桜島大噴火時の複合災害の発生リスク推定に向けた降下火砕物の堆積分布に関する基礎的研究

A STUDY ON THE DISTRIBUTION OF PYROCLASTIC FALL DEPOSITS FOR RISK ESTIMATION OF COMPLEX DISASTER DURING A LARGE-SCALE ERUPTION OF MT. SAKURAJIMA

五反田 尚大[1]・酒匂　一成[2]・田上　聖人[3]
Naohiro GOTANDA, Kazunari SAKO and Masato TAUE

[1]鹿児島大学大学院理工学研究科（〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40）
E-mail: k6236986kadai.jp
[2]鹿児島大学学術研究院理工学域工学系（〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40）
E-mail: sako@oce.kagoshima-u.ac.jp
[3]鹿児島大学学術研究院理工学域工学系（〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40）
E-mail: Taue@oce.kagoshima-u.ac.jp

***Key Words**: pyroclastic fall deposits, pumice, volcanic ash, hazard map, disaster risk*

1. はじめに

1914 年の桜島大正噴火では，総噴出量約 6 億 m^3 の降下火砕物（軽石，火山灰）が広域に堆積し，その後の降雨，地震に伴って，様々な複合災害が発生した[1)]．降下火砕物が雨水の地中への浸透を妨げたことで，少量の雨でも土石流が発生する状況が長期にわたって継続した．また，大規模噴火の後には，マグニチュード 7.1，最大で震度 6 強（当時の表記では「烈震」）が発生したことで，家屋倒壊やがけ崩れ等が発生した．これらの複合災害は，犠牲者を含む人的被害や交通途絶，家屋・構造物損傷等によって，市民の生活および地域社会に甚大な影響を及ぼした．

このような大規模火山災害から 110 年以上が経過したが，桜島では最短 135 年間隔でプリニー式噴火に分類される大規模噴火が発生[1)]しており，今後 20 年程度で再び大噴火が発生する可能性が考えられる．そのため，近年，桜島大噴火時の火山災害対策の重要性，必要性が高まってきている．鹿児島市では，大規模噴火時の大量の降下火砕物に対する対処を地域防災計画に組み込む等，積極的に火山防災を推進している[2)]．また，大規模噴火の防災計画を行うにあたり，大正噴火級噴火が生じた場合の火山ハザードマップの作成が行われてきた．例えば，中谷ら[3)]は 2020 年の 1 年分の風速場を使用して，鹿児島県本土全域以上の範囲を対象とした降下火砕物シミュレーションを実施し，降灰ハザードマップの作成を行ってきた．しかし，被災地予測や防災計画等を今後検討するには，さらに複数年分の解析結果の蓄積が必要と考えられる．

そこで，本研究では，桜島大正噴火級噴火が発生した場合の複合災害の発生リスクの推定することを目的とし，2020～2024 年の 5 年分の風速場を使用した数値シミュレーションを実施することで，近年の風速場による降下火砕物の分布について検討を行った．さらに，シミュレーション結果を基に火山ハザードマップを作成することで，複合災害の発生リスクが高いと考えられる地域について検討を行った．

2. 降下火砕物シミュレーションについて

本研究では，中谷ら[3)]が構築した降下火砕物シミ

ュレーションプログラムを使用して解析を行った．これまでの多くのシミュレーショは火山灰のみを対象としているが，本シミュレーションは軽石と火山灰の両方を対象としており，密度の違いを考慮して降下速度を計算している。以下にシミュレーションモデルと解析条件の概要を示す．

(1) シミュレーションモデル

火口から噴出された火砕物は噴煙柱を形成し，風によって移流，拡散しながら地表に堆積する．本シミュレーションでは，この過程を 11 粒径階の火砕物に分け，各粒径階の火砕物濃度に対する 2 次元移流拡散方程式を差分法で計算している．基礎方程式を次式に示す．

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

ここに，C_L：粒径階 L の火砕物濃度，W_x，W_y：風速，$w_{s,L}$：降下速度，K_x，K_y：拡散係数．

式(1)のソース項にあたる$C^*_{L,source}$は，式(2)に示す Suzuki 式[4]と式(3)に示す粒径分布から求めた各粒径階の割合の積によって，高度ごと，粒径階ごとの火砕物濃度が与えられる．

