

火山災害のリスク評価を活用した火山防災

中村 洋一*・河野 裕希**・棚田 俊收**

Disaster-Mitigation System Using Volcanic Risk Assessments

Yoichi NAKAMURA*, Yuhki KOHNO**, and Toshikazu TANADA**

**Utsunomiya University, Japan*

***Volcano Disaster Resilience Research Division,*

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan

Abstract

Volcanic phenomena exhibit a very diverse range of magnitudes, durations, and characteristics of the volcanic activities. We evaluated major factors of volcanic disasters with probabilistic data in Japan from historic records of the volcanic disasters. Also, we picked up Nasu volcano as one of active volcanoes in Japan, and performed volcanic risk assessments of hazards, vulnerabilities and the loss due to the volcanic hazards after compiling the resources with an assist from Geographic Information System (GIS). After referring those data, we conclude volcanic risk analyses and assessments with GIS data are important for developing a strong countermeasure strategy against future volcanic disasters. Therefore, Japanese mitigation system to volcanic disasters has urgently expected to be more effective dynamic countermeasures of more robust framework by probabilistic risk assessments for future volcanic disasters.

Key words: Disaster prevention, Volcanic risk assessment, Eruption event tree, Volcanoes in Japan

1. はじめに

火山防災のあり方について、これまでの確定論（決定論）による噴火活動の予測や災害想定ではなく、噴火イベントツリー（噴火事象系統樹）や噴火シナリオを活用した確率論による噴火活動の予測や防災対応の重要性が、諸外国の噴火事例などで確認されている（Aspinall *et al.*, 2003 ; Felpet *et al.*, 2007 ; Neri *et al.*, 2008 ; Marzocchi *et al.*, 2012）。災害や事故などへの確率論的予測に基づく対応は、多くの分野で近年積極的に導入がすすめられて、その有効性が評価されている（Blong, 2000 ; Aspinall *et al.*, 2003 ほか）。また、火山防災において、活火山地域での火山災害のリスク評価を GIS（地理情報システム）を活用して行うことの有効性の指摘も多い（IAVCEI,

1999; Bartolini *et al.*, 2013; Loughlin *et al.*, 2015 など）。活火山地域での災害リスク評価の結果をふまえて、確率論に基づく火山防災体制の構築が今後は求められている（Ewert *et al.*, 2006 ; Toyos *et al.*, 2007 ; Bartolini *et al.*, 2013 など）。

したがって、日本における噴火活動予測や火山防災体制は、減災効果が高く効率的な新たな火山防災体制を構築することが期待されている（気象庁, 2013 ; 内閣府, 2018）。

そこで、本論では活火山での噴火規模と頻度、災害事例の履歴などの基礎資料を整理して、わが国における火山災害の加害要因（噴火現象：火山活動における災害となる噴火事象）の分析を行った。また、火山災害リスク評価を、那須岳地域を対象に GIS を

* 宇都宮大学

** 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 火山防災研究部門

活用して実施した。その評価結果を那須岳火山の噴火イベントツリー・シナリオも活用して、那須岳地域の防災対応のあり方を検証した。

これらの検討事例の結果から、わが国における活火山地域での新たな火山防災のあり方を検討した。

2. 活火山噴火と火山災害

2.1 わが国での噴火活動と火山災害の履歴

火山災害における加害要因(火山活動で災害要因となる事象：加害事象)分析のためには、対象火山の活動様式、噴火の規模と頻度、災害事例などの履歴の記録解析が必須となる。そこで、歴史時代の文書(過去約 2000 年間)に記録されている噴火活動と火山災害について集計し、噴火活動と火山災害のデータを解析して、わが国で発生した噴火災害の加害事象の傾向や特徴について整理することにした。

2.2 わが国での噴火の活動規模と頻度

これまで公表されているわが国での火山の噴火活動の規模と発生数の約 2000 年間の記録(震災予防調査会, 1918; 村山, 1979, 1980; 気象庁, 2013 など)を、これまでの報告(Nakamura *et al.*, 2008; 中田, 2015 など)も参照して、噴火活動の規模と頻度を見積もることにした。さらに、世界での活火山の噴火活動の履歴を GVP (Global Volcanism Program; Siebert *et al.*, 2010) などの公表資料も比較参照した。なお、噴火活動の規模は火山爆発指数(VEI (Volcanic Explosivity Index); Newhall and Self, 1982)によった。

世界での過去 1 万年間の噴火活動の総数は 7,742 回で、噴火規模で VEI 5, 4, 3, 2 の割合は、それぞれ 2.2%, 5.3%, 14%, 49% と GVP により見積もられている(Siebert *et al.*, 2010)。一方、今回の集計では、わが国での噴火活動は総数 1,135 回(このうち噴火規模不明が 137 回を含む)であった。噴火規模(VEI 5, 4, 3, 2)の割合は、それぞれ 1.0%, 4.1%, 11%, 55% と見積もられた。今回の集計した文書の噴火履歴を過去約 2000 年間の記録とみなすと、わが国の噴火発生頻度は、VEI 5 ~ 4 では 80 ~ 15 年に 1 回、VEI 3 ~ 2 では 15 ~ 10 年に 1 回と見積もられた。噴火規模が小さい VEI 2 ~ 1 の噴火数は、最近 500 年間で多いが、それ以前ではこの規模の噴火記録数は著しく少ない。このため、過去約 2000 年間としてのすべての噴火規模別の発生頻度を精度

良く見積もることは難しい。しかし、噴火記録の生存率を考慮することで、規格化したデータに基づく噴火規模別頻度分布にはべき乗則が認められることが指摘されているので(中田, 2015)、噴火規模別の発生頻度のより精度の高い見積もりを、今後こうした手法によりすすめることも可能となる。

2.3 わが国における火山災害の履歴

わが国における火山災害の公表記録を参照し、過去約 2000 年間の加害要因別の犠牲者数(死者・行方不明者と重軽傷者の総数)の集計結果を表 1 に、地域別集計結果を図 1 に示した。なお、火山災害は複数の要因が関わった事例も多いが、記録文書を参照して主たる要因で集計した(1 噴火からの複数要因での集計は今後の課題とした)。この集計で火山災害の加害要因として扱ったのは、降下火砕物、溶岩流、火砕流、泥石流等(土石流・洪水を含む)、岩屑なだれ、火山性津波の 6 項目である。火山性津波は発生頻度が著しく低いが発生すると犠牲者数が多い傾向があるので、より詳細に火山災害の加害要因を解析するために、火山性津波を除いた結果も集計した(図 1a)。

これらの集計結果から、わが国での火山災害の加害要因として犠牲者総数が多いのは、火山性津波、泥石流等、降下火砕物、岩屑なだれ、火砕流の順となっている(表 1)。そのうち、火砕流は犠牲者総数で見ると少ないが、1 噴火当たりの犠牲者数は多い。なお、荒牧(1996)によれば、わが国における過去 400 年間の噴火による死者数に関しては、1 噴火当たりで見ると火砕流の平均犠牲者数は土石流・泥石流と岩屑流(岩屑なだれ)との合計犠牲者数とほぼ同じ程度に集計された。荒牧(1996)は、近年まで火砕流という現象の認識が一般に広まっていなかったために、この集計値は過小評価されている可能性がある指摘している。したがって、今回の集計の火砕流の犠牲者総数の順位も、今後の精査で修正される可能性があるが、本論ではこのまま先に示した順位で扱う。噴火規模(VEI)と犠牲者数の関係をみると、降下火砕物、泥石流等、火砕流での犠牲者数は、VEI が大きいほど増加の傾向がある。一方で、火山性津波や岩屑なだれは噴火の規模(VEI)と犠牲者数とは明瞭な関係は認められずに、1 噴火当たりの犠牲者数が多い傾向がある。

表1 わが国の火山災害の要因別の被害者数(過去約2000年間の記録)
文書記録から過去約2000年間を集計した。

Table 1 Numbers of victims from volcanic hazards recorded in historic time in Japan.
Data are from historic documents for approx. 2,000 years.

噴出物(災害要因) Volcanic Ejecta (Hazards)	事例数 No. of Events	死者・行方不明者 No. of Deceased	重軽傷者数 No. of Injured	犠牲者数 No. of Victims	1例当り死傷者数 No. of Victims per one Event
降下火砕物 Air Fall / Tephra	48	624	338	962	20
溶岩流 Lava Flow	2	2	0	2	1
火砕流 Pyroclastic Flow	5	154	115	269	54
岩屑なだれ Debris Avalanche	2	479	3	482	241
泥流等 Lahar	8	1496	209	1705	213
火山性津波 Volcanic Tsunami	5	17213	2	17215	3443
不明 Unknown	5	63	112	175	35
総計 Total No.	75	20031	779	20810	4007
津波以外の総計 Total No. without Tsunami	70	2818	777	3595	51

