

# 降灰リアルタイムハザードマップ作成手法の検討（最終報）

地震火山地域防災センター 中谷 剛

## 1. はじめに

火山災害の中で火砕流、溶岩流や噴石等の現象は、直接的に人命を損なう大きな破壊力を持つが、その影響範囲は火山の周辺に限定される特徴がある。一方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、噴火の規模によって数 100km に及ぶ。社会や生活への影響が大きく、例えば、微量な降灰であっても鉄道の運行は停止し、上水道は水質低下による断水の可能性がある。3mm 程度の降灰でも降雨時は漏電が発生しやすくなり停電の可能性が高まる。さらに、10cm 程度の降灰で自動車での通行が不能となり、30cm の降灰（湿潤）では木造家屋倒壊の可能性も指摘<sup>1)</sup> されている。また豪雨時には、降灰堆積が押し流されて発生する泥流や、堆積した火山灰によって河積阻害を起こした河川からの出水、軽石火山灰の堆積による道路側溝や下水道閉塞による内水氾濫などへの影響が考えられ、こうした複合災害が長期化する可能性もある。

こうした降灰被害への備えには、次のような難しさがある。第一は、もともと大規模噴火は稀な自然現象で、現在の私たちには被災経験がないことである。最も活発な火山と言われる桜島の場合でも、直近の大規模噴火は 1914 年の大正噴火にまで遡る。大正噴火についてはかなり詳細な記録が残されているが、この 108 年間に私たちの日常や社会のあり方が大きく変容した。いま大規模噴火が起きた場合、どのような被害が社会や生活に及ぶのかは想像するしかない。第二は、例えば洪水による浸水範囲や浸水深は地形的要因が支配的なので、土地の低い場所や河川の近くなど危険箇所を事前に把握できるが、降灰の影響範囲や降灰量はその時の気象条件（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である。

このような降灰被害対策の困難さに対応するためには、予想される降灰堆積深といったハザード情報だけでなく、その結果引き起こされる災害リスクを可視化できる降灰リアルタイムハザードマップが望まれる。そのような視点に立って令和元年度報告書（第一報）では、社会が内包する脆弱性による災害リスクを可視化することを目的に、降灰堆積深が 1m を超えると想定される鹿児島市の地域を対象として、GIS を利用した「倒壊した場合に道路閉塞を起こす木造住宅マップ」や「孤立する後期高齢者分布マップ」の作成手法について報告した。また、令和 2 年度報告書（第二報）では、降灰シミュレーションモデルを構築し、1 年間にわたる風向風速の観測値を利用した降灰計算による最大堆積深に基づく「2020 年版降灰ハザードマップ」を作成し報告した。

降灰シミュレーションでは観測された風向風速を利用したが、例えば数日後の風向風速の予測値を利用することで、近未来の大規模噴火を想定した降灰シミュレーションができる。同様に、これまで災害リスク評価は GIS ソフトを利用してマニュアルで実施してきたが、その手法や GIS による処理プロセスがわかってきたので、災害リスク評価をプログラミングすることが可能になった。そこで今年度はこれまでの研究成果を統合し、風向風速の予測値をオンラインで取得し降灰計算に利用することで、数日先の降灰堆積深分布や災害リスクを可視化できる降灰リアルタイムハザードマップシステムを開発した。2021 年 7 月よりシステムの試験的運用を開始したので報告する。

## 2. 降灰リアルタイムシミュレーションモデルの概要

桜島には多数の観測器が設置されていることから、数日～数週間前に大規模噴火の予兆を捉えることは可能だとされている。しかし噴火そのものの予測は困難である。また、仮に大規模噴火発生直後から降灰シミュレーションを実施するとしても、そのようなシステムを構築するには技術的課題がまだ多く現実的ではない。そこで、大正噴火級の大規模噴火を現在時刻の 2 日後及び 1.5 日後に想定し、それぞれの噴火から 18 時間後の降灰堆積深分布を計算することを 6 時間毎に更新しながら 24 時間連続で継続する待ち受け型の計算を行うことにする。一般的にリアルタイム

計算というと大規模噴火の発生直後から降灰シミュレーションを実施することを想像するが、ここでは待ち受け計算によって、防災担当者に必要な時に必要な情報が届けられているという意味で、リアルタイムシミュレーションと呼ぶことにする。

待ち受け型計算の風向風速データには、気象庁数値予報モデル GPV (GSM 日本域) を利用する。気象庁では、地球大気や海洋・陸地の状態の変化を数値シミュレーションによって予測している。この計算に用いるコンピュータープログラムを「数値予報モデル」と呼んでいる。数値予報モデルは、その予測領域と格子間隔、予測期間などによって幾つかのモデルがあるが、本研究では予測期間の長い全球数値予報モデル GSM (日本域) を利用した。GSM と計算格子の関係を図 1 に示した。