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

ここに，S_0：規格化係数，A，λ：Suzuki 係数，H：噴煙高度．

Suzuki 式は，火口直上の噴煙内における火砕物濃度の高度分布である．本研究では，中谷らの設定値を参考に，Suzuki 係数 $A=4$，$\lambda=2$ とした．規格化係数 S_0 は単位時間あたりに噴出される火砕物の体積から逆算して求められるが，詳細は浅野ら[5]を参照されたい．

噴煙柱内の火砕物の粒径分布は，高度によらず正規分布に従うと仮定した．

$$f(\phi)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\phi}\exp\left[-\frac{(\phi-\mu)^2}{2\sigma_\phi^2}\right] \quad (3)$$

ここに，ϕ：ファイスケール（粒径 d を$\phi=-\log_2 d$ で変換），μ：平均値，σ_ϕ：標準偏差．

各パラメータの設定は中谷らを参考に，$\mu=-1$ ϕ (2 mm)，$\sigma_\phi=2$ とした．本研究では，$-5 \leqq \phi \leqq 5$ の 11 粒径階に分類して各粒径階の火砕物の密度は，式(4)によって算出しており，粒径が大きい粒子が軽石状となり，密度が低くなることを考慮している[5]。

$$\rho_p=700 \quad : \phi < -1$$
$$\rho_p=700+(\phi+1)\times(1400/6) \quad : -1 < \phi \quad (4)$$

降下速度 $w_{L,s}$ は，次式に示す経験式を用いた．

$$w_{L,s}=\sqrt{\frac{4\rho_p g}{3C_D\rho_a}}\exp(0.024z) \quad (5)$$

ここに，ρ_a：大気密度，C_D：抗力係数．

本研究では，標準大気を想定している．抗力係数は，式(6)のレイノルズ数 Re の値により，$Re<1.0$ のときストークスの法則に従い $C_D=24/Re$，$1.0<Re<100$ のとき Wilson-Huang の遷移式[6),7)]，$Re>100$ のとき $C_D=1$ とした．

$$Re=\frac{\rho_a d w_s}{\eta_a} \quad (6)$$

ここに，η_a：空気の粘性係数．

拡散係数は，$K_x=K_y=3000$ m^2/s とした．

(2) 解析条件

本研究の対象領域は，水平方向は桜島南岳火口を中心とした約 150 km 四方，鉛直方向は高度 0～20000 m とした．なお，地形は考慮せず，高度 0 m に水平面が広がった地形を仮定した．格子点の配置は，水平方向の間隔は桜島から離れるにつれ大きくなるように（桜島火口で 500 m，領域境界で 1330 m），また，鉛直方向の間隔は高度 1500 m 以上は 500 m，それ以下は 1500 m となるよう設定した．

初期条件は，全領域にわたって火砕物濃度 $C_L=0$ とした．境界条件は，ゼロ勾配条件での流出とした．

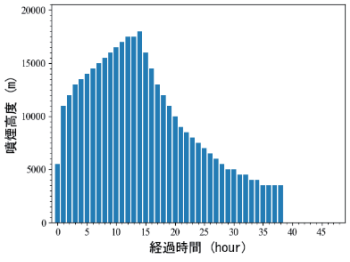


図-1　噴煙高度の経時変化[8]

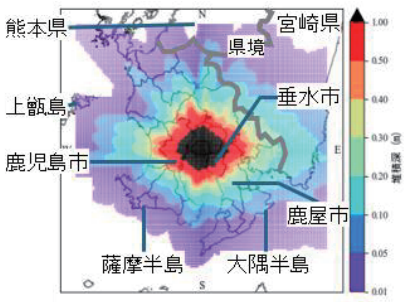


図-2　対象期間中の各格子点における最大の堆積深

噴火の規模は桜島大正噴火級を想定し，火砕物の総噴出量を 6 億 m^3 とした．噴火が，ある日の午前 9 時に桜島南岳火口で発生し，経過時間に伴って噴煙高度が**図-1** のように変化した場合[8]を想定した．これを2020 年1 月1 日噴火のケースから2024年12 月31 日噴火のケースまで，1798 ケースの計算を実施した．