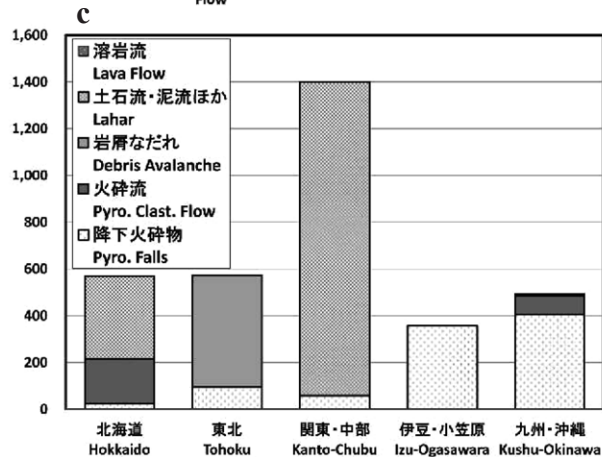
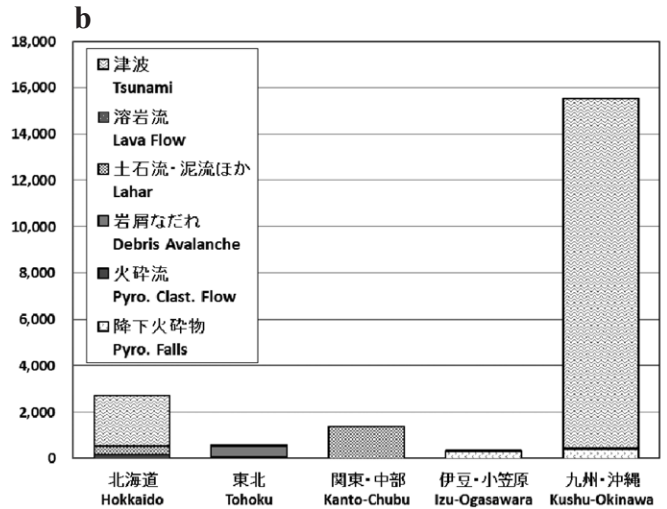
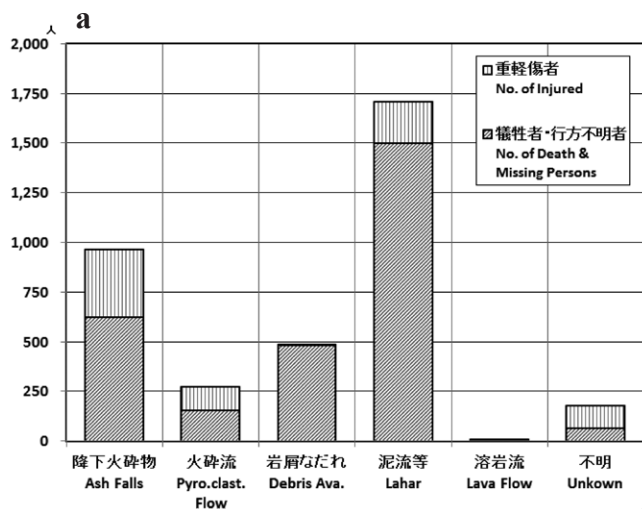


図1 わが国の過去約2000年間での火山災害要因別の被害者数

a 要因別の被害者数(火山性津波を除く)

b 地域別の犠牲者数

c 地域別の犠牲者数(火山性津波を除く)

Fig. 1 Numbers of victims due to volcanic hazards during the past historic period.

a Victims due to main volcanic hazards (numbers except for Tsunami)

b Victims in 5 different locations in Japan

c Victims in 5 different locations in Japan (numbers except for Tsunami)

2.4 世界とわが国における火山災害の比較

世界での火山活動の加害要因と犠牲者数の関係については、これまでいくつかの集計結果が報告されている (Tilling, 1989; Siebert *et al.*, 2010 など)。1900 年以降でみると、火山活動で犠牲者を多く出す加害要因としては火砕流が最も多く、次いで土石流 (岩屑なだれを含む) で、両者で全体の約 85% となっている (Tilling, 1989)。火山性津波と岩屑なだれの発生頻度はかなり少ないが、発生した際は犠牲者が多数となる傾向がみられることも指摘している。

火山災害の加害要因をわが国と世界諸外国とで比較すると、わが国では泥流 (土石流などを含む) による犠牲者 (噴火活動後での二次被害を含む) が総数でも多く、1 件当たりの犠牲者数も多い。また、降下火砕物の被害は総犠牲者数で泥流に次いで多くなっているが、1 噴火当たりの犠牲者数はかなり少ない。これらのことは、噴火活動が安山質マグマのために爆発性であることが多く、火山砕屑物量が噴出物として多く、成層火山をもつ火山地形も出現しやすい。また、降雨量と降雪量が多い気象条件もある。さらに、活火山近傍での人間活動が活発であることも影響している。これらが、先のような火山災害の加害要因の傾向に係わっていると推測される。

自然環境や社会環境がわが国と同様な諸外国や地域での火山災害の傾向は、その加害要因が共通である可能性が高い (Punongbayan, 1996 など)。火山災害の加害要因についてさらに精度よい分析をするためには、活火山地域の自然環境、社会環境、歴史的背景なども考慮し、それぞれの噴火事例についてより詳細な比較・検証が必要となる。

2.5 わが国の活火山地域ごとにみた火山災害

わが国の活火山の分布から、地域による火山災害の履歴について、北海道、東北、関東・中部、伊豆・小笠原諸島、九州・沖縄の 5 地域で区分して、加害要因の傾向・特徴・差異について比較した。なお、火山性津波については発生頻度と犠牲者数の関係を考慮して、含めない場合での集計も行った。これらの地域別の被害状況の集計結果は図 1b と図 1c に示した。

北海道地域の噴火の噴火規模 (VEI) は小さいが、災害履歴は泥流や火砕流での犠牲者数がやや多い。東北地方での噴火履歴では噴火数が少なく VEI も小さめで、災害履歴も少ない。しかし、津波と岩屑

なだれでは発生頻度が少ないが多くの犠牲者を出した実績がある。関東・中部地方では噴火数はやや多く VEI 2 ~ 1 程度だが、土石流・泥流などの犠牲者数が多めである。伊豆・小笠原諸島地方では噴火数が多いが VEI がやや大きめで、災害履歴では降下火砕物による犠牲者がやや多い。九州・沖縄地域では噴火数が最も多く、VEI も大きめの噴火があり、他地域に比べて降下火砕物による犠牲者数が多い。なお、この地域には雲仙眉山 1792 年の山体崩壊と津波により多数の犠牲者が出た履歴がある。火山性津波と岩屑なだれとは多数の犠牲者を出すために、発生があるとその地域の総犠牲者数を押し上げる結果となっている。

噴火災害の事例数は過去約 2000 年間で充分ではないが、これらの傾向は時代とその地域の生活環境とが火山災害の犠牲者数と係わったと推測される。例えば、関東・中部地域での犠牲者総数が他の地域より多いことは、この地域での 1600 年以降の人口密集化が原因の 1 つと推定される。このような噴火履歴と火山災害についての地域的な傾向をより精度良く見積もることで、それぞれの火山地域のもつ火山災害上の特性や傾向の概要が把握でき、それぞれの地域で防災対応の確率的な検討などをすすめるための有効な基礎資料となる。

3. 災害リスクの評価

3.1 リスクの解析

災害リスクの検討が様々な分野で積極的にすすめられて、リスクそのものの検討やリスク評価手法について研究成果が活発に発表されている。近年ではリスクマネジメントや危機管理についての国際標準化指針も出されている。そこで、リスク評価についての解析手法、さらに火山災害のリスク算出手法などの現況について記す。

災害リスクへの対応のための解析は、1970 年代のオイルタンカー事故を契機として、その後に金融デリバティブへのリスク対応、さらに原子力事故などの大規模災害での安全確保のために進展した (USNRC, 1983; Roy *et al.*, 2012; Sparks *et al.*, 2013; Jenkins *et al.*, 2014 など)。現在では、事故、故障、災害など、リスクそのものの解析やリスク評価法について、多方面の分野で研究成果が報告されている (Rember, 2011; Roy *et al.*, 2012; Sparks *et al.*, 2013;

Jenkins *et al.*, 2014 など).

リスク (Risk) とは、目的に対する不確かさの影響一般で、影響とは期待されていることから乖離することを指す。災害一般の解析では、リスクはハザード (Hazard)、脆弱性 (Vulnerability)、失われる価値 (Value)、あるいは失われる可能性の損失 (Loss) や結果 (Consequence) などを抽出して、それらの項目ごとに評価し、それらから目的とするリスクを統合的に解析する。

近年では、減災効果を高めるためのリスク削減やリスク管理 (リスクマネジメント) をすすめることの国際標準化が提唱されて、基本的プロセス標準化が指針とされた (リスクマネジメントに関する国際標準化規格 ISO31000 : 2009, ISO, 2009)。また、リスクマネジメント—指針の国際標準化プロセス (ISO31000 : 2018, ISO, 2018 ; 日本規格協会, 2019) においてはリスクの定義、発見・特定、分析、評価、対応などの時系列的解析、さらに、リスクへの統合的対応のリスクマネジメント (リスク管理) も国際的に推進されている (Woo, 1999; Cox, 2012; Loughlin *et al.*, 2015; COSO-ERM ISO31000, 2017 など)。

3.2 災害のリスク評価

リスク評価では、ある一連の関連状況の始まりから顛末までの全ての現象の総称がイベント (Event, 事象) である。事故、故障、災害のリスクの解析では、イベントによるイベントツリー (Event tree, ET) やフォールトツリー (Fault tree, FT) を作成して評価する手法が数多く提案されている (Matsuoka and Kobayashi, 1988; Bistarelli *et al.*, 2006 ; ISO, 2018 など)。こうしたイベントツリー解析 (ETA : Event Tree Analysis) では、起因となる発生から望ましくない状況の発生までの事象を発生順に並べて、事象それぞれの発生確率値を算出して、確率付きの事象系統樹 (イベントツリー) によってリスクを評価する (ISO, 2018 など)。また、発生事象の要因、あるいは要素の集合をヘディング (Heading) として整理することで、事象発生の分岐条件や分岐確率を算出した事象シーケンス (Sequence) として、発生から顛末までの定量的確率を得て評価する手法もある。さらに、起因事象から結果事象までのイベントの典型的経過をシナリオとして抽出して、そのシナリオに含まれるイベント (出現する可能性のある未出現事象も含む) の発生確率をシナリオで評価する手法も提

