

1年間にわたる風速場を考慮した桜島大規模噴火に対する降灰ハザードマップの作成

中谷 剛¹・浅野 敏之¹

Ash fall hazard maps for a large-scale eruption of Sakurajima volcano considering daily wind fields over a one-year period

Tsuyoshi NAKATANI¹ and Toshiyuki ASANO¹

Abstract

This study presents ash-fall hazard maps for an eruption of Sakurajima volcano of similar scale to the Taisho eruption based on tephra transport simulations accounting for daily variations in wind fields over a 1-year period. Existing hazard maps indicate deposition of ash on the eastern side of Sakurajima by westerly winds, which reflects the mean annual wind direction. This study analyzed ash deposition by implementing daily-base computations with no prior statistical processing. The results reveal that the maximum-class deposits occur around Kagoshima Chuo Station focused in August, when the wind direction is not annually predominant one. The resultant hazard map based on the maximum thickness of the deposits differs from existing maps and provides useful information for creating disaster evacuation plans. Further hazard maps are proposed based on the frequency of the ash-fall exceeding a particular thickness and on a highest 1% deposit thickness, and we discuss suitable methods of expressing ways responding to the users' class and object.

キーワード：降灰ハザードマップ，火砕物輸送シミュレーション，桜島，大正噴火，火山防災

Key words: ash fall hazard map, tephra transport simulation, Sakurajima, taisho eruption, volcano disaster prevention

1. はじめに

爆発的な噴火では、マグマは火道を上昇する過程で粉碎され大小の粒子になり冷えて固まる。直径64 mm 以上を火山岩塊といい、弾道を描いて

飛散し被害を与える。直径2-64 mm の粒子を火山レキ、2 mm 以下を火山灰と呼ぶが、これらは風によって遠方まで流されながら地上に落下し、市民生活や産業などに被害を及ぼす。また、火山

¹ 鹿児島大学地震火山地域防災センター
Research and Education Center for Natural Hazards,
Kagoshima University

ガスと火砕物が混合した高温混相流が一団となって地表面を流下する火砕流、溶けた岩石が高温状態で地表面を流れる溶岩流、水・二酸化硫黄・硫化水素・二酸化炭素などを成分とする高温の火山ガス、火山噴出物が水と混合して地表を流れる火山泥流・土石流が火山噴火に伴う現象としてあり、これまで数々の火山災害を引き起こしてきた。

これらの火山災害の中で最も影響範囲が広いのが降下火砕物（いわゆる降灰）による被害で、降灰被害への備えには、以下の2つの難しさがある。第一に、大規模噴火が稀な自然現象であること。国内で最も活発な火山である桜島の場合でも、近年の大規模噴火は1914年のことである。そのため災害に関する知見を学ぶ機会がない。また、この107年間に社会のあり方が大きく変容したため、当時の貴重な被災経験の伝承や記録をそのまま生かすことが難しい。いま大規模噴火が起きた場合、どのような被害が社会に及ぶのかは想像するしかない難しさがある。第二は、事前の被害想定が難しいこと。例えば水害による浸水範囲は、土地の低い場所や河川の近くなど地形的要因が支配的なので、事前に想定される危険箇所を一定程度把握できる。一方で降灰の影響範囲や降灰量はその時の気象条件、特に風向・風速に左右されるため、事前の被害想定が難しいことが挙げられる。こうした火山防災の困難さを踏まえ、火山防災への備えとして降灰ハザードマップの作成は重要であると考えられるが、降灰マップが作成されている火山は少ないのが現状となっている。富士山を対象とした降灰ハザードマップは、「降灰可能性マップ」¹⁾として作成されている。これは、富士山山頂で宝永噴火（1707年）規模の噴火が発生した場合を想定した月別降灰ドリルマップ²⁾から、地点毎の年間最大堆積深を求め降灰分布図を作成している。月別降灰ドリルマップは、予め宝永噴火や有珠山の噴火（1977年）による降灰分布を再現可能な3次元移流拡散モデルを構築し、過去45年間の平均的な気象場を月別に与えた数値シミュレーション結果から求められた降灰予測分布図である。これらの予測分布図は、大規模噴火時の応急対策等の検討に活用されるという性格があるこ

とから「ドリルマップ」との名称が使われている。富士山の降灰可能性マップは、現状では最も優れた手法で作成されていると言える。

ところで、桜島は日常的にも爆発的な噴火を繰り返している活発な火山であるところが富士山とは相違する。概ね噴煙高度が1000 mを超える噴火だけでも年間に約800回程度（過去10年間の平均値、気象庁）ある。また桜島からわずか10 km圏内には人口60万人の鹿児島市の中心市街地があることも防災上の懸念となっている。2020年の5月と8月の早朝の噴火によって、鹿児島空港では午前中の便を中心に多くの欠航が発生した。大規模噴火に限らず、噴煙高度が5000 m程度の噴火であっても地域社会や経済への影響が出ている。大正噴火から100年以上が経ち、また観測されているマグマの蓄積量から地質学的時間スケールではなく、社会的時間スケールで次の大規模噴火を視野に入れるべき³⁾との指摘もなされている。桜島とその周辺地域の災害特性を考えると、桜島火山防災への備えとして、社会の脆弱要因による災害リスクを可視化できる降灰ハザードマップの作成は重要である。桜島の大規模噴火に対するものとして、2007年に桜島火山防災検討委員会⁴⁾によって作成された広域降灰予測マップが挙げられる。そこでは桜島上空の風向風速を分析し、各方向に火山灰が到達する可能性のある範囲の降灰堆積厚が示されているが、堆積厚10~30 cm、30~50 cm、50 cm以上の3段階での表示であって、また堆積厚結果を包括的に表示したため桜島を中心とした同心円状の結果となり、どの地域がどの風の状況下で堆積厚が大きくなり危険な状態になるかが不明確であると考えられる。これ以外の火山灰堆積量のハザードマップのほとんどは、1年間では平均的に西風が卓越するとして、桜島から鹿屋市方面に降灰量の多い結果を示すマップとなっている。

本研究では、住民の避難行動の啓発を目的に降灰シミュレーションモデルを構築し、平均的な気象場ではなく日単位の風向・風速を入力条件とした計算を1年間を通して行い、その最大降灰堆積深に基づく桜島の降灰ハザードマップを作成した

ので報告する。また、最大降灰堆積深に基づいた降灰ハザードマップの課題についても議論する。

2. 降灰シミュレーションモデルの概要

降灰シミュレーションモデルは、火山灰が風の影響を受けながら移流・拡散・沈降する過程を対象とするモデルで、次式の2次元移流拡散方程式を基礎方程式^{5,6)}とした。鉛直方向の運動方程式は考慮していないが、火砕物の降下速度を導入することで3次元的な計算を可能にしている。

$$\frac{\partial C_L}{\partial t} + W_x \frac{\partial C_L}{\partial x} + W_y \frac{\partial C_L}{\partial y} - w_{s,L} \frac{\partial (C_L)}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 C_L}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C_L}{\partial y^2} + C_{L,source}^* \quad (1)$$