風速場は，気象庁の風の観測データ[9]より設定した．気象庁 HP より，鹿児島地方気象台で午前 9 時，午後 9 時に実施されているラジオゾンデ観測による高層の風データを 5 年分(2020～2024 年)収集した．

各データは，気圧(hPa)，ジオポテンシャル高度(m) ，風速(m/s)，風向(°)，識別符が記録されているが，高度 0 m から 500 m 間隔の風速，風向の平均値を算出することで，風の鉛直分布を求めた．本研究の対象領域内の観測地点は，鹿児島地方気象台のみであったため，算出した風の鉛直分布を対象領域全域に適用した．

(3) 解析結果

図-2 に，全ケースの噴火発生から 48 時間後の解析結果を重ね合わせ，各格子点における最大値を抽出した結果を，**図-3** に，各月ごとに同様の抽出を行った結果を示す．**図-2** より，2020～2024 年の間に大正噴火級の噴火が桜島で発生していた場合，鹿児島県本土全域および熊本県南部，宮崎県南部の一部地域において降下火砕物の可能性があったことが見て取れる．**図-3** の全ての図から，桜島より東側における降下火砕物の堆積が見られるが，これは，恒常風である偏西風の影響であると考えられる．**図-3**(f)～(i)に示す 6～10 月の解析結果では，薩摩半島方面においても広範囲で降下火砕物が堆積し，場合によっては県内の人口密集地である鹿児島市で 1 m 以上の堆積が生じた可能性が見られる．これは，夏場に南東から吹く季節風が影響したと考えられる．夏場の偏西風は比較的弱い風であるため，桜島から比較的近傍の地域までしか火砕物が及ばないケースが多かったと考えられる．しかし，夏場であっても，台風の接近等による特異な風速場によって，火砕物が遠方まで輸送されたケースもみられる．例えば，**図-3**(h)では，鹿児島県本土の西側に位置する上甑島においても降下火砕物の堆積が見られるが，これは，2024 年台風 10 号が接近，通過した日の解析結果が反映されている．1 ケースだけの事象も反映しているため，**図-2** および**図-3**(f)～(i)の分布が大きく表現されている．

3. 複合災害の発生リスクの検討

前章の解析結果は，シミュレーション結果を厳密に示しているものの，方角や距離で降下火砕物の分布がばらついているため，地域ごとの堆積状況の判読が難しい．鹿児島市[2]の防災計画では，桜島を中心とした方角と桜島からの距離で区切り，災害対応を検討している．本研究では，同様の手法で火山ハザードマップを作成し，鹿児島県本土全域における