案されている (Hassani, 2016 など)。

リスクの評価をするための手法では、どのような評価項目 (ハザード、脆弱性、価値など) からどのような構成要素を抽出し、数値 (あるいは、相対的ランク値) を設定して、評価をどのような手法ですすめるかが主な論点となる。災害リスクでの多く採用されている評価項目としての加害事象 (ハザード : 加害要因となる事象) では、再起性・発生間隔 (Recurrence/Intervals)、発生確率 (Probability)、規模 (Magnitude)、空間的規模 (Spatial Extent) などが評価要素となる。脆弱性項目の評価要素では、対象地域の自然環境や社会環境がもつ災害に対する暴露度 (Exposure)、感応度 (Sensitivity)、回復度 (Resilience) である。結果、あるいは失われる可能性の価値の評価要素ではリスク評価の目的そのものに係るため、抽出されるべき要素はかなり多岐にわたる。

このような災害リスク評価においては、対象地域での地域基礎情報である居住施設、観光・宿泊施設、公共施設、防災施設、交通網などの社会インフラ情報が、リスク値の算出や地図情報での結果提示のための GIS 処理の必須資料となる。このための必要とされる地域基礎情報がデジタルデータとして十分に整備状況されていることで、目的とするリスク評価結果の有効性が確保される。

4. 火山活動の災害リスクの解析と評価算出

4.1 火山活動の災害リスクの解析

自然災害である火山現象による災害リスクでは、マグマが地表付近で活動すると様々な火山現象が災害要因となる。噴火活動の発生頻度は火山の寿命、あるいは活動の継続時間とも係わるために、噴火活動の規模と様式の差 (変動幅) が大きく、活動も時間で変遷する。火山噴火での直接的な火山現象 (噴火事象) 以外にも、活動に伴って発生する火山性地震、地殻変動、空振などが加害事象となる。また、大規模な山体崩壊や、岩屑なだれの発生が湖や海に流れ込んで津波を発生させる。このため、多くの噴火事象が加害要因となる。さらに対象地域での火山地形や気象などの自然環境や地域の社会環境も災害規模などに影響を与える。他の自然災害に比べて災害状況の形態が多様で、想定外の被害も出現しがちである。これらのため、火山災害のリスクの解析・評価の手法は現在も進展中の研究課題である。

米国内の活火山についての今後の防災体制構築を目的として、米国地質調査所(USGS)がNVEWS(National Volcano Early Warning System)を提案して(Ewert, J. *et al.*, 2006), 米国の全 169 活火山地域の火山リスクの評価結果を公表した。それぞれの活火山で、ハザード因子(Hazard Factor: 火山がもつ危険や破壊の因子)とエクスポージャー因子(Exposure Factor: 火山に人や財産が曝される因子)について算出し、その総和から活火山ごとの脅威評価点(Thread Assessment Score)を評価結果として公開した。対象火山ごとに評価項目のリスクが数値で算出された明快な資料で、活火山の防災体制構築のための資料としてこの成果が活用された。

火山活動の災害リスク評価では、火山活動にともなうリスクのハザード要因(加害要因: 活動における加害事象)の抽出が重要となる。したがって、諸外国などでの火山リスクの評価手法で多く採用されているのは、リスクのハザード、リスクに対する脆弱性、リスクの結果として生じる失われる可能性の価値を評価項目とすることが多く、評価項目をどの構成要素で評価すべきかの提案・議論がなされている。さらに、基礎資料として地域基礎情報などをGISを活用し、どのような評価手法で算出するかについても多くの提案がある(UN/ISDR, 2004; Felpet *et al.*, 2007; Nakamura *et al.*, 2008; Rember, 2011; Bartolini *et al.*, 2013; Sobradelo and Marti, 2015 など)。さらに、噴火活動でのイベントツリー・シナリオを活用して、そこからハザードとなる加害事象の発生頻度や規模の確率値をリスク評価に活用する手法なども提案されている(付録にはリスク評価の概要を記した)。

4.2 火山災害リスクの評価算出

火山災害のリスク評価の算出法は、いくつか提案されているが、本研究では下記を採用した。

リスク値(Risk value) = ハザード(Hazard) × 脆弱性(Vulnerability) × 価値(Value)

この評価算出式では、ハザード、脆弱性、価値のそれぞれ評価項目で、構成要素を抽出してランク(数値)化して評価をし、それぞれ評価項目からの集計値(統合値)をリスク値として算出した。今回の集計でのそれぞれの評価項目ごとに抽出した構成要素について、以下に記す。なお、評価項目の要素の具体的なランク設定などの詳細は付録に記した。

4.2.1 ハザード項目の要素

ハザードの評価項目は、加害事象とその規模・頻度などを構成要素とする。

噴火活動のハザード項目の評価のための要因では、発生確率、活動の規模、空間的規模、活動の再起性あるいは発生間隔がおもな抽出要素となる。これらは対象火山の噴火活動と発生した火山災害の履歴、作成された火山防災マップ、火山防災ハンドブック、噴火イベントツリー・シナリオが基礎資料となる。

抽出された災害加害要因となる噴火事象(イベント)について、その発生履歴などからの発生確率を考慮した重み付けを設定し、ハザード評価値を算出する。事象の発生確率値が数値として推定困難な場合には、その災害履歴などを考慮したランク値として設定し、ハザード評価として見積もる。

要素例: 加害事象の規模(Magnitude: Spatial scale), 頻度(Recurrence, Frequency Time scale).

4.2.2 脆弱性項目の要素

脆弱性の項目は、防災体制や防災関係施設などの整備状況を要素とする。

火山災害に対する脆弱性は、加害要因である噴火事象ごとに対象地域のもつ自然環境・社会環境、防災体制から要素を抽出する。自然環境要素(地形や気象)、社会環境要素(人口、公的施設、住宅地、観光宿泊施設、交通路など)、防災体制要素(防災拠点・避難施設や防災体制)となる。これらの要素を抽出するためには、評価対象とする地域の基礎情報が必要な要素を抽出して、それらから脆弱性の評価する。

わが国では人口密度が高くて土地利用率が高いため、火山のごく近傍地域まで住民活動の場があることが多い。さらに火山に立脚した観光産業でも、火山の近傍地域を活用している。したがって、対象火山のハザード要因によって脆弱性の評価は大きく変化する場合あり、要素抽出と算出手法には検討すべき課題が多い。

要素例: ハザードマップ, 地域防災計画, 防災拠点や避難施設, 避難訓練(実働, 図上), 交通路など運輸システム, 地域社会基盤インフラ整備の状況。

4.2.3 価値項目の要素

価値の項目では、対象地域の災害での損失に基づいた予測価値を要素とする。

損失の価値についての評価では、火山災害で失われる対象地域の社会的インフラ(避難施設, 教育機

関、集会所などの施設、公共交通網、通信インフラ)などを評価対象となる要素として抽出する。このため、それぞれの施設種類や規模についての重要度の重み付けによるカテゴリ化(分類)によって、ランク値設定(施設の重要度の重み付け)をして価値の評価をした。さらに、地域の利用状況(農耕地、緑地、公園など)についても評価対象となるが、対象地域の整備された基礎情報が資料として必須となる。

要素例:住民居住(商業地、工業地、住宅地など)状況、非定住者(観光客、別荘住民)状況、土地の活用状況、各種公共的社会基盤インフラ施設の状況。

4.3 デジタル地域基礎情報

火山災害のリスク評価をすすめるうえで、対象火山地域の基礎情報をデジタル資料で収集・整理しておくことは、GISを活用して作業を効率的にすすめるうえで有効である。しかし、わが国では、これらの地域情報は官公庁、自治体、関係機関など多くの部署から公表されていて、その多くは印刷物資料で、そのデータ形式や書式も統一されていない。このため、資料を利用可能なデジタルデータとして集取・整理するためには、かなりの事前作業が必要とされる。

本研究で扱った那須岳地域の地域情報では、米国で推進されている国土空間データ基盤整備(National Spatial Data Infrastructure. NSDI)により公開されているオープンデータに準じる書式で整備して、デジタルデータとした。今回はデータファイルをNSDI書式に採用したことで、GIS(本研究ではNSDI取り込みが容易なArcGISを採用)のデータ収録が簡便にできた。その後の要素抽出や評価値算出が容易にすすめられて、結果としての地図情報の作図作業もGIS処理により効率的にすすめられた。

わが国では活火山地域での火山災害のリスク評価、あるいは他の災害のリスク評価が、これまでほとんど実施されていなかったのは、こうした基礎情報の収集・整備のための作業処理の困難さが一因であろう(中村, 2009; 2010)。こうした地域情報はGISを活用することで、様々な自然災害での迅速な防災対応、さらには地域の防災計画、防災マップ作成などの防災対応への資料として活用できる。米国などで実施されているように、わが国でも、国土情報などの地域基礎データの形式統一がなされて、オープンデータとして公表と活用が容易にできるようになることが望まれる。

5. 火山災害のリスク評価算出

5.1 火山災害のリスク評価項目と要素抽出

火山地域での災害リスクの評価手法は、どのような項目について、どのような評価をして、リスクの評価結果を数値として算出するかについて、いくつか提案がなされてきた(例えば、Ewert *et al.*, 2006)。リスクの評価結果は定量化された数値データとすることによって得られた結果が明快になる。リスクの評価算出は対象とする活火山地域のリスク評価の目的とその地域の自然環境や社会環境に対応した評価項目を抽出・選択することになる。そのために、評価目的に応じて評価する項目と項目の構成要素を抽出して、項目と構成要素にランク設定(上位から下位)して、数値として算出してリスク値を得る方法が多く採用されている。