ここに、 C_L は粒径階 L の火砕物濃度、 $w_{s,L}$ は降下速度、 W_x, W_y は水平 x, y 方向の風速、 K_x, K_y は拡散係数、 $C_{L,source}^*$ は単位時間あたりに放出される粒径別火砕物濃度で、その鉛直分布は噴煙柱内火砕物の質量の離脱率を記述する以下の Suzuki 式⁷⁾で与える。

$$S(z) = S_0 \left\{ \left(1 - \frac{z}{H} \right) \exp \left[A \left(\frac{z}{H} - 1 \right) \right] \right\}^{\lambda} \quad (2)$$

ここに、 S_0 :規格化係数、 H :噴煙柱高度、 A, λ :Suzuki 係数で本研究では標準値 $A=4, \lambda=2$ を与えた。 $C_{L,source}^*$ は時間的にも変動するが、これは後述の(3)式で噴煙高度の時間変化を噴出量に反映した形で与える。降下速度 $w_{s,L}$ は、火砕物粒子に働く重力と空気抵抗力のつり合いで決まるが、大気密度や粘性が高度 z や気温の関数となり、抗力係数が粒径や降下速度で記述される Reynolds 数の関数となることで、こうした計算を通じて求めることになる。粒径・高度をパラメータとした降下速度の計算結果は著者らの論文⁶⁾に示されている。また、噴煙中内の粒径分布の設定は、Todde ら⁸⁾による桜島大正噴火火砕物に対する地層内堆積物の現地調査結果に基づいて、同じ研究グループの Biass ら⁹⁾が設定した値を参考とした。すなわち、粒径 d (mm) を $\phi = -\log d$

で換算した Φ スケールで -5 から 5 の11粒径 (32 mm ~ 0.03125 mm) で階層分けし、標準偏差 $\sigma_\phi = 2$ 、平均値 $\mu = -1$ (2 mm) となる正規分布 (粒径 d について対数正規分布) とした (Biass らの設定値は $\sigma_\phi = 2.25$ 、平均値 $\mu = -1.28$)。2 mm 以上の粒径を軽石、それ以下を火山灰とした。降灰シミュレーションでは、(1)式に対し3次元格子を配置して差分法で解いている。図1のモデル概要図に示すように、計算領域は鹿児島県本土全域を対象とした約150 km 四方で、大正噴火級の大噴火を扱えるように高度20000 m までを計算対象とした。また、図2ではソース項となる噴煙柱内濃度ならびに初期粒径分布の鉛直分布、計算とともに火山灰濃度が鉛直方向に輸送される過程を概念的に示した。図3の計算領域と計算格子の配置図に示すように、水平方向には不等間隔格子を採用した。2015年以降から昭和火口からの噴火回数は減少し、2019年からは0回(気象庁)となっていることから噴火口の位置は南岳山頂火口とした。重要な地域である桜島周辺の計算格子間隔は500 m とし、計算領域端付近では1330 m である。計算精度に影響が出ないように、間隔を徐々に広げながら格子点総数を減らした。計算格子数は169×169×38の約100万点に及ぶため、計算時間の短縮に配慮した。高度方向の計算格子間隔は500 m としたが、高度0 m ~ 1500 m は1つの格子とした。この最下層の格子は物理的には地表面標高を下点とすべきであるが、本解析は(1)式に示した2次元移流拡散方程式を基礎式としており、地形の影響による上昇流・下降流といった3次元的な風速場は考慮できない。噴煙柱周辺の上昇流も当然表現できないので、火口周辺での輸送計算を精度良く行うためには、3次元モデルによる計算が必要となる。本計算では、最下層格子の下端標高を0 m とし、地形は平坦と仮定している。ただし、スタaggerド格子で変数を配置しているので、最下層の格子内の変数は中間点である高さ750 m の量で表されており、(1)式に示す火山灰の水平方向の移流効果、乱れによる拡散効果は、最下層格子でも表現されている。鉛直方向については降下速度 $w_{s,L}$ による火山灰質量の地上への堆