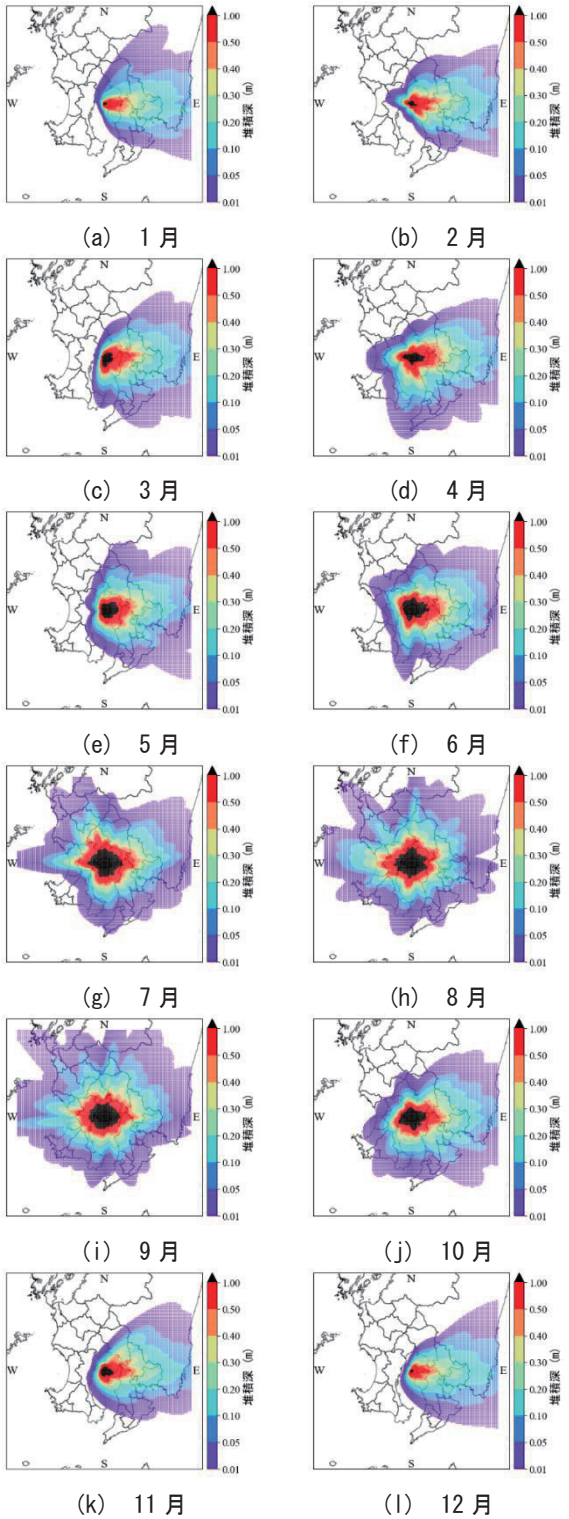


図-3 対象期間中の各月における最大の堆積深

複合災害の発生リスクについて検討を行う．

(1) 火山ハザードマップ作成の概要

表-1に本研究で対象とする災害および各災害発生の閾値を示す．災害桜島大規模噴火後には，降下火砕物に起因する様々な災害，被害が予測されるが，本研究では陸上における事象に着目した．災害発生の閾値は，桜島大正噴火後の事例[1)]や内閣府が実施している富士山噴火時の降灰対策の検討[10)]で使用されている値等を参考に設定した．また，**図-4**，5 に示すように，本研究で作成したハザードマップは，鹿児島市[2)]を参考として，桜島南岳火口を中心として半径を5 km 間隔で拡大した複数の円と円を等分割する直線で解析領域を区切った．

(2) 最大堆積深に基づくハザードマップ

図-4 に，2020～2024 年の降下火砕物シミュレーション結果から扇形または環状扇形（以降，扇形と表記）のエリア内の堆積深の最大値を抽出して作成したハザードマップを示す．本図より，鹿児島県本土全域，熊本県南部，宮崎県南部を含むのほとんどのエリアで 0.03 m 以上，一部エリアで 0.01～0.03 m の最大堆積深となることが読み取れる．堆積深が 0.01 m 以上となると車の走行に伴って降下火砕物が巻き上げられる等して視界不良となり，徐行での走行を強いられ可能性がある．また，堆積深が 0.03 m 以上となると降雨時に二輪駆動車の通行が不能となるが，設定したほとんどのエリアで上記のような交通災害の発生リスクがあると考えられる．また，本研究の対象領域外ではあるが，熊本県，宮崎県の中部あたりまで，堆積深 0.01～0.03 m 程度で発生する比較的軽度な交通災害のリスクがあるのではないかと推測される．

また，**図-4** より，桜島南岳火口から半径 40～50 km 圏内および火口から東方向 75 km 先までと西方向先 60km 先までのエリアにおいて，降下火砕物が 0.10～0.30 m 降り積もり，二輪駆動車が通行不能になる可能性が考えられる．該当のエリアが東西方向に延びているが，東側は偏西風の影響，西側は台風等の特異な風速場の影響と考えられる．

さらに，**図-4** より，想定火口から半径 40 km 圏内のエリアで堆積深が 0.30 m 以上となり，大規模噴火後の降雨や地震によって土石流や家屋倒壊等が発生する可能性が考えられる．大正噴火後の土石流は，時間雨量24 mm 程度の小規模な降雨でも発生しているため[1)]，該当するエリアにおける土石流の被害および対策について検討する必要が考えられる．