例えば、Nakamura *et al.* (2008)は、米国での活火山地域実施されたNVEWSで採用された評価手法をわが国の活火山地域に当てはめ、リスク値を算出した。その結果、わが国の平均的活火山地域(例えば、那須岳や吾妻山の火山地域)のリスク値は、NVEWSでの評価された米国における活火山トップ15位程度の高リスク値が算出された。これは、わが国では活火山の周辺近傍地域に社会インフラがかなり分布していることに起因すると推測される。このことは、対象とする火山地域の自然環境や社会環境に対応させた評価手法を採用する必要があることを示唆している。

火山災害リスクの評価は、それぞれの手法は評価目的や対象とする活火山や周辺地域の自然環境や社会環境の特質に応じて、評価項目と構成要素の区分幅や重み付けによってランク化することで、評価結果が明瞭になるような手法が様々提案されている。評価項目(例えば、ハザード、脆弱性、価値)とその要素を充分検証して抽出し、適切なランク値を構成要素に設定するなどの吟味が必要となる。これらのため、火山災害の汎用版として確立されている評価手法は現在存在しない。火山災害リスクの評価を実施するには、対象とする地域での評価対象と評価目的とをよく把握して、そのためのリスク値算出法を予め検討したうえで採用することが重要となる。

5.2 火山災害のリスク評価結果—那須岳地域での事例—

これらを考慮して、火山災害リスクの評価を那須岳地域で実施した。その結果を、ハザード(加害要因としての噴出物)、および住民居住地、公共施設、

観光・宿泊施設，防災関係施設の脆弱性と価値について以下に記す。

5.2.1 火山災害のリスク評価の算出結果

火山災害のリスク値は，評価項目としてハザード，脆弱性，価値により算出する手法を採用した。評価項目のそれぞれで抽出された構成要素をランク化し

て数値評価をし，合計として得られた結果をリスク値とした。なお，今回のリスクの評価値算出において，地域基礎情報の脆弱性と損出価値の評価すべき要素のデータが十分に入手できなかったため，脆弱性と価値とを合わせた評価値として算出した。那須岳周辺地域での火山災害のリスク評価の算出結果の

表 2 那須岳周辺地域の火山災害リスク評価の結果
 a 各公共施設の分布(火口からの距離)からのリスク評価の結果
 b 火山災害要因の想定分布域内に分布する公共施設のリスク評価の結果

Table 2 Results of volcanic risk assessments in the Nasu volcanic area.

a Assessments by distances from the Nasu volcanic crater.
 b Assessments by each hazardous phenomenon.

a

施設の種類 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)
		4	3	2	1
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

Total Risk Value (j):

$$j = RV2 * (a * RV1a + b * RV1b + c * RV1c + d * RV1d + e * RV1e + f * RV1f)$$

eg. $3504 = 4 * (0 * 3 + 4 * 3 + 3 * 1 + 2 * 2 + 3 * 3 + 402 * 2 + 14 * 3)$

b

施設の種類 Type of Facilities	リスクランク値 (RV1) Risk Rank Value	火山噴出物(災害要因) Volcanic Ejecta (Volcanic Hazards)					
		火山弾 Volcanic Bomb	溶岩流 Lava Flow	火砕流 Pyroclastic Flow	土石流 Lahar	降下火山灰(大) Large Ash Falls	降下火山灰(小) Small Ash Falls
		1	2	3	3	2	1
市町村施設 Town Office (a)	3			1		1	11
避難所 Agency Office (b)	3			1		1	17
医療施設 Hospital (c)	3						
消防関係施設 Fire House (d)	2						
警察関係施設 Police Station (e)	2					2	13
教育機関 Educational Fac. (f)	3			1		2	11
観光宿泊施設[小] Small Accommodation (g)	2			1	2	4	25
観光宿泊施設[大] Large Accommodation (h)	3			1	2	7	40
施設数総計 Total No. of Facilities (i)		0	0	5	4	17	117
リスク値総計 Total Risk Value (j)		0	0	42	30	90	313

Total Risk Value (j):

$$j = RV2 * (a * RV1a + b * RV1b + c * RV1c + d * RV1d + e * RV1e + f * RV1f + g * RV1g + h * RV1h)$$

eg. $313 = 1 * (11 * 3 + 17 * 3 + 0 * 3 + 0 * 2 + 13 * 2 + 11 * 3 + 25 * 2 + 40 * 3)$

うちで、各公共施設の分布から得られリスクの評価結果を表2に示した。評価結果とその検証の概要について記す。なお、これらの評価値の算出法と項目要素のランク設定の詳細は付録に記載した。

5.2.2 ハザード(加害要因としての噴出物)の評価結果

噴火活動として、水蒸気噴火、小規模なマグマ水蒸気噴火(VEI 1~2)、マグマ噴火(VEI 3~4)を想定噴火として、公表された火山防災マップに基づいて加害事象を抽出した。それぞれの加害要素に対する地域の災害リスクを設定したランク値から算出した。那須岳火山の水蒸気噴火の加害要因としては噴石と降下火山灰で、その想定分布域は火口から数km以内である。この地域には避難施設、宿泊施設、各種施設などはほとんど分布していない(登山避難小屋とロープウェイ山麓駅のみ)。マグマ噴火の際の加害要因は噴石と降下火砕物、噴出溶岩、火砕流、泥流である。那須岳地域での卓越風による東方の降灰卓越地域に各施設の分布は少ない。また、噴出溶岩によるドーム形成は火口ごく近傍で、登山客向けの避難小屋のみが分布している。一方、火砕流と泥流は火口から約10km付近、一部は約20km付近の市外地域まで、水系分布に依存して到達する。

したがって、那須岳地域の火山災害でのハザードのリスクは、マグマ噴火での火砕流と泥流によるもので、火口から約10km付近で観光宿泊施設の密集分布地域が特に高リスク値となっている。

5.2.3 住民居住地、公共施設、および観光・宿泊施設の評価結果

那須火山周辺地域における公共機関(市町村役場、省庁、教育機関、医療関係、消防関係、警察関係、郵便局)について評価した。火山災害リスクに対する施設の属性、火口からの距離、および分布数からリスク値を評価した。那須火山周辺地域を訪れる観光客数は約500万人/年(観光入込客数)で、5月と8月がハイシーズンである。一方で、那須岳登山者数が多いのは10月で400~1,000人/日、次いで8月となっている。宿泊施設は、全体の42%が火口から5~10km地域に分布し、10~20km地域が28%、次いで20~30km範囲に29%が分布している(図2)。那須町では宿泊施設の82%が火口から5~10km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分布することに起因する。また、この地域に公共施設などが多く分布し、結果

として火口から5~10km付近の河川沿いに幹線道路などの交通網が密集して分布する。

したがって、那須岳の噴火活動が発生した際の火山災害での脆弱性と価値のリスクは、山麓地域に密集した宿泊施設付近で高リスクとなっている。このため、ここに滞在する多数の非定住民をどのように効率的な避難をさせるのが課題となる。

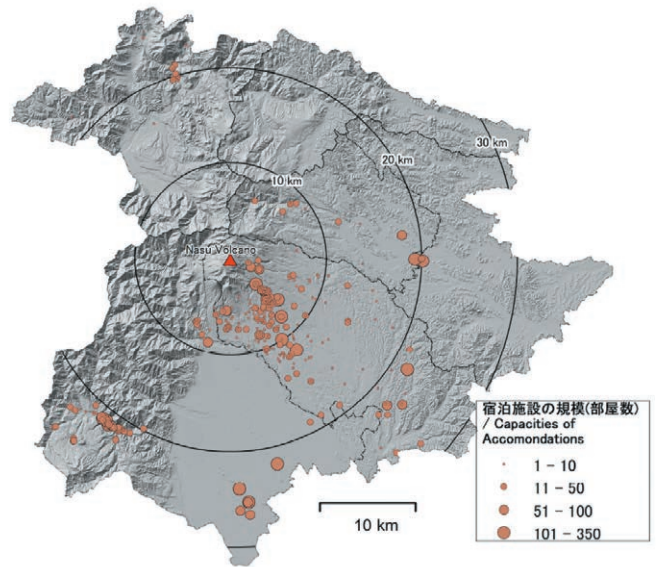


図2 那須岳周辺地域での宿泊施設の規模と分布
同心円は火口からの距離10km, 20km, 30kmを示す。地形図には国土地理院の標高データを使用

Fig. 2 Locations of tourist accommodations in the Nasu volcanic area.

The distances are 10 km, 20 km, and 30 km from the Nasu crater. The topographic map is based on DEM data by Geospatial Information Authority of Japan.