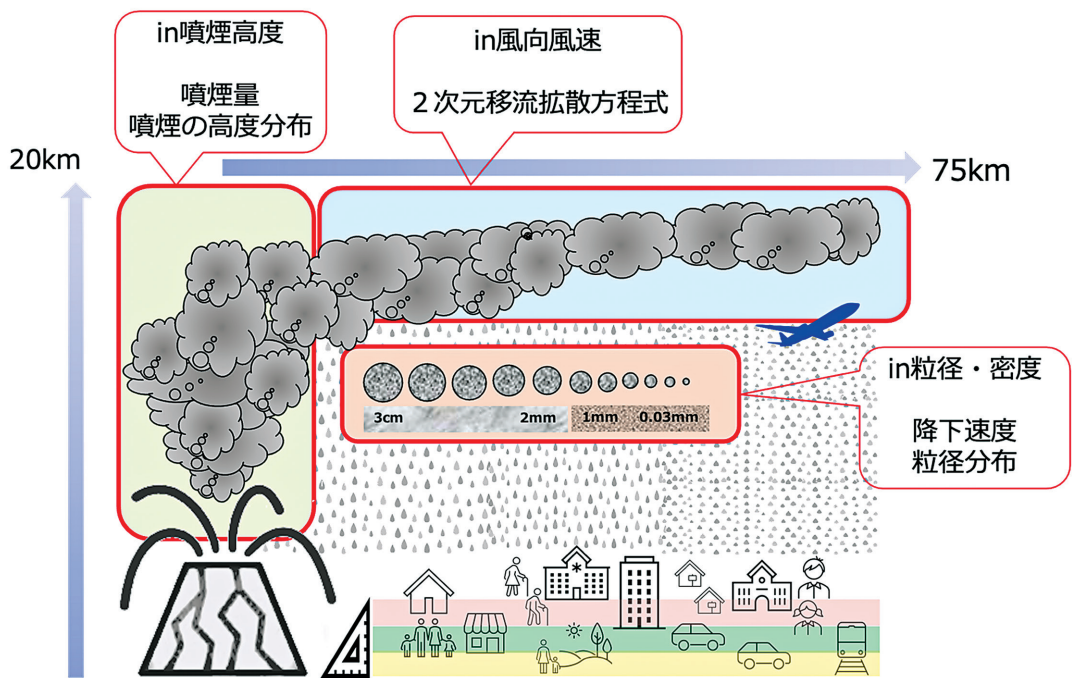


図1 降灰モデルの概要

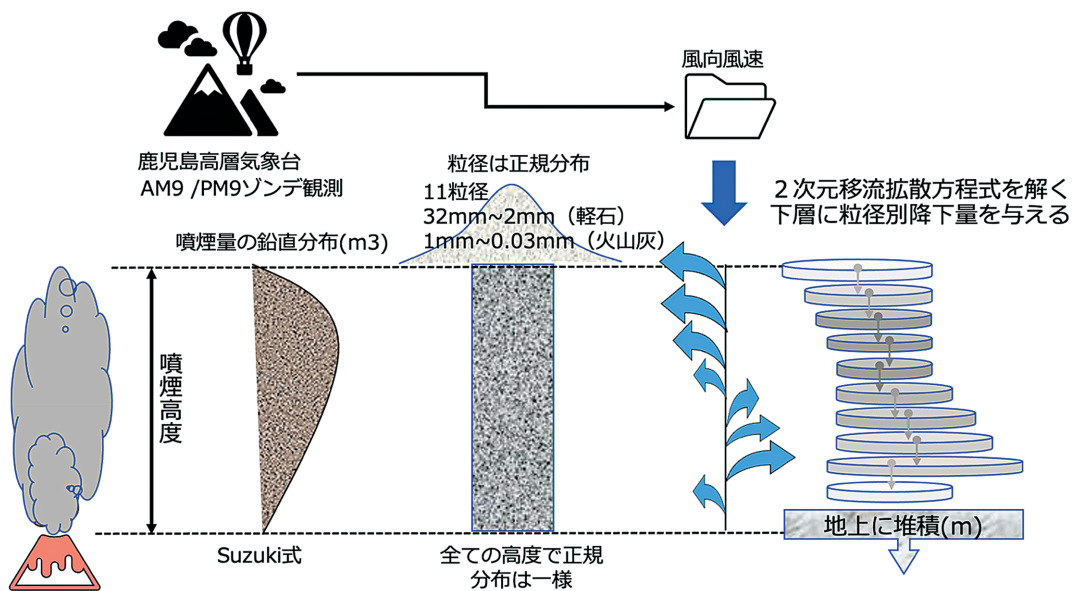


図2 火山灰輸送計算の概念図

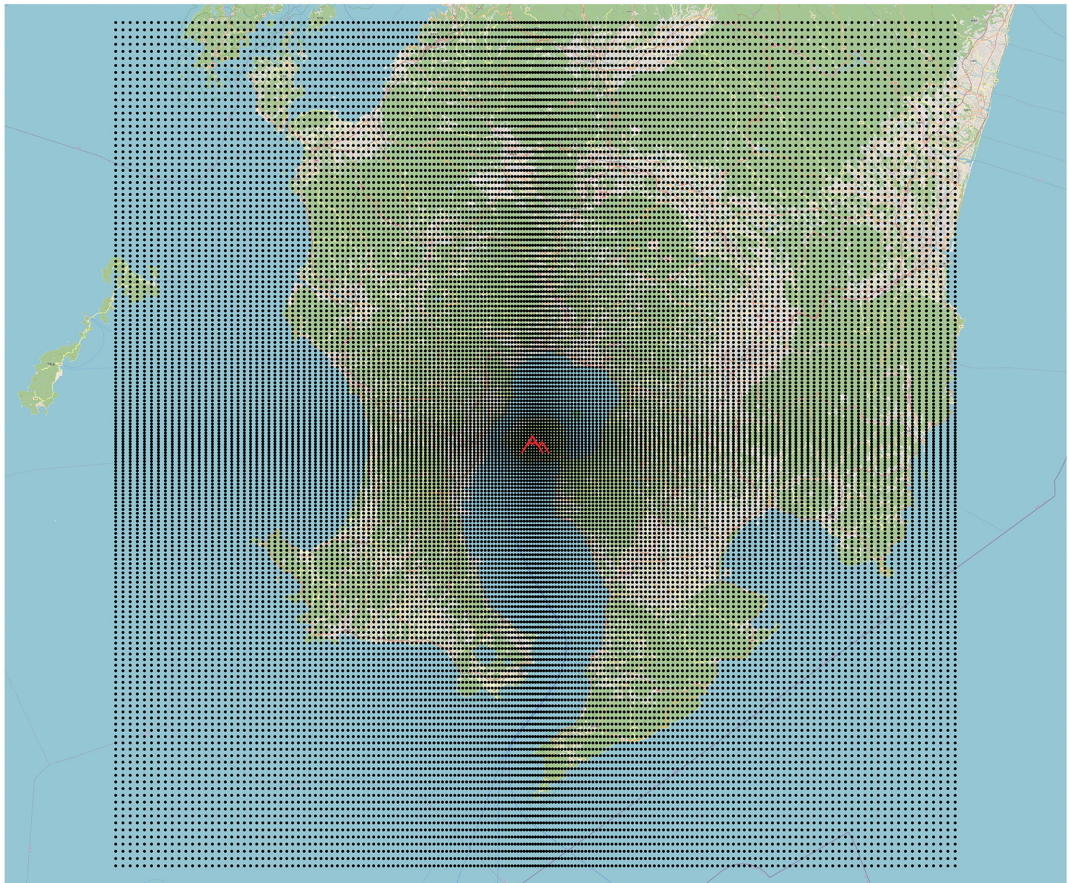


図3 計算領域と計算格子の配置(桜島の南岳山頂火口を中心に約75 km 四方, 背景は OpenStreetMap)

積のみを表現している。こうした格子設定の工夫や2次元の運動に限定した結果として、低価格なワークステーションでも、48時間の現象を52時間程度で計算できるようになった。

3. 降灰ハザードマップの作成シナリオ

3.1 想定する噴火規模

桜島は歴史時代に入ってから記録として、天平宝字噴火(764年)、文明噴火(1471年)、安永噴火(1779年)、大正噴火(1914年)と4回の大規模噴火を繰り返している¹⁰⁾。これら4つの噴火は、マグマ噴出物量に着目した火山爆発指数(VEI)では5となる¹¹⁾。本研究の大規模噴火はこの規模を想定している。記録にはないが、天平宝字噴火から文明噴火の間の700年間に2回の噴火があっ

たことが、地質学的なデータから確認されている¹²⁾。このことから、桜島の大噴火は100~300年に1回程度の頻度で起きていると考えられる。したがって、記録にある4つの大噴火は、今後も社会的時間スケール内で起こりうる規模と考えられ、降灰ハザードマップの外力としての想定にふさわしい。具体的には、特に記録が多数残されており、様々な研究の対象となっている大正噴火を降灰ハザードマップ作成の想定外力とした。

大正噴火は噴煙高度を変化させながら約39時間継続している¹³⁾。大正噴火時の噴煙高度の時間変化は図4の曲線に示すようである。降灰シミュレーションでは、1時間毎の噴煙高度は図4棒グラフのように一定として計算した。噴煙高度を H (m)、単位時間当たりの噴出量を ΔM (kg/s)とす