そして，堆積深 1.00 m 以上の著しい降下化火砕物の堆積は，桜島南岳火口から半径 20 km 圏内で発生する可能性があることが見て取れる．堆積深 1 m 以上は成人の腰の高さ以上まで降下火砕物が降り積もることを意味するため，徒歩ですら移動困難な状況となることが想像に難くないが，風の条件次第では，鹿児島県内の人口密集地である鹿児島市平野部においても発生する可能性があると考えられる．

(3) 堆積確率に基づくハザードマップ

前節の最大堆積深に基づくハザードマップは，各エリアにおける最大の災害リスクの分析に有効であるが，噴火時に必ず閾値以上の降下火砕物の堆積が生じるわけではない．対策検討が重要な地域を絞り込むには，災害が発生する可能性について検討するために，災害発生の閾値以上となる確率の検討が必要と考えられる．本研究では，2020～2024 年の降下火砕物シミュレーション結果から各格子点で，対象期間内に閾値以上の堆積深となったケース数を対象期間の総ケース数で除すことで堆積確率を計算し，その後，エリア毎に確率の最大値を抽出することで，堆積確率に基づくハザードマップを作成した．**図-5** は，堆積深 0.30 m 以上となる確率，つまり土石流，家屋倒壊についてのハザードマップである．本図は，対象期間内に閾値以上の堆積が発生したケースが多いエリアを強調し，1 回程度のケースが反映されなくなるため，**図-2～4** よりも分布範囲が狭く表示される．**図-5 (a)～(e)** は，2020～2024 年の各年の

表-1　対象とした災害（参考文献 1)，10) を基に作成）

災害，影響	閾値
徒歩での移動が不可能	1.00 m
土石流，家屋倒壊	0.30 m
二輪駆動車の通行不能	0.10 m
降雨時に二輪駆動車の通行不能	0.03 m
火山灰の再移動による視界不良による車の速度低下	0.01 m