5.2.4 防災関係施設の評価結果

那須岳周辺地域で自治体から指定されている防災関係施設としての避難所は、集会所が全体の50%と最も多く、次いで学校が27%である。これらは、小規模な水蒸気噴火では火口から10~20kmまでの地域の避難所、中規模のマグマ噴火では火口から20~30kmまでの避難所に指定されている。このような噴火規模に応じた避難所の指定には、噴火活動でのハザードによるリスクを考慮することが適切である。しかし、これら避難施設の収容規模は地域住民までが限度となっている。その他の防災関係施設の分布も他の公共施設の分布状況とほぼ同じで、かなり密集した分布となっている。

したがって、那須岳地域の火山災害での防災関係施設の状況から脆弱性のリスクをみると、避難施設は地域住民向けに指定されていて、多数の非定住民を収容するための施設にはなっていない。こうした大規模な観光地で噴火活動が発生した際、多数の非定住民への効果的な避難の指示はわが国全体として火山防災上の課題でもあり、減災効果のあるソフト的な防災対応のあり方の検討が必要とされている。

6. 活火山地域の火山災害リスクの評価結果を活かした防災体制

6.1 噴火活動の噴火イベントツリー・シナリオの活用

わが国の活火山地域での噴火活動イベントツリーやシナリオの作成については、近年それぞれの地域の火山防災委員会などにおいて検討されて公表されつつある。しかし、噴火事象の発生確率値や事象分岐の確率値の見積もりまで提示した噴火イベントツリーの検討・公表はまだ多くはない(中田, 2016; 藤田, 2018; 及川, 2018 など)。噴火活動の発生から活動の推移に伴い発生する事象を発生順(分岐型発生事象も含め)に統合化し、事象それぞれの確率値を算出して示した事象確率による系統樹(確率ツリー構造)として表示させたものが噴火イベントツリーとなる(Sobradelo, R. *et al.*, 2013)。活火山地域でこうして作成されたイベントツリーを参照することで、噴火経過で発生が予測される加害事象が網羅的に系統樹で示されている。したがって、加害事象ごとに必要とされる防災対応を予め検討しておくことが可能となり、想定外の災害事象をなくすこともできて、より迅速な防災対応が可能となる。発生確率頻度の高い事象を抽出した活動推移をダイアグラム形式の噴火シナリオとして作成し、自治体や関係防災機関がより効率的な防災対応の検討をすすめることが、火山防災協議会などで提案されている(那須岳火山防災協議会, 2010)。さらに、噴火イベントツリーを作成することで、リアルタイム型のハザードマップ作成の検討も可能となる。

6.2 噴火イベントツリー・シナリオの活用

－那須岳地域での事例紹介－

リスク評価において、那須岳での評価項目ハザードの要素とそのランク値の検討において、噴火履歴を反映した噴火イベントツリー・シナリオは加害要

因となる噴火事象(イベント現象)の発生頻度や規模などの資料であり、必須の基礎資料となる。そこで、那須岳の噴火履歴の記録とわが国の活火山の噴火履歴を参考に、那須岳の噴火イベントツリーの作成を検討した経過を紹介する(那須岳火山防災委員会, 2009; 那須岳火山防災協議会, 2010)。

那須岳の噴火活動の履歴から、火山防災委員会では小規模水蒸気噴火から大規模マグマ噴火までの規模の異なる4つの噴火活動を対象にした(那須岳火山防災委員会, 2009; 中村 2009)。そこで、火山防災協議会では噴火イベントツリーは次の4つ噴火規模を想定して作成した(那須岳火山防災協議会, 2010)。

1. 小規模な水蒸気噴火：規模 VEI 1, 噴出量： 10^5 m^3 程度, 数十年に1回程度の発生頻度
2. 中規模な水蒸気噴火：規模 VEI 2, 噴出量： $10^5 \sim 10^6 \text{ m}^3$ 程度, 数百年に1回程度の発生頻度
3. やや大規模なマグマ噴火：規模 VEI 3, 噴出量： $10^6 \sim 10^7 \text{ m}^3$ 程度, 数千年に1回程度の発生頻度
4. 大規模なマグマ噴火：規模 VEI 4, 噴出量： 10^8 m^3 程度, 数万年に1回程度の発生頻度

那須岳の噴火履歴では噴火活動の実績が少ないことから、噴火事象の発生確率の信頼性のある値の算出は困難であった。そこで、発生頻度に対応させた頻度レベルを4ランク区分して、時系列推移を頻度ごとの4タイプの矢印で示した。また、想定される事象分岐(ノード)には、分岐前に想定される前兆現象あるいは観測情報を付記した(図3)。この那須岳火山の噴火イベントツリーは、ダイアグラム形式の簡明な図で火山防災ハンドブックにも掲載した(那須岳火山防災協議会, 2010)。那須岳火山防災協議会では噴火イベントツリーとは別に、噴火シナリオ作成すべきとの意見がだされて検討した。那須岳火山の噴火シナリオは、噴火活動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代表的な2タイプの噴火活動を想定した。この噴火シナリオに基づいて、優先順位の高い防災対応、住民避難、道路規制などを策定した(図4)。この噴火シナリオに基づいて噴火警戒レベルを検討して、那須岳火山噴火警戒レベル公表した。

那須岳での噴火履歴を反映した噴火イベントツリー・シナリオでの加害要因としてイベント現象(噴火事象)の発生頻度などの情報は、火山災害リスク

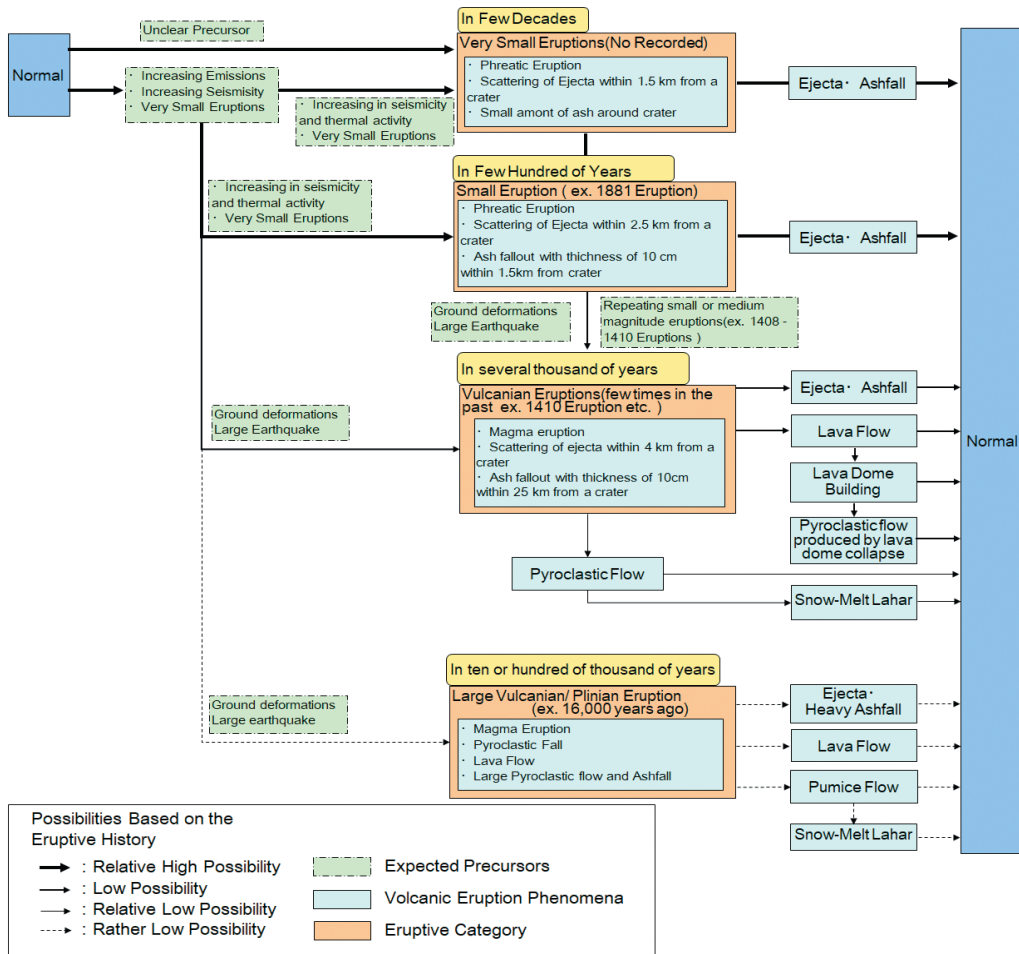
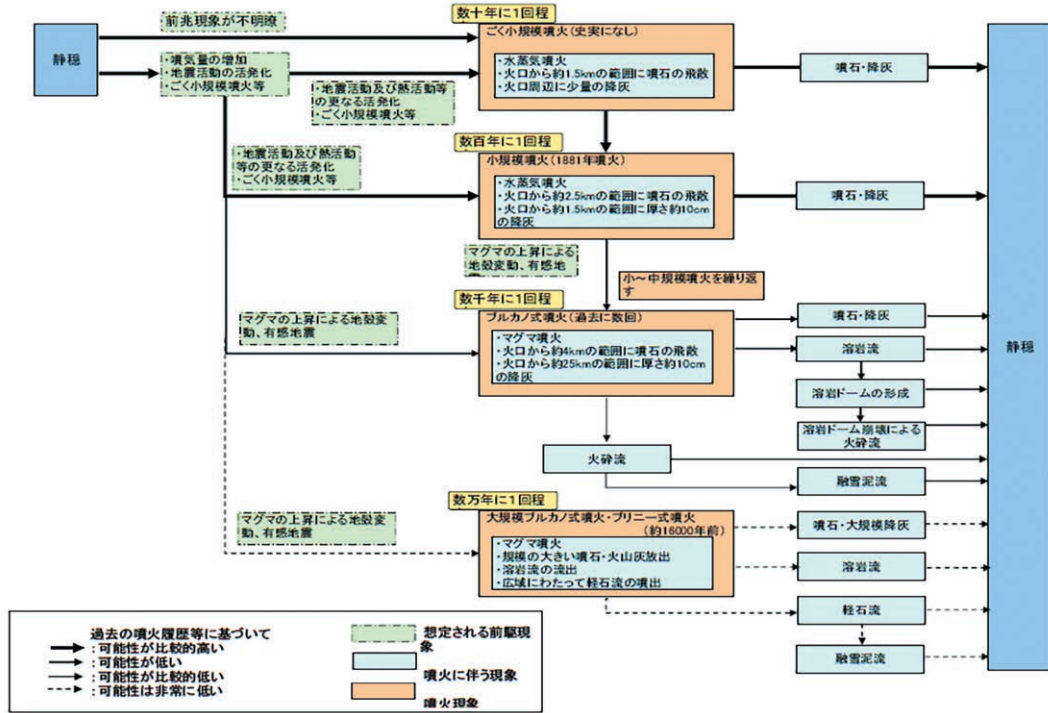


図3 那須岳火山のイベントツリー形式ダイアグラム
 規模の異なる噴火活動を統合して表示した(活動が水蒸気噴火からマグマ噴火に移行した実績を考慮)
 Fig. 3 Eruption event-tree diagram of the Nasu volcano.
 Diagram is showing several eruptions of different sizes of magnitudes.