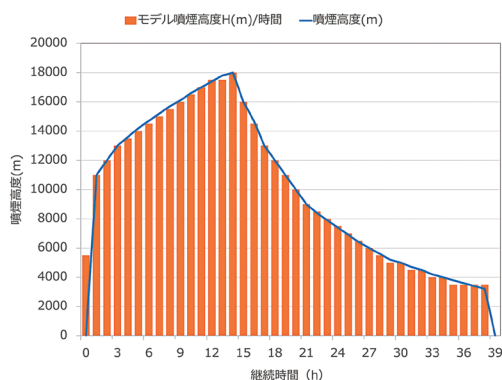


図4 噴煙高度のモデル化¹³⁾

ると両者の関係には以下の経験式が提案されている¹⁴⁾。

$$H(m)=320(\Delta M)^{0.25}(\text{kg/s}) \quad (3)$$

大正噴火における軽石・火山灰の総噴出量は4.5～6億 m^3 であることが報告されている^{15,16)}。本研究では総噴出量を6億 m^3 と設定した。この総量が図4に示した噴煙高度 H の時間経過にわたって噴出されるとし、(3)式で H から総噴出量を時間配分した ΔM を求める。 ΔM を計算格子の体積と粒径階に対応する粒子密度(粒形の大きい軽石で 700 kg/m^3 、粒径が小さくなると 2100 kg/m^3 程度に上昇⁶⁾)で除すると(2)式の噴出火砕物濃度に相当するものが得られる。火砕物濃度の鉛直分布は(2)式右辺で与えられており、粒径分布は高度によらず ϕ についての正規分布を仮定したことから、粒径別・高度別の噴煙柱内火砕物濃度が定まる。よって、時間 t 、鉛直座標 z 、粒径階 L を独立変数とする $C^*_{L,source}$ が火口直上の格子にソース項として与えられ、数値計算が実施されることになる。なお、(2)式の取り扱いについては参考文献(6)に詳細がある。

3.2 風速場

1年を通した高度毎の風速場(風向・風速)には、鹿児島地方気象台の2020年1月～12月のゾンデ観測結果を利用した。観測された高層大気の状態として、気圧(h Pa)、ジオポテンシャル高度(m)、

風速(m/s)、風向(度)が気象庁ホームページに公開されている。ジオポテンシャル高度とは、単位質量あたりの空気がある高度まで持ち上げるのに必要な仕事量(ジオポテンシャル)を重力加速度で割った高さのことである。空気の質量が気圧や気温等によって変わるので、いわゆる標高とは相違するが、降灰予測計算の対象とする高度20 kmまでの範囲ではほぼ同じとして扱って良いことがわかっている¹⁷⁾。降灰シミュレーションでは、高度方向500 m毎に風向・風速データから東西風速成分と南北風速成分を求めて使用した。500 mの層内に複数の観測値があった場合は東西・南北風速成分毎の平均値を、観測値がなかった場合はその前後層の風速成分毎の平均値をそれぞれの風速成分とした。また観測最高高度が20000 m以下の場合には、観測が得られた最高高度の風速成分と同じ値を、そのまま20000 mまで延長する形で与えた。風速場の観測データは鹿児島地方気象台地点以外では入手できないので、平面的には全計算領域にわたって気象台地点の風速場が一様に分布すると仮定して計算を行った。

3.3 降灰ハザードマップの作成方法

図3に示した計算領域を対象に、2020年1月1日から12月31日までの366日間のケースについて、毎日午前9時に大正噴火級の噴火が起きたと想定し、ゾンデ観測に合わせて12時間毎に風速場を更新しながら噴火から48時間後まで計算を継続した。地点ごとに堆積深が366ケースの中で最大となった値を記録し、その値を平面上にプロットすることで最大降灰堆積深を基に降灰ハザードマップを作成した。

3.4 最大降灰堆積深の計算結果

図5は、1年間の最大降灰堆積深に基づいた降灰ハザードマップの結果を示したものである。図より、1年間を通じての卓越風向である西風によって堆積深が桜島の東側に偏重するのではなく、同心円状の結果となっている。1.1 m以上の大きな堆積深については、むしろ桜島の西方の鹿児島市中心部周辺に位置することがわかる。

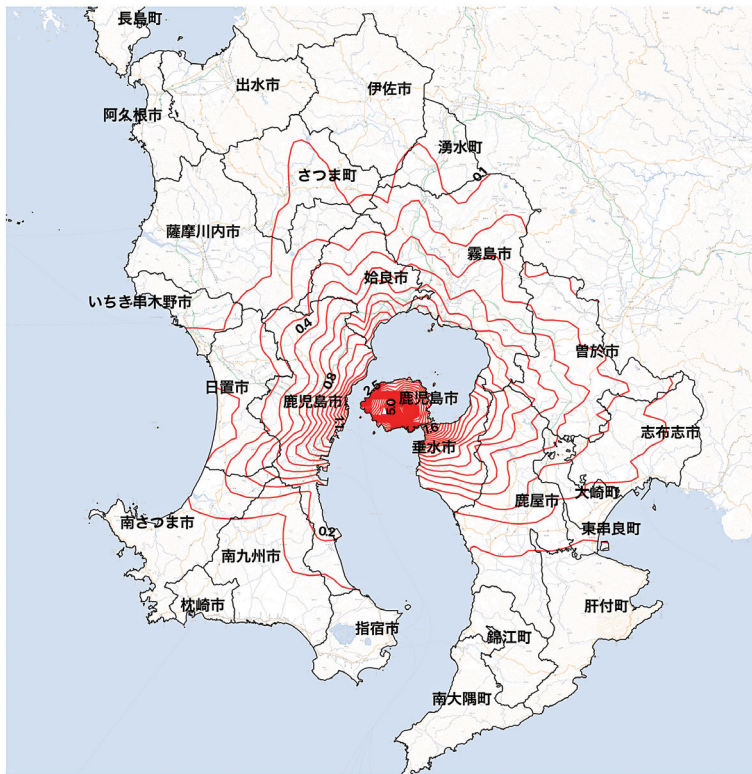


図5 降灰ハザードマップ(単位:m)

降灰堆積深が0.1 m を超えると普通乗用車は走行ができないと言われている¹⁸⁾ので、この範囲は自動車による避難ができない可能性が高い地域と言える。0.3 m を超える範囲では、一時的に河川の治水安全度が低下することが懸念されるため¹⁹⁾、台風や大雨などが重なると複合災害が生じる可能性が高い。0.5 m を超えると古い木造住宅などが倒壊する危険性がある²⁰⁾とされている。降灰の密度は概ね 1 kg/m^3 と考えて良い。湿った雪の密度は約 0.5 kg/m^3 であるから、豪雪地域での建物崩壊等の事例から類推すると、1.0 m を超える範囲では住宅が倒壊する可能性があるほか、最悪の場合は人的被害が生ずる可能性があると考えて良い。

図5に示された堆積厚等値コンターは多葉状となっているが、その1つの要因は前述のように鹿児島地方気象台の上空で観測された風速場が全領域にわたって一様な分布をするとして計算してい

ることが挙げられる。また、1年間の最大堆積深は、桜島から遠方になるほど特定の1日の強い風で生起することが多く、そうした特異日の結果が反映されやすいマップとなる。2020年は9月6日に鹿児島島地方に台風による強い風速場が形成されていた。図5の表示法は大規模火山噴火に対する避難や防災対策に有用な知見を与える可能性を持っているが、上記のような問題点も含まれている。