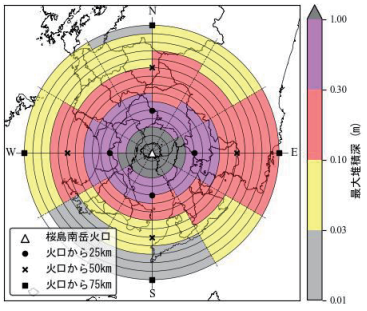
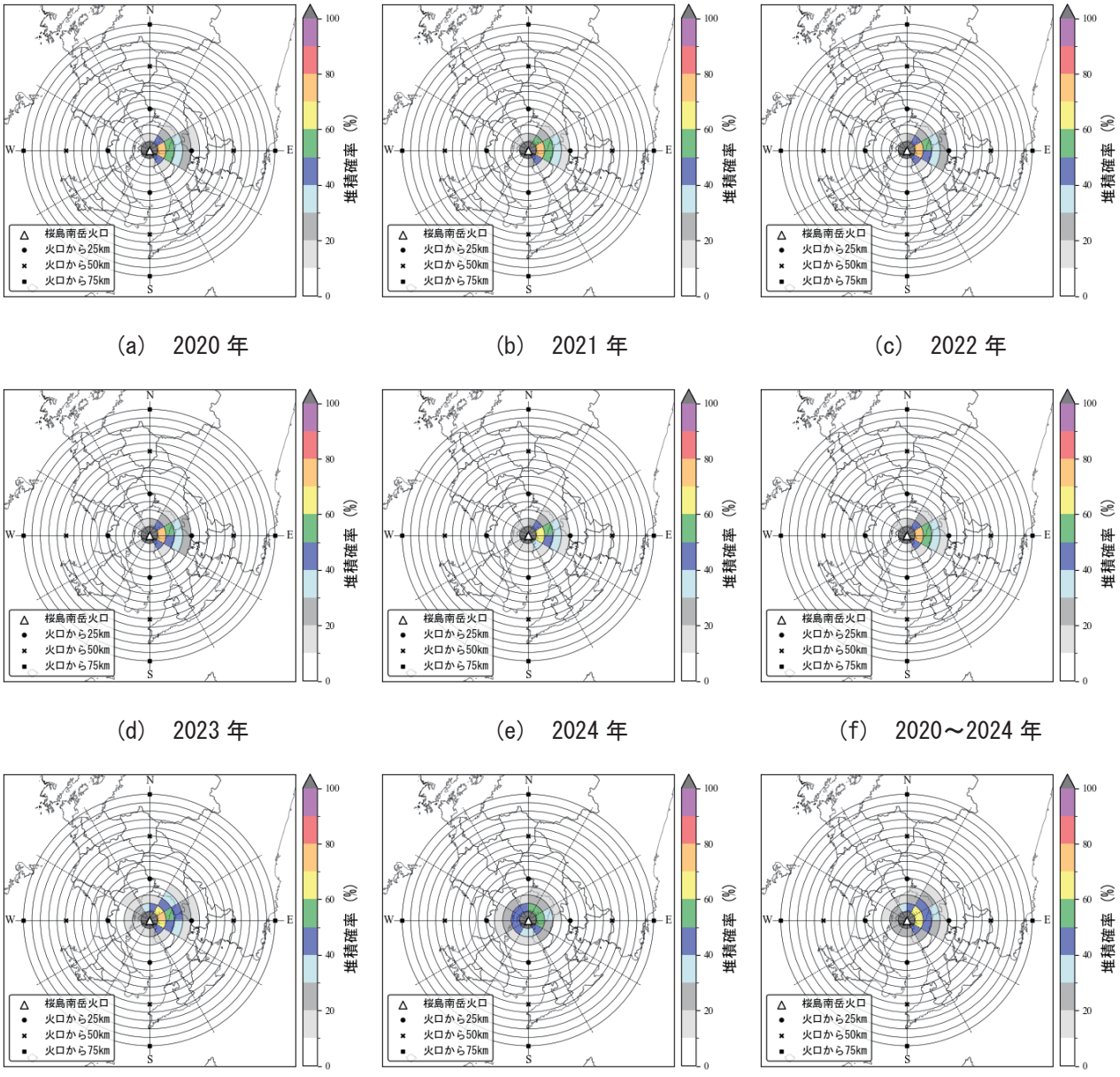


図-4 最大堆積深に基づくハザードマップ

解析結果を基に作成したマップであり，**図-5(f)**は5年間分の解析結果を基に作成したマップである．**図-5(a)～(e)**より，2020～2024年の各年における0.30 m 以上の堆積確率の傾向はほとんど同じであり，したがって，5年間の解析結果を統合して作成した**図-5(f)**も同様の傾向を示した．**図-5(f)**より，桜島以東においての堆積確率が比較的高く，想定火口から東方向 5～15 km 先の確率は 40～80%であることが読み取れる．該当する垂水市，鹿屋市では桜島大規模噴火時の土石流，家屋倒壊対策が特に重要であると考えられる．

一方で，前節の**図-4**では，想定火口の半径 40 km 圏内のほぼ全方位で降下火砕物の堆積深が 0.30 m 以上となる可能性が読み取れたが，**図-5(f)**より，想定火口から東以外の方角における堆積確率は10%未満であることが読み取れる．垂水市や鹿屋市以外における対策の重要性が低いように思われるが，この結果は桜島の東側以外に降下火砕物が堆積するのが夏場付近に限られ，全体の期間に比べて少なくなったことが影響したと考えられる．そこで，**図-5(g)～(i)に**，それぞれ 2020～2024 年の 7 月，8 月，9 月における 0.30 m 以上の堆積確率についてのハザードマップを示す．梅雨明け前のデータが含まれる**図-5(g)**（7 月）と秋に差し掛かる時期のデータが含まれる



