) UN/ISDR (2004): *Living with Risk: A global review of disaster reduction initiatives*. International Strategy for Disaster Reduction, United Nations, 429pp.
- 39) 山元孝広・伴雅雄 (1997) : 那須火山地質図, 1:30,000, 火山地質図. **9**, 地質調査所.
- 40) 山元孝広 (1997) : テフラ層序からみた那須茶臼岳火山の噴火史. *地質学雑誌*, **103** (7), 676-691.
- 41) 山里平 (2008) : 日本の火山防災体制. 417-424, *火山の事典*[2 版], 朝倉出版.

(2020 年 11 月 18 日原稿受付,
2021 年 3 月 17 日改稿受付,
2021 年 3 月 17 日原稿受理)

要 旨

那須岳は首都東京から約 150 km 北に位置する活火山である。那須岳の 1408–1410 年噴火では、融雪型火山泥流により約 180 名の犠牲者などを出した記録がある。那須岳地域での噴火イベントツリー・噴火シナリオ作成と火山災害のリスク評価を実施した。山頂から約 10–20 km に位置する多数の宿泊施設が分布する地域は、火山防災マップで火砕流や火山泥流の想定分布地域でもあり、高いリスク値がリスク評価の結果で算出された。今回のリスク評価の結果をふまえて、毎年約 500 万人の観光客が訪れる那須岳地域においては、減災効果のある防災体制の早急な構築の必要性が示唆された。

キーワード：火山災害，火山災害リスク評価，防災，那須火山