4. 考察

ここでは年間を通した降灰シミュレーション結果から見てきた災害リスクと、最大降灰堆積深に基づくハザードマップの課題について検討する。

4.1 リスクの可視化

鹿児島県内の主要な4地点の最大降灰堆積深を

表1に示した。また、降灰堆積深の生起確率(日数/年間)を図6に示した。図7と図8は、縦軸に高度をとり、1981~2010年の30年間の風向(北が0°)と風速の観測値の平均値を平年値としてそれぞれ表示したものである。図中には、2020年度の月別平均値もあわせてプロットされている。鹿児島県の上空では、偏西風の影響で概ね西風が吹いているが、季節変動があり夏季に弱まる。8月頃に最も風速が小さくなる傾向があり、この時期に東風(鹿児島市方面)が吹きやすい。表1に示したように鹿児島中央駅付近の降灰堆積深の9位までが8月に集中しているのはこのためと思われる。また、弱まった上空の偏西風のため降灰が

拡散されにくく、桜島近郊ほど降灰堆積深が大きくなりやすいと考えられる。なお、2020年の風向風速の状況は、偏西風の影響が弱まる8月は風速が小さい傾向にあり、このため風向が平年値に比較してばらつきがあるように思われるが、年間を通しては平年値と大きな差はなく、2020年が特殊な気象場ではないと考える。図9に鹿児島中央駅付近の最大降灰堆積深の時間変化を、軽石成分と火山灰成分に分けて表示した。噴火から6時間後には堆積深10 cmに達し、12時間後には堆積深50 cmに達する。堆積深が10 cmでは自動車などでの移動ができない。また堆積深が50 cmでは木造住宅の倒壊が懸念される。このように大規模噴

表1 主要な4地点の最大降灰堆積深

場所	南岳火口からの距離(km)	噴火発生日	最大堆積深(cm)	上位10位の発生日()内は発生数
鹿児島中央駅付近	11.2km	8月20日	105	8月(9),6月
鹿児島空港付近	25.4km	8月9日	40	7月,8月(3),9月(6)
垂水市役所付近	10.1km	5月7日	53	4月(2),5月(3),6月,9月,10月(3)
指宿市役所	36.0km	6月22日	7	4月6月(3),8月(3),10月(3)



火時は避難のための猶予時間は短く、降灰堆積の時間進行が早いと言える。風速が小さいと降灰は拡散されにくいいため、桜島に近いほど降灰量が多くなる傾向が考えられる。降下速度が大きい軽石成分が堆積の約80%を占めることも、弱い風速の影響が推察される。桜島は2020年も432回噴火しており、地域住民にとっては、降灰は日常のもの

となっている。また平均的には西風により大隅半島側に降灰することが多く、住民は降灰の影響を風向の頻度から想定する傾向がある。鹿児島市が降灰の影響を受ける風向を北北東～南南東とすると、半旬ごとの最大風速の風向が該当する頻度(2020年)は約20%となるが、図6では桜島の東側に位置する鹿児島中央駅で、風下側となる頻度の大きい垂水市役所より大きな降灰堆積深の生じる確率が高くなっており、風向の頻度とは関わらないことがわかる。一方で偏西風の影響を受けやすい垂水市役所付近では、上空の風速が大きいので降灰が拡散される。その影響で最大堆積深は鹿児島中央駅付近より小さくなると推測できる。しかし、後述の図11で示されるように、偏西風の影響を受ける期間は長いので、堆積深が10 cm程度となる日数は、鹿児島市中央駅付近と比較すると長くなる結果が得られている。

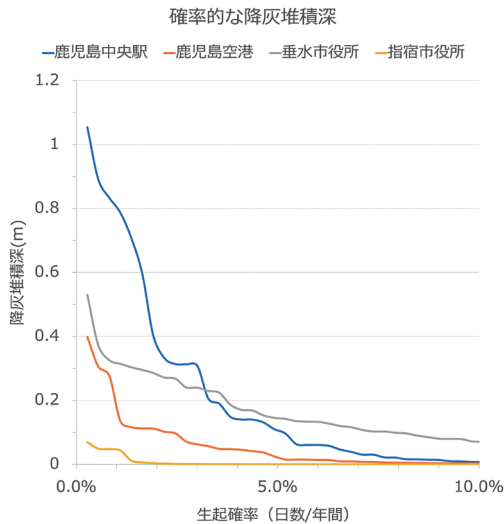


図6 降灰堆積深の生起確率(日数/年間)