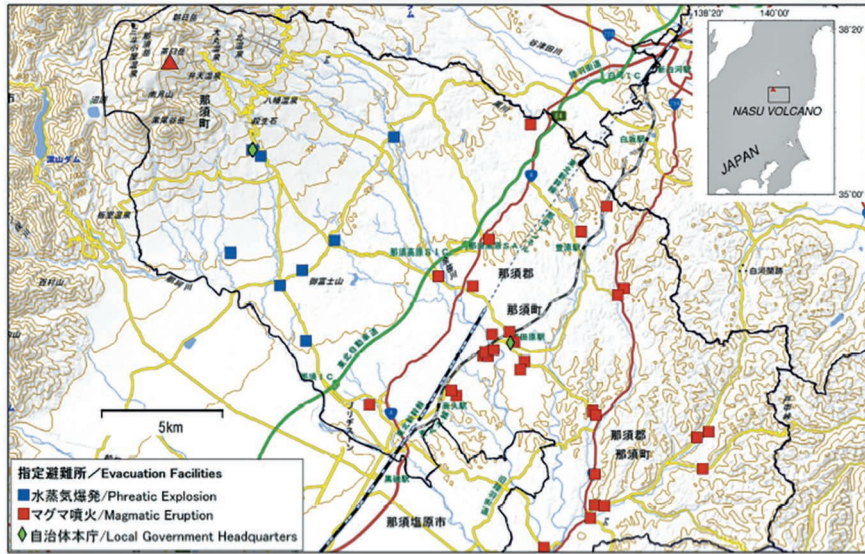


図 4 那須岳周辺地域の指定避難施設の分布状況
 地形、水系、交通網も示した。那須岳火山の位置図を右に示した(基図作成には国土地理院数値地図を使用)
 Fig. 4 Locations of evacuation facilities in the Nasu volcanic area.
 Map shows the topography, water system, and transportation network (map modified from the map of Geospatial Information Authority of Japan).

評価での評価項目ハザードのランク値の適切な設定と算出法の検討をすすめるために有効な基礎資料となった。

6.3 火山災害リスクの評価結果を活かした防災体制

6.3.1 那須岳火山の噴火活動と災害の履歴

活火山地域で火山災害リスクの評価を実施して、その結果を活かした防災体制を検討した事例として、那須岳地域を紹介する。なお、那須岳における噴火シナリオとリスク評価の検証による那須岳地域の火山防災についての詳細については、中村ほか(2021)を参照されたい。

那須火山群で最も新しい那須岳(茶臼岳)は約 1.6 万年前から活動を開始した(松田, 1901; 伴・高岡, 1995; 山元・伴, 1997; Ban and Yamamoto, 2002 など)。この後の噴火活動は、大規模な 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。火山災害として記録に残っているのは、1408-1410 年のブルカノ式噴火(VEI 3)に伴う活動で、初期が水蒸気噴火、その後にマグマ水蒸気噴火、さらにマグマ噴火と移行した。山頂ドーム成長によるドーム崩壊型火砕流が発生し、融雪型火山泥流が山麓の水系へ流れて、犠牲者 180 余名と牛馬多数の被害を出した(松田, 1901; 山元・伴, 1997; 気象庁, 2013 など)。

この後に複数回の水蒸気噴火があったが、犠牲者の記録はない。

この那須岳の噴火履歴と公表された火山防災マップ・ハンドブックから、火山災害リスク評価の対象地域を栃木県の那須町および那須塩原市、および福島県の白河市、西郷村、下郷町および天栄村とした。那須岳地域には数多くの温泉宿泊施設や大規模レジャー施設等があり、例えば山頂から約 1 km にロープウェイ山麓駅がある。これらのため、那須町住民が約 2.7 万人であるが、年間約 500 万人の観光客が訪れ、春や秋の観光シーズンは月 50 万人以上の非定住民が滞在している。

6.3.2 那須岳地域での火山災害防災体制

那須岳地域の噴出物の想定分布域(那須岳火山防災マップ改定版: 那須岳火山防災協議会, 2010)と各種施設の分布状況を表示した(図 5)。さらに今回のリスク評価結果から、火山活動における災害要因となる噴火事象の発生が想定される地域とその影響を受ける各種施設の分布状況も表示した。火山災害リスク評価の結果から、火山防災マップを参照した噴出物想定分布域示図に、噴火時における火山災害のリスク状況を示すマップを GIS で作成した(図 6)。これらの図などを参照することで、那須岳地域における想定される火山災害のリスクが明瞭となる。以

下にその概要を記す。

那須岳の噴火活動が小規模な水蒸気噴火による加害要因は降下火砕物（噴石と降下火山灰）のため、その影響範囲と対象施設分布状況から火山災害リスクは低い。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 域に分布している温泉宿泊施設・居住施設、および避難施設でのリスクが高くなる。さらに、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 までの居住地域、公共施設、観光地に影響が及ぶことになり、東南麓域広域でリスクは高くなる。このように那須岳の火山災害リスクは、地域の自然環境と社会環境とが密接に関連していることが読み取れる。

那須岳地域の今回のリスク評価結果をふまえた火山災害への防災対応の課題を概略する。那須岳はわ

が国の 50 の常時観測火山（2019 年 3 月現在）の 1 つである。那須地域は首都圏近傍の集客力のある観光地のため、多数の観光客や非定住民が滞在している。この地域の住民居住地域、各種公共施設、観光客の滞在施設はほぼ同一地域に密集し、そのため防災施設や避難経路となる交通網もこの地域を中心とした分布となっている。このため、火山災害が高リスクのとなった地域では、突発的な噴火活動の開始や活動の活発化に際して、即応性のある避難誘導などの防災対応の早急な準備が求められる。那須岳の噴火活動の特性と地域の自然・社会環境の現況をふまえて、今回実施した噴火イベントツリーや火山災害リスク評価の成果を充分活用することによって、中・長期的な減災効果の高い防災体制の検討が可能となる。

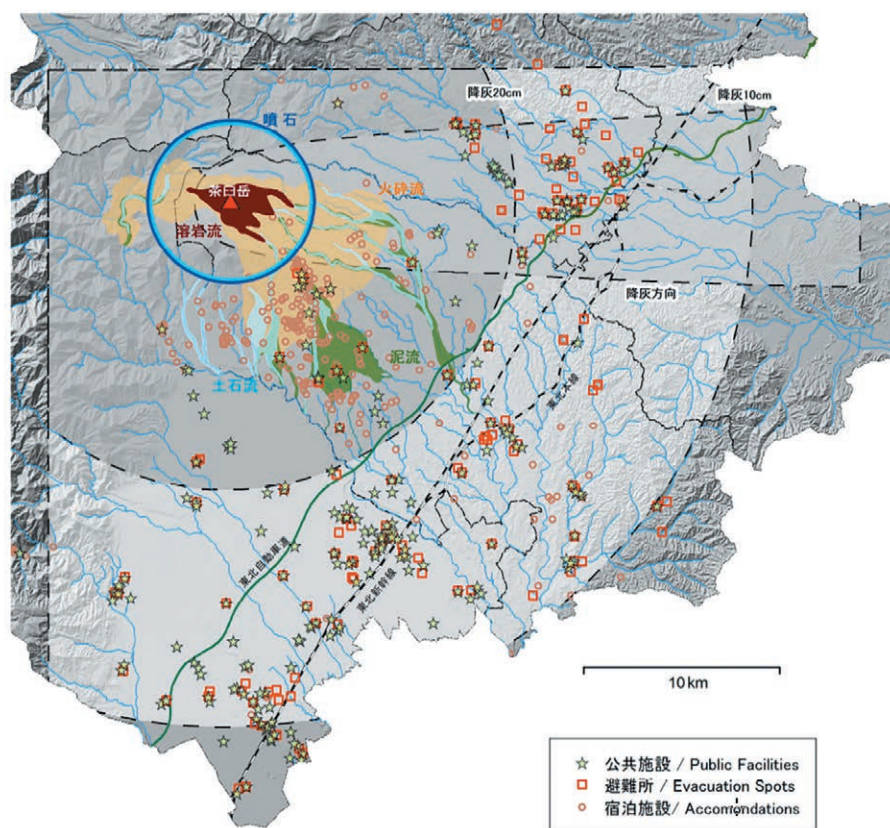


図 5 那須岳周辺地域の噴出物想定分布域と公共施設・宿泊施設の分布 (地形図作成には国土地理院の標高データを使用)
 Fig. 5 Map showing the volcanic ejecta and tourist accommodations in the Nasu volcanic area.

Assumed distributions of volcanic ejecta are referred to on the disaster prevention map of Nasu (map modified from the map of Geospatial Information Authority of Japan).