(a)　2020 年　　(b)　2021 年　　(c)　2022 年

(d)　2023 年　　(e)　2024 年　　(f)　2020～2024 年

(g)　2020～2024 年の 7 月のみ　　(h)　2020～2024 年の 8 月のみ　　(i)　2020～2024 年の 9 月のみ

図-5　堆積確率に基づくハザードマップ（閾値 0.30 m 以上）

図-5(i)（9 月）は，桜島より東方向における堆積傾向が強いが，桜島から西方向 5~10 km のエリアにおいて，堆積確率が 10～30%程度ある．また，図-5(h)より，8 月においては，桜島の全方位に対して，0.30 m 以上の堆積傾向があまり変わらないことがわかる．したがって，鹿児島市を含む薩摩半島方面は，年間を通じて比較的雨量が多くなる夏場を想定した土石流，家屋倒壊対策が重要であると考えられる．

4. おわりに

本研究では，桜島の大正噴火級の大噴火時の降下火砕物シミュレーションを 2020～2024 年の各日の風速場を用いて実施し，降下火砕物の堆積傾向および複合災害の発生リスクについて検討を行った．以下に，本研究で得られた知見をまとめる．

1) シミュレーション結果より，降下火砕物が偏西風の影響によって多くの時期で桜島より東側に分布する傾向が見られた．一方で，夏場の季節風や台風等によって，薩摩半島方面にも堆積が生じる可能性が考えられた．
2) 最大堆積深に基づくハザードマップより，降下火砕物による車の走行速度低下や通行不能等の交通災害は，鹿児島県本土全域，熊本県，宮崎県にわたる広範囲で発生の可能性が考えれた．さらに，桜島から半径 40 km 圏内では土石流，家屋倒壊の可能性が，半径 20 km 圏内では 1.00 m以上の堆積深となる可能性が考えられた．
3) 0.30 m以上の堆積確率に基づくハザードマップより，年間では桜島東側の垂水市，鹿屋市における土石流，家屋倒壊の対策が特に重要であると考えられた．ただし，夏場の特に 8 月に限定してみると，桜島から全方位で土石流，家屋倒壊の発生リスクが同程度あること考えられた．

今後は，降下火砕物シミュレーションのさらに複数年分の風速場による実施，用いる風データの改良等により，分布傾向把握の精度を高めていきたい．また，本研究では，外力となる降下火砕物の堆積量のみで複合災害の発生リスクを評価したが，今後は，各災害の数値シミュレーション結果等を考慮に加えたいと考える．

謝辞：本研究で使用した降下火砕物シミュレーションのプログラムは，元鹿児島大学地域防災教育研究センター中谷剛特別研究員に提供いただきました．ここに記し，謝意を示します．

参考文献

1) 中央防災会議・災害教訓の継承に関する専門調査会：1914 年桜島噴火・報告書，https://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1914_sakurajima_funka/index.html，2011.
2) 鹿児島市：鹿児島市地域防災計画桜島火山災害対策・大量軽石火山灰対応計画，https://www.city.kagoshima.lg.jp/kikikanri/kurashi/bosai/bosai/bosai/kekaku.html ，2023.
3) 中谷剛，浅野敏之：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，自然災害科学 J.JSNDS，Vol.40，No.S08，pp.175-189，2021.
4) Suzuk T.: A Theoretical Model for Dispersion of Tephra, Volcanism : Physics and Tectonics, edited by D. Shimozuru and I. Yokoyama, pp.95-113, 1983.
5) 浅野敏之，長山昭夫，加古真一郎：火山噴火災害時の港湾 BCP 立案の基礎となる海域内降下火砕物の流動解析，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.76，No.2，pp.I_1321-I_1326，2020.
6) Wilson，L. and Huang，T.C.: The influence of shape on the atmospheric settling velocity of volcanic ash particles，Earth and Planetary Science Letters，Vol.44，Issue.2，pp.311-324，1979.
7) Pfeiffer，T.，Costa，A.，Macedonio，G.: A model for the numerical simulation of tephra fall deposits，Journal of Volcanology and Geothermal Research，Vol.140，Issue 4，pp.273-294，2005.
8) 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.
9) 気象庁：過去の気象データ検索（高層），https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/upper/index.php ，2026.
10) 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：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），https://www.bousai.go.jp/kazan/kouikikouhaiworking/index.html，2020.

（2026.5.29 受付）