4.2 降灰ハザードマップの課題

(1) 風速場

降灰ハザードマップを作成する場合、降灰計算に利用する風向・風速として、事前に統計処理や平均化などを行って利用することがある²¹⁾。鹿児

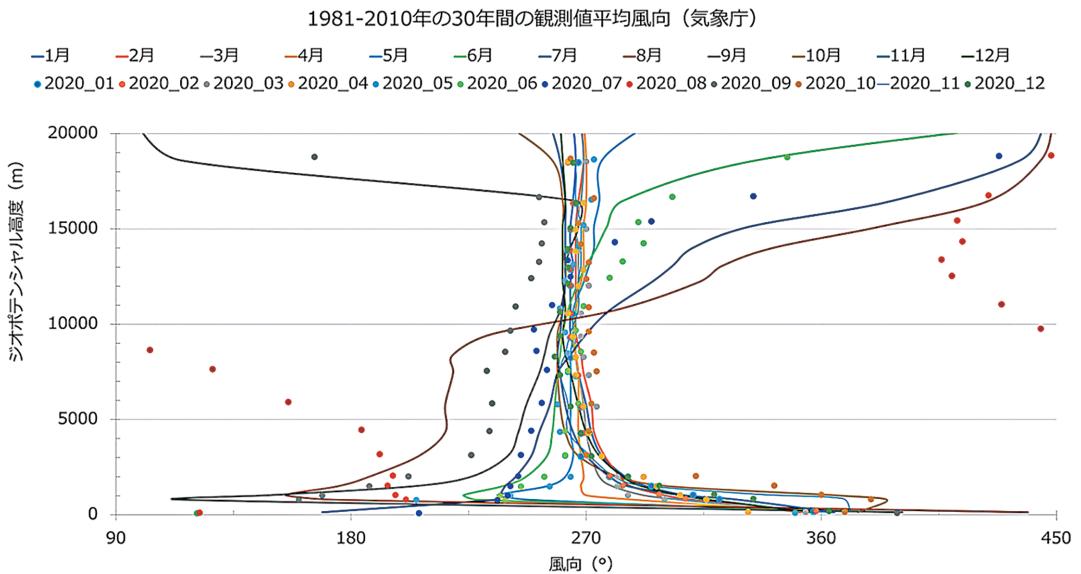


図7 月別の風向の高度分布

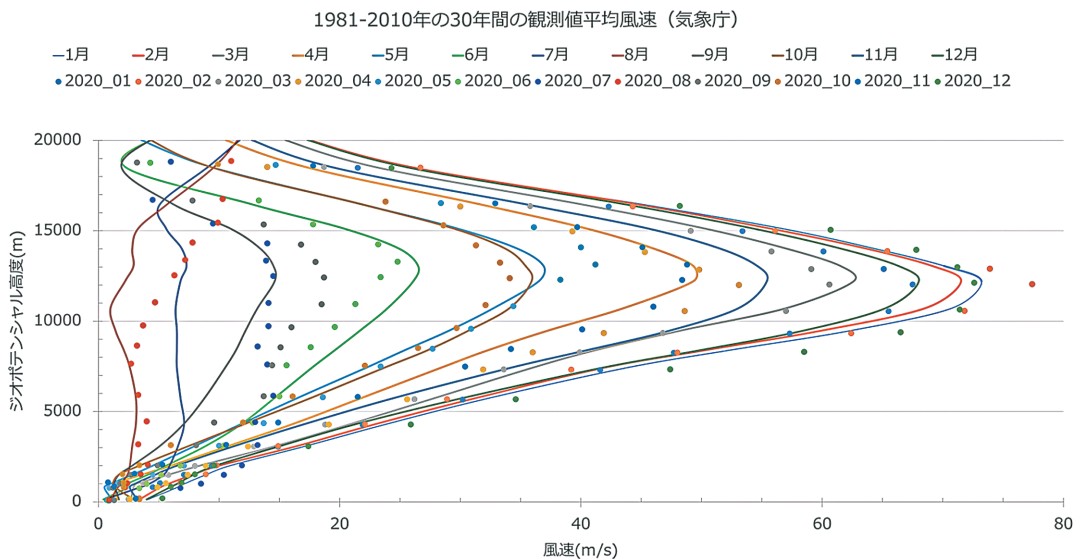


図8 月別の風速の高度分布

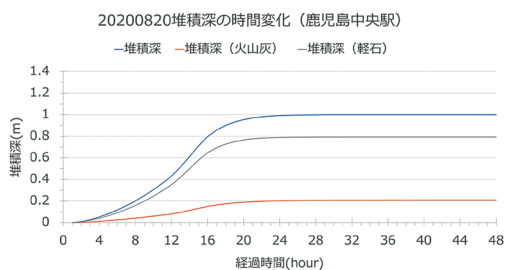


図9 堆積深の時間変化(地点:鹿児島中央駅付近)

鳥島の場合も、風向の平年値(図7)はほぼ西風が卓越しているため、何らかの統計処理を事前に行うと、東風の影響を受ける鹿児島市方面への影響を過小評価してしまう可能性がある。

図10に鹿児島地方気象台上空で観測された季節毎の高度別風向・風速を示した。高度1500mは降灰計算の最下層の高度で、桜島(標高1117m)直上付近である。高度5000mは2020年に発生した鹿児島空港の欠航事例の噴煙高度付近の高さ、高度12000mは最も風速が大きくなる高度、そして高度18000mは大正噴火級の最高噴煙高度を代表する高さである。動径方向は風速(m/s)を表している。2月は偏西風の影響が最も強く、上空での風速も大きい。5月から偏西風の影響が弱

まり始め、8月には高度に関わらず風速が最も弱まると同時に、風向のばらつきが大きくなる。11月になると再び偏西風の影響が大きくなる。こうした傾向は平年値からもわかるが、毎日の風向・風速にはかなりのばらつきがあることもわかる。今回の降灰シミュレーション結果から、鹿児島市中央駅付近の9米までの降灰堆積深が8月に集中していることがわかる。これらの上位の降灰堆積深は、卓越した風速場の条件下で起きているのではないことから、降灰計算に使用する風向・風速は事前に統計処理などを行わない方が良いと考えられる。

(2) 最大降灰堆積深

洪水ハザードマップでは、想定される最大規模の降雨を外力とし、現況河道特性に基づく氾濫解析によって浸水の程度や範囲を算出する。最終的な浸水深や浸水の範囲は、外力と地盤高が支配的な要素となっている。地盤高はその経年変化が小さくほぼ変化がないと考えて良い。そのため、土地の低い場所では、降雨によって頻繁に浸水することになると同時に、豪雨時には大きな浸水深となる。また、想定する外力が変化しなければ、浸水深や浸水範囲は変わらない。一方、降灰ハザー

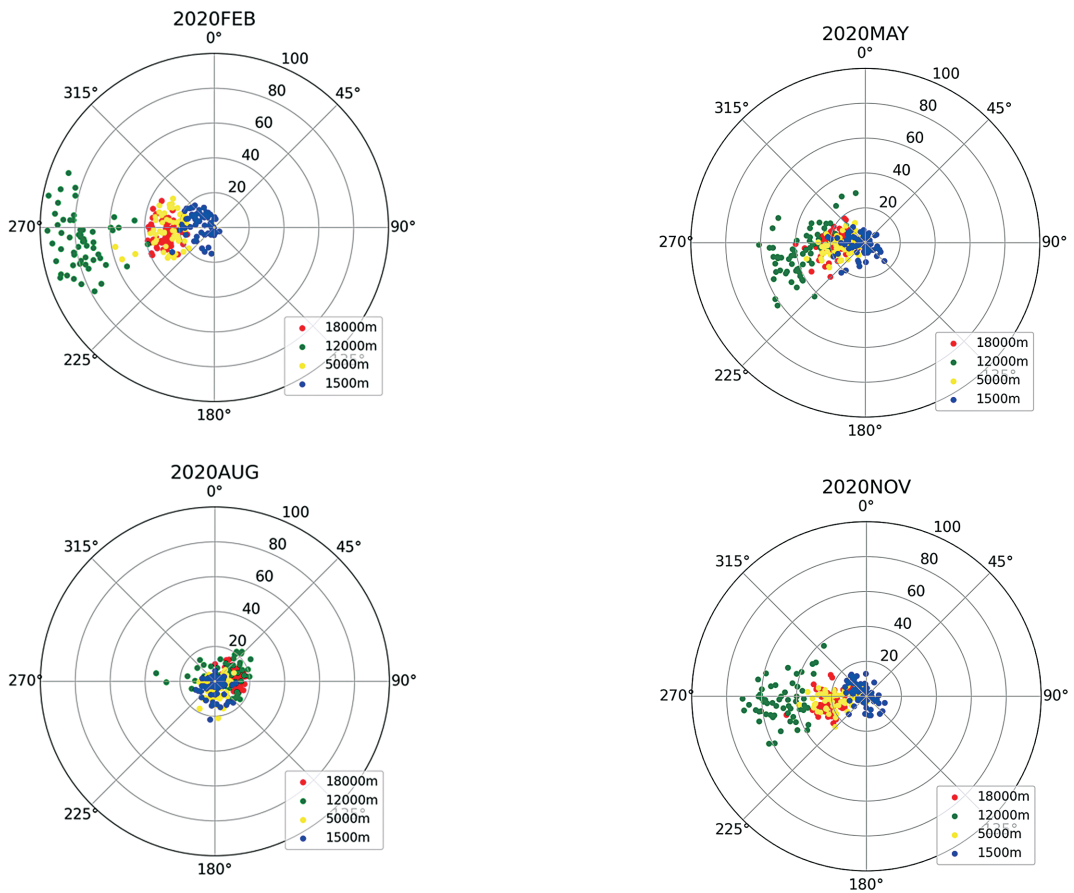


図10 季節毎の高度別風向・風速(北は0°)