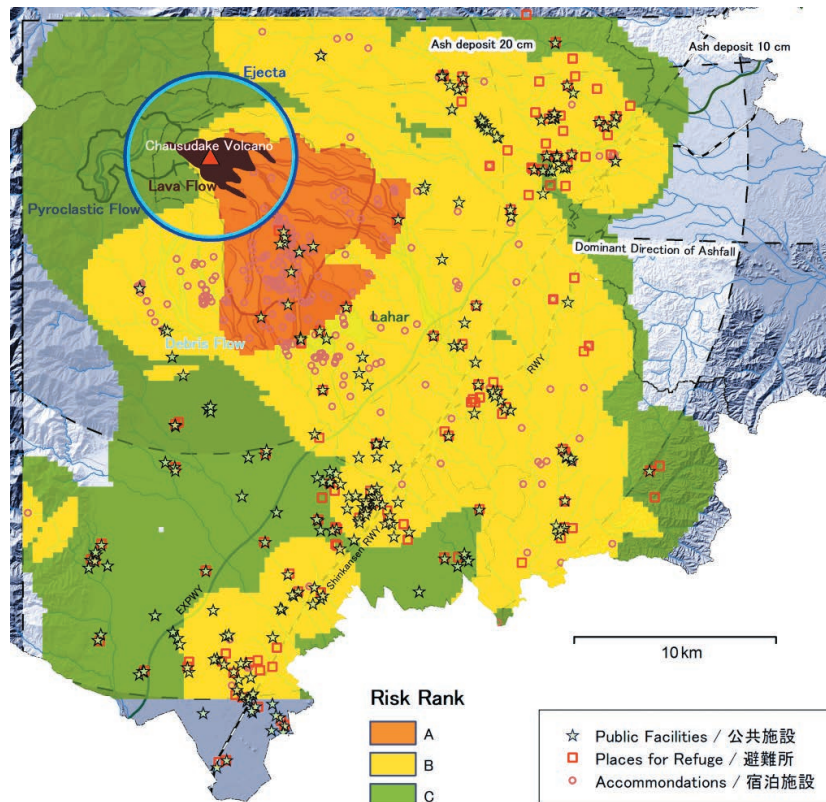


図 6 那須岳周辺地域の火山災害リスク評価結果
 評価結果から高位から低位に A, B, C 地域に区分して図示. 火山災害リスク評価の結果から GIS で作成.
 噴出物想定分布域是那須岳火山防災マップ(2010)から参照した.

Fig. 6 Volcanic risk map of the Nasu volcanic area.
 Areas of risk A, B, and C correspond to the risk values of probabilistic results based on the assessments of
 volcanic risk shown by GIS data-integration. Assumed distributions of volcanic ejecta are referred to on the
 disaster prevention map of Nasu volcano (2010).

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、必要とされている防災上の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 (Ewert *et al.*, 2006) でのリスク評価手法と同一の手法で試行して比較した。NVEWS の脅威指数上位 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)。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 (Threat

Score, NVEWS) は 130 となる。

わが国の活火山地域においては土地利用状況が米国と比べ高いことを示している。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、火砕流と泥流による犠牲者の多い噴火事例が数多くある。那須岳地域でもこの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推定さ

れる。このような観光施設や住宅地等の分布は、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は高い傾向になる。

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。

2014年御嶽山噴火などの災害を教訓として、活動火山対策特別措置法が2015年に改正された。この法改正で、火山防災協議会の充実や火山ハザードマップ・防災マップを活用した活火山地域での地域防災計画の再検討などが積極的に進められつつある(山里, 2008; 気象庁, 2013; 中村ほか編, 2013)。わが国における効率的な火山防災体制を構築するには、噴火活動予測に対しては確率的評価の導入とGISを用いて定量的な火山災害リスク評価方法を取り入れる必要がある。さらに、噴火イベントツリー・シナリオを作成することによって、噴火推移で発生する加害要因となる噴火事象のリスク状況を考慮し、確率的予測に基づくリアルタイムハザードマップ作成も可能となり、より減災効果のある防災対応が活火山地域で実現される。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火山防災体制の進展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。那須岳地域の基礎情報資料は多くの自治体や関係機関から提供を頂いた。ここに記してこれらの方々に感謝する。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。ここに記して厚く謝意を表します。

付録：火山災害のリスク評価に関する資料

1. リスク評価に関する語の定義

リスク評価に関わる用語説明を文献(本稿3章参照)に基づき列記した。

イベントツリー(Event tree, ET)：起因となる発生から望ましくない状況の発生までの事象を発生順に統合化して、事象それぞれの確率値を算出して事象確率による系統樹(確率ツリー構造)として表示する。同様な手法として、フォールト(故障, 事故)によるフォールトツリー(FT)もある。

ヘディング(Heading)：発生事象あるいは要素の集合ごとに整理してヘディングとし、事象発生の方岐条件など事象シーケンスとして、発生や分岐の確率を算出することで、ETやFTの定量的確率が得られる。

イベントツリー解析(Event Tree Analysis, ETA)：イベントツリーでの事象の発生確率値を算出して解析する。同様なリスク解析手法として、フォールトツリー解析(Fault Tree Analysis, FTA)がある。

リスクシナリオ(Risk scenario)：脅威としての起因事象から損失・被害の結果事象までを、典型的経過の抽出、あるいは想定してシナリオとし、シナリオの発生確率などを解析・評価してリスク管理をする。

2. 火山災害のリスク評価に用いる基礎資料

那須岳地域でリスク評価を実施した際に収集したデータを以下に列記した。

2.1 地域基礎情報のデジタルデータ

地域基礎情報のデジタルデータをリスク評価の基礎データとするため、那須岳地域では各種地域情報を収集した。地域基盤地図などを基図として、社会生活基盤、地域住民関係、宿泊施設・観光客、防災関係のデータを地域自治体や公共機関から情報・資料の提供を受けて収集し、デジタルデータとしてGISにより統合した。それぞれ具体的に収集した情報・資料は下記の通り。資料を提供頂いた関係自治体や機関の方々に、ここに記して感謝する。

2.2 地域基盤地図データ

国土地理院発行のデジタル地図データ、基盤地図情報数値標高モデル(10 m, 5 m メッシュデータ)、国土数値情報平成20年度作成版、国土数値情報緊急輸送道路平成27年度7月版、国土数値情報平

成 29 年 12 月版，数値地図 25,000 空間データ基盤 (1/25,000 地形図) は，ArcGIS データコレクションスタンダードパック (全国基盤地図，全国街区住所，全国人口統計の GIS データ集) これらを GIS (ESRI ジャパン，Arc10.5.1) で統合した

2.3 社会生活基盤データ

社会生活基盤データは，国土交通省が保有する国土数値情報の「公共施設」平成 18 年度作成版，および福祉施設データについては平成 27 年度作成版を使用して，国の関係機関・厚生機関，地方公共団体，学校，消防署，警察署，郵便局，主要病院などから収録した。また，民居住地区，各種公共施設などは，自治体公表の印刷物や HP で公開している資料や自治体から提要を受けて収集して，GIS により統合した。

2.4 地域住民関係データ

人口総数データは，独立行政法人統計センター HP で公開されている「国勢調査 (2014/3/28)」などのデータを用いた。また，各自治体 HP 公表の各種の関係情報を収集し，対象地域の人口総数や世帯総数などを項目ごとに整理して GIS により統合した。

2.5 観光関係 (宿泊施設・観光客など) データ

活火山周辺地域には温泉関係の宿泊施設や観光産業施設が多数分布していることが多い。各地域の提供の各種施設の資料に加えて，最新データは旅行観光関係商業誌なども参照した。地域を訪れている観光客数は関係自治体からの宿泊施設データなどから，登山者数は環境省設置の登山道入口のカウンター資料の提供を受けた。那須岳では那須ロープウェイ利用客数は関係機関から提供を受けて，最近 5 年間のデータから集計した。

2.6 防災関係データ

地域の防災関係の各種情報データには，関係自治体や国県が公表している地域防災計画，那須町 (平成 29 年度版)，那須塩原市 (平成 29 年度版)，下郷町・西郷村 (平成 27 年 1 月版) などを参照した。また，噴火時の防災拠点や避難施設の情報は，那須岳火山防災マップ・防災ハンドブック，自治体公表の資料や HP を用いた。これらの情報を GIS により統合した。

3. 火山災害リスクの評価法

3.1 火山災害のリスク評価の算出法

災害リスクの評価で，これまで提案されているリ

スクの評価算出法は下記が挙げられる。リスクをどのような項目で評価するのか。また，それぞれの評価項目はどのような構成要素とし，それぞれを数値化して評価を算出するかがポイントとなる。なお，本稿の火山災害リスクの評価では式②を採用した。

- ① リスク (Risk) = ハザード (Hazard) × 脆弱性 (Vulnerability)
- ② リスク (Risk) = ハザード (Hazard) × 脆弱性 (Vulnerability) × 価値 (Value)
- ③ リスク (Risk) = ハザード確率 (Hazard Probability) × 結果 (Consequence)
- ④ リスク (脅威度, Threat Score) = ハザード要因 (Hazard Factor) × 暴露要因 (Exposure Factor)

3.2 火山災害のリスク評価項目

本稿での火山災害のリスク評価での評価項目は，ハザード，脆弱性，価値とした。

ハザード (加害要因) : 発生している火山現象で，対象火山活動の再起性あるいは発生間隔 (Recurrence / Interval)，発生確率 (Probability)，規模 (Magnitude)，空間的規模 (Spatial Extent) などの観点が重要となる。活火山の災害噴火履歴を参照することで，ハザードの評価項目の構成要素を抽出する。

脆弱性 : 周辺地域の自然環境的特質，周辺地域の社会環境，防災体制などについての暴露性 (Exposure)，感受性 (Sensitivity)，回復性 (Resilience) という観点から地域性を考慮して，脆弱性の評価項目の構成要素を抽出する。

価値 (結果として失われる価値) : 地域の自然環境や社会環境，および社会インフラから人や財産が損失を受ける可能性の価値について，価値の評価項目の構成要素を抽出する。