ドマップでは、外力として大正噴火級の総噴煙量を想定し、年間を通した風速場による降灰計算から最大堆積深を求めた。最終的な降灰の範囲と堆積深は、外力と風向・風速に依存している。洪水を対象とする場合との相違は、外力が同じであっても風向・風速によって最大降灰堆積深が変化してしまうことにある。最大堆積深を表示した図5は計算対象範囲の個々の地点において噴火が1年間の最悪の気象条件下で起こる場合の堆積深、すなわち、最大のリスクを表示した意義を有しているが、併せて上述したような問題性もあることがわかる。ハザードマップの利用者層や利用目的によっては別の表示法によるハザードマップが有用であることが考えられ、以下に考察する。

地点ごとに堆積深が一定の深さ以上となる日数

で1年間の解析結果を整理すると、確率的な性格を持つ表示法となる。図11は10 cm以上となる日数分布で表示したハザードマップで、降灰の頻度に関係し、洪水の場合の「土地の低い場所」のような情報を提供している。

また、前述したように1年間の最大降灰堆積深で整理すると、当該年の解析期間中に偶然来襲した台風等による強風によって発生した特異な堆積深を採用する恐れがある。最大値ではなく母集団の中の上位特定割合の値を抽出すると、年ごとの特異性の少ない結果が抽出できると考えられる。図12は、上位1%すなわち366日の中の第4位の堆積深に基づく降灰ハザードマップを示したものである。上位1%未満(3日間)の降灰堆積深を除外したことで、特異な風向・風速の影響が取り

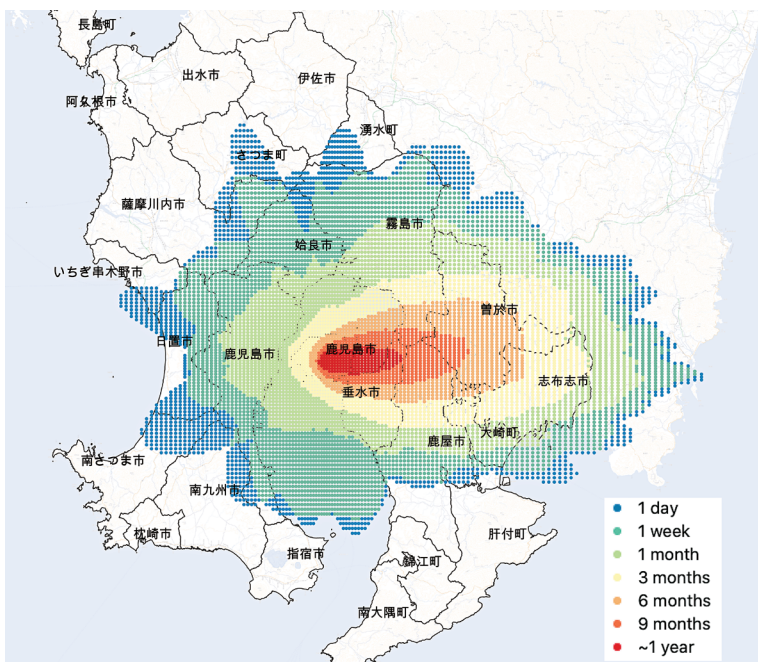


図11 堆積深が10 cm 以上となる日数分布

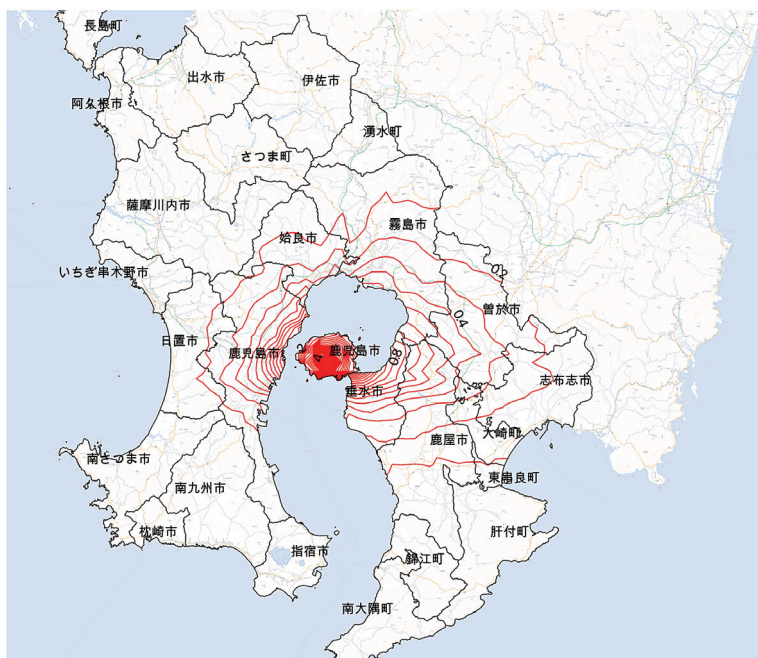


図12 上位1%の堆積深に基づく降灰ハザードマップ(単位:m)

除かれたハザードマップになっている。図11と図12を比較すると、両者の平面分布の形状はよく似た結果を示しており、図5の同心円的な堆積深分布より降灰の程度と発生頻度をうまく表しているようにみえる。

大正噴火級の桜島大規模噴火が発生すれば、その影響は道路・電気・上下水道・情報通信・医療など広範な分野に大きな影響を与える。本研究で提起した最大降灰堆積深に基づくハザードマップは、それぞれの地点で最悪の風速場の条件で想定される降灰堆積深である。国や県、自衛隊、警察、消防、病院などの防災活動機関が、発災時の救援救命活動や発災後の道路啓開や機能回復を想定して、車両等の機材・施設・人的資源などが最大どの程度必要か、それらの配置や連携はどうあるべきか等の防災計画を立案する上で有用と思われる。ただし、1年間の最大堆積深を対象として整理すると、台風など当該年に発生した特異な風速場の結果も含まれると考えられ、本研究では上位1%の降灰堆積深に基づく結果も併せて示した。一方、堆積深が一定の深さ以上となる日数で表示した場合には、風向・風速の頻度の情報が含まれることになり、年間の卓越風向の下で大隅半島側へ災害対策の重点が移る結果となる。一般にハザードマップは、平常時の地域住民の防災啓発のために利用される。地域住民には日常的な危機感覚に近く、その情報は災害時に有用である。前述した防災活動に必要な機材や施設、人的資源が有限であることを踏まえると、国・県などの防災担当者にとっても、頻度情報が含まれたハザードマップは、地域への資源の最適な配置を考えるうえで重要となる。どのような考え方で大規模火山防災に備えようとするのか、国レベルから地域・住民に至るどのスケールを対象とするのかによって、最適となるハザードマップは異なってくると考えられる。

5. おわりに

1) 大正噴火級の噴火を想定し、1年間を通じた気象場を考慮した降灰シミュレーションを行い、最大降灰堆積深に基づいた桜島の降灰ハザード

マップを提示した。これまでの桜島を対象とした降灰ハザードマップは年間の平均的な卓越風である西風を対象としているのに対し、本研究結果は、1日ごとに変化する風速場を1年間にわたって考慮した数値解析結果に基づいてハザードマップを提示しており、研究の新規性を有していると考えられる。

2) 鹿児島市中央駅付近の上位の降灰堆積深が、卓越的な風速場ではない8月に集中していることから、降灰計算に使用する風向・風速を事前に統計処理などを行なうと、最大降灰堆積深などを適切に把握できない場合があることがわかった。1年間にわたる1日単位の降灰計算に基づき最大堆積深を解析したことで、平均的な風速場では把握できない特徴的な結果を抽出することができた。

3) 最大堆積深が発生する日単位風向は、年間を通じて頻度が高い風向とは一致しないことが判明したが、一方で、風向の頻度に関連付けて降灰量の頻度で評価することも有用な表示法であるため、堆積深が一定の深さ以上となる日数で表示した第2のハザードマップを提案した。また、最大降灰堆積深で整理すると、当該年の特異な気象条件で発生した堆積深を採用する恐れがあり、母集団の中の上位1%の降灰堆積深に基づく新たなハザードマップを示した。これらのハザードマップ間での適正度は、その利用者や目的に応じて変化すると考えられる。今後も国・自治体や様々な機関との協議を行い、大規模火山噴火時の降灰ハザードマップの実効性を高める検討を続ける必要がある。

参考文献

- 1) 富士山火山防災協議会：富士山ハザードマップ検討委員会報告書，内閣府，pp.79，2004.
- 2) 富士山火山防災協議会：富士山ハザードマップ検討委員会報告書，内閣府，pp.61-74，2004.
- 3) 井口正人・中道治久：桜島の大規模噴火を考える，自然災害科学，Vol.38，No.3，pp.279，2019.
- 4) 桜島火山防災検討委員会，火山防災啓発検討部会：http://vivaweb2.bosai.go.jp/v-hazard/L_read/90sakurajima/90sakura_lm02-.pdf，2021年6

- 月30日.
- 5) Pfeiffer T., A. Costa and G. Macedonio: A model for the numerical simulation of tephra fall deposits, *J. Volcanology and Geothermal Research*, 140, pp.273-294, 2005.
 - 6) 浅野敏之・長山昭夫・加古真一郎：火山噴火災害時の港湾BCP立案の基礎となる水域内降下火砕物の流動解析, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 76巻, 第2号, pp. I_1321-I_1326, 2020.
 - 7) Suzuki, T.: A Theoretical Model for Dispersion of Tephra, *Volcanism; Physics and Tectonics*, edited by D. Shimozuru and I. Yokoyama, pp.95-113, 1983.
 - 8) Todde et al.: The 1914 Taisho eruption of Sakurajima volcano: Stratigraphy and dynamics of the largest explosive event in Japan during the twenties century, *Bull. Volcanol.*, pp.79-72, DOI 10.1007/s00445-017-1154-4, 2017.
 - 9) Biass et al.: Potential impacts of tephra fallout from a large-scale explosive eruption at Sakurajima volcano, Japan, *Bull. Volcanol.*, pp.79-73, DOI 10.1007/s00445-017-1153-5, 2017.
 - 10) 中央防災会議(災害教訓の継承に関する専門調査会)：1914桜島噴火報告書, 第1章, 第2節, pp.14-21, 2011, http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1914_sakurajima_funka/pdf/04_chap01.pdf, 2021年6月30日
 - 11) 石原和弘・富山鉄朗・田中良和・平林順一：桜島火山の溶岩流(I) - 有史時代の溶岩流の容積 -, *京都大学防災研究所年報*, 第24号 B-1, pp.1-10, 1981.
 - 12) 小林哲夫・佐々木寿：桜島火山, *地質学雑誌*, 第120巻, 補遺, pp.63-78, 2014.
 - 13) 近藤一飛・多々納裕一・井口正人・田中 博, 火山灰輸送シミュレーションを用いた桜島における大規模火山噴火時の降灰リスク分析, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, A26, 2019.
 - 14) 山科健一郎：桜島火山1914年噴火の噴煙高度一目撃資料の検討, *火山*第44巻, 第2号, pp 71-82, 1999.
 - 15) 中央防災会議(災害教訓の継承に関する専門調査会)：1914桜島噴火報告書, 第2章, 第1節, pp. 33-36, 2011, http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1914_sakurajima_funka/pdf/05_chap02.pdf, 2021年6月30日
 - 16) 浅野敏之・高橋 忍・甲斐信治：大規模火山噴火災害時における港湾機能維持に必要な降下軽石群の揚収作業量の分析, *自然災害科学*, Vol. 39, 特別号, pp.45-56, 2020.
 - 17) 小倉義光：総観気象学入門, 第3章総観気象の基礎方程式, 東京大学出版会, pp.59-65, 289p, 2015.
 - 18) 中央防災会議防災対策実行会議：大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ(第4回), 資料1, 別添資料2「大規模噴火時の広域降灰対策について - 首都圏における降灰の影響と対策 - 富士山噴火をモデルケースに - (報告)【別添資料】降灰による影響の閾値の考え方, p.6, 2020, http://www.bousai.go.jp/kazan/kouikikouhaiworking/pdf/4kai_shiryoy1_betten2.pdf, 2021年6月30日
 - 19) 鹿児島市危機管理課：桜島火山ハザードマップ, 2018, <https://www.city.kagoshima.lg.jp/kikikanri/kurashi/bosai/bosai/map/documents/nihongo.pdf>, 2021年6月30日
 - 20) 気象庁降灰予報の高度化に向けた検討会(第1回検討会), 参考資料2：降灰の影響及び対策, p.7, 2012, <https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kouhai/kentokai/1st/sankou2.pdf>, 2021年6月30日
 - 21) 富士山火山防災協議会：富士山ハザードマップ検討委員会報告書, 4.ドリルマップの作成方法, 4.5降灰ドリルマップ作成方法, pp.65-74, 2004, <http://www.bousai.go.jp/kazan/fujisan-kyougikai/report/pdf/houkokusyoy4-5.pdf>, 2021年6月30日
- (投稿受理：令和3年4月2日
訂正稿受理：令和3年7月2日)

要 旨

本研究は、大正噴火級の噴火を想定し1年間を通した風速場を考慮した降灰シミュレーションを行い、桜島の降灰ハザードマップを提示したものである。風速場を平均化して考えると偏西風によって桜島の東側に堆積する結果となるが、本研究では降灰計算に使用する風向・風速を事前に統計処理せず、1日単位で1年間の降灰堆積深の分布を求めた結果、年間の卓越的な風向場でない8月に集中して鹿児島市中央駅付近に上位の降灰堆積深が発生することがわかった。年間の最大堆積深に基づくハザードマップは、既存のものと異なる特徴を持ち、避難対策を考えるうえで有用な結果を得た。また、堆積深が一定値を超える頻度や上位1%の堆積深に基づくハザードマップを提示し、利用者や利用目的に応じて最適な結果の整理方法について考察した。