3.3 リスク評価で採用した評価項目とその構成要素

那須岳周辺地域でのリスク評価では，以下の式によって (上記の式②)，得られた値をリスク値とした。

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

それぞれの評価項目 (ハザード，脆弱性，価値) の構成要素は，デジタル地域基礎情報のデータから以下のようなランクを設定して算出した。なお，那須岳の火山防災協議会では 2 つ噴火タイプ (水蒸気噴火とマグマ噴火) を想定している。そこで，リスク値は火口から 10 km，20 km，30 km，40 km の範囲ごとに算出した。算出にあたっては，デジタルデー

タから GIS で処理して、算出した。その際に、那須岳周辺地域での自然環境・社会環境の各要素の分布状況(地形, 水系, 交通路, 各種施設など)を GIS で重ねた統合マップ作成は、集計や結果の適切性など確認などの際に有効に活用できた。また、リスク評価の結果を統合したマップは火山防災マップと重ね合わせたことで、那須岳地域のリスク概要が明瞭と図示され、火山災害リスクマップの試作版(プロトタイプ)となり、この地域の中・長期の火山防災体制構築のための有効な情報となった。

(1) ハザード項目における各要素とそのランク値

ハザードの要素抽出とそのランク設定においては、噴火イベントツリー・シナリオで示された那須岳の噴火事象の発生頻度や規模などのデータを参照した。那須岳の2つ噴火タイプ(水蒸気噴火とマグマ噴火)を参照した。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。ランク値は高位から低位に 3~1 と設定して、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) 脆弱性項目における各要素とそのランク値

脆弱性項目は、自然環境, 社会環境, 防災体制とした。自然環境要素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)は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、施設情報が集取できなかったものの評価は集計できなかった。

(3) 価値項目における各要素とそのランク値

価値の項目については、対象地域の損失予測について評価するが、損出価値の算出には地域基礎情報の精度良い資料が必要とされる。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 とし、要素のランク設定をした(なお、住宅地域と非住宅地域は大別して分布面積割合で算出したが精度が十分でないものは部分補正した)。

参考文献

- 1) 荒牧重雄(1996): 火山災害. 近代世界の災害, 国会資料編纂会, 145-184.
- 2) Aspinall, W. P., Woo, G., Voight, B., and Baxterm P. J. (2003): Evidence Based Volcanology: Application to Eruption Crises. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **128** (1-3), 273-285.
- 3) 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**, 195-214.
- 4) 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.
- 5) Bartolini, S., Cappelio, A., Marti, J., and Del Negro, C. (2013): QVAST: A New Quantum GIS Plugin for Estimating Volcanic Susceptibility. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **13**(11), 3031-3042.
- 6) Bistarelli, S., Fiorvanti, F., and Peretti, P. (2006): Defense tree for economic evaluation of security investments, in *Availability Reliability and Security. ARES*. 1-8.
- 7) Blong, R (2000): Volcanic Hazards and Risk Management. 1215-1227. In Sigurdsson, H. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*. San Diego.
- 8) COSO-ERM (2017): Enterprise Risk Management -Integrating with Strategy and Performance, Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission (COSO-ERM: ISO31000).
- 9) Cox, L.A. (2012): Confronting Deep Uncertainties in Risk Analysis. *Risk Anal.* **32**, 1607-1629.
- 10) Ewert, J. W., Guffanti, M., Cervelli, P., and Quick, J. (2006): The National Volcano Early Warning

- System (NVEWS). USGS Fact Sheet, FS 2006-3142, 62pp.
- 11) Felpet, A., Marti, J., and Oritiz, R. (2007): Automatic GIS-Based System for Volcanic Hazard Assessment. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **166**, 106-116.
- 12) 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－噴火・噴火未遂事象からの検討－. *月刊地球*. **40**(3), 176-184.
- 13) Hassani, B.K. (2016): Scenario Analysis in Risk Management: Theory and Practice in Finance. Springer, 162pp.
- 14) IAVCEI Subcommittee for Crisis Protocols (1999): Professional Conduct of Scientists during Volcanic Crises. *Bull. Volcanol.*, **60**, 323-334.
- 15) ISO (2009): Risk management-Principles and Guidelines ISO 31000:2009. International Organization for Standardization, 24pp.
- 16) ISO (2018): Emergency management. Guidelines for incident management. Risk Management—Guidelines. ISO31000: 2018, International Organization for Standardization, 16pp.
- 17) 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.
- 18) 気象庁 (2013) : 日本活火山総覧 (第 4 版), 大蔵省印刷局.
- 19) Loughlin, S.C., Sparks, S., Brown, S.K., Jenkins, S.F., and Vye-Brown, C. (2015): Global Volcanic Hazards and Risk. Cambridge University Press, 408pp.
- 20) Marzocchi, W., Garcia-Aristizabal, A., Gasparini, P., Mastellone, M.L., and Dirocco, A. (2012): Basic Principles of Mutlri-Risk Assessment: A Case Study in Italy, *Nat. Hazards*, **62**, 551-573.
- 21) 松田繁 (1901) : 那須火山地質調査報文. 震災予防調査会報告, **36**, 68pp.
- 22) Matsuoka, M. and Kobayashi, M. (1988): GO-FLOW: A New Reliability Analysis Methodology. *Nuclear Science and Engineering*, **98**, 64-78.
- 23) 村山磐 (1979) : 日本の火山 I 314pp, II 276pp, III 242pp. 大明堂.
- 24) 村山磐 (1980) : 日本の火山 増補版, II 285pp, III 259pp. 大明堂.
- 25) 内閣府 (2018) : 防災白書 (平成 30 年度版). 日経印刷, 251pp.
- 26) 中田節也 (2015) : 火山爆発指数 (VEI) から見た噴火の規則性. *火山*, **60**(2), 143-150.
- 27) 中田節也 (2016) : 噴火シナリオと確率的予測. *火山*, **61**, 199-201.
- 28) 中村洋一 (2005) : 那須岳の火山防災マップ. *月刊地球・日本の火山ハザードマップ (下)*, **27**(5), 333-335.
- 29) 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.
- 30) 中村洋一 (2009) : 火山ハザードマップと火山防災. 183-197. 井田・谷口編「火山爆発に迫る」, 東京大学出版会, 225pp.
- 31) 中村洋一 (2010) : 噴火イベントツリー, 火山災害リスク評価を活用した火山防災. *消防科学*, **102**, 27-32.
- 32) 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.
- 33) 中村洋一・鈴木美香・棚田俊収 (2021) : 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－. 防災科学技術研究所研究報告, 第 85 号, 59-74, <http://doi.org/10.24732/NIED.00003345>.
- 34) 那須岳火山防災委員会 (2009) : 那須岳火山噴火警戒レベル導入検討委員会報告書. 那須町, 79pp.
- 35) 那須岳火山防災協議会 (2010) : 那須岳火山防災マップ・那須岳火山防災ハンドブック (改訂版). 那須町.
- 36) 日本規格協会 (2019) : JIS Q 31000:2019 リスクマネジメント－原則及び指針. 27pp.
- 37) 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.
- 38) 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.
- 39) 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－イベント・ツリー, フォルト・ツリーの紹介－. *月刊地球*, **40** (3), 170-175.
- 40) 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.), *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo*, Philippine. Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City, and University of Washington Press, Seattle. 1126pp.
- 41) Rember, A. (2011): GIS as a 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.
- 42) 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.
- 43) Siebert, L., Simkin, T., and Kimberly, P. (2010) *Volcanoes of the World* (3rd ed.) Berkly, CA, University of California Press, 551pp.
- 44) 震災予防調査会 (1918) : 「日本噴火志」復刻版 1983. 五月書房, 116pp.
- 45) 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.
- 46) 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.
- 47) Sparks, R.S.J., Aspinall, W.P, Croweller, 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.
- 48) Tilling, R. I. (1989): Volcanic Hazards and Their Mitigation: Progress and Problems. *Rev. Geophys.*, **27**, 237-269.
- 49) Toyos, G.P., Cole, P.D., Felpeto, A., and Marti, J. (2007): A GIS-Based Methodology for Hazard Map – Ping of Small Pyroclastic Density Currents. *Nat. Hazards*, **41**, 99-112.
- 50) UN/ISDR (2004): *Living with Risk: A global review of disaster reduction initiatives*. International Strategy for Disaster Reduction, United Nations, 429pp.
- 51) USNRC (1983): *PRA Procedures Guide. A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants*. NUREG/CR-2300.
- 52) Woo, G.Ed. (1999): *The Mathematics of Natural Catastrophes*. London, Imperial Collage Res, **7**, 387-413.
- 53) 山元孝広・伴 雅雄 (1997) : 那須火山地質図. 通商産業省工業技術院地質調査所.
- 54) 山里平 (2008) : 日本の火山防災体制. 417-424, *火山の事典*[第2版], 朝倉出版.
- (2020年11月18日原稿受付,
2020年12月24日改稿受付,
2020年12月24日原稿受理)

要 旨

火山活動にはかなり広い規模と活動期間などをもつ多様な火山現象がある。わが国の歴史噴火記録を参照し、加害要因となる火山災害のもつ確率的なデータを算出して、火山災害の確率的特性を整理した。また、わが国における活火山の事例として那須岳地域とりあげて、火山災害のハザード、脆弱性、損失価値を評価項目として、GIS を活用して火山災害のリスク評価を実施した。これらの結果から、火山災害の GIS を活きたリスク評価は、火山防災体制構築のために重要な情報を提供する。したがって、わが国における火山災害への堅牢な火山防災体制構築をすすめるためには、減災効果の高いダイナミックで確率的な防災対応が期待される。

キーワード：火山防災，火山災害リスク評価，噴火イベントツリー，日本の火山