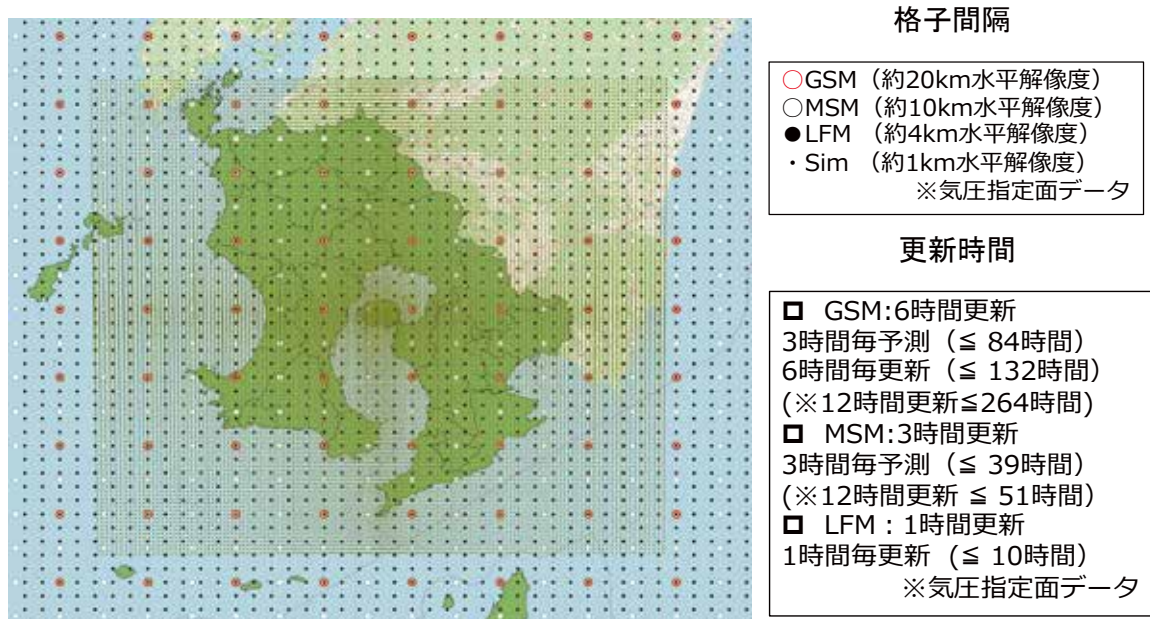


図 1 GPV と降灰計算の格子間隔

降灰シミュレーションモデルは、以下の 2 次元移流拡散方程式を基礎方程式<sup>2)</sup>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 次元的な降灰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、 $C_L$  は粒径別の火砕物濃度、 $W_x, W_y$  はそれぞれ水平、垂直方向の風速、 $w_{s,L}$  は粒径別降下速度、 $K_x, K_y$  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噴煙量で、噴煙高度から噴出量を算出し、次の Suzuki 式<sup>3)</sup> で鉛直分布を与える。

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

ここに、 $S_0$ : 規格化係数、 $H$ : 噴煙柱高度、 $A, \lambda$ : Suzuki 係数で本研究では標準値  $A=4, \lambda=2$  を与えた。

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、抵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

るため、粒径ごとの降下速度は標準大気 (U.S. standard atmosphere, 1976) を仮定して算出した。計算に使用する粒径分布は、 $\Phi$ スケールで-5 から 5 の 11 粒径(32mm~0.03125mm)とし、標準偏差 $\sigma_\phi=2$ 、平均値 $\mu=-1$ (2mm)となる粒径分布を与えた。2mm 以上の粒径を軽石、それ以下を火山灰とした。

噴火想定規模は、大正噴火級とした。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<sup>4)</sup>。大正噴火時の噴煙高度の時間変化は図 2 の実線に示すようである。降灰シミュレーションでは、図中の棒グラフのように 1 時間毎の噴煙高度は一定として計算した。一般的に、噴煙高度を  $H$  (m)、単位時間当たりの噴出量を  $\Delta M$  (kg/s) とすると、両者の関係には以下の経験式が提案されている<sup>5)</sup>。

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

大正噴火における軽石・火山灰の総噴出量は 4.5~6 億  $\text{m}^3$  であることが報告されている<sup>6), 7)</sup> ので、本研究では総噴出量を 6 億  $\text{m}^3$  と設定し、(3) 式に図 2 に示した噴煙高度  $H$  の時間変化を与えて得られる総噴出量が 6 億  $\text{m}^3$  となるように補正して 1 時間ごとの  $\Delta M$  (噴出量) を求めている。図 3 に降灰リアルタイムシミュレーションモデルの概要を示した。

降灰リアルタイムシミュレーションでは、3 次元的に計算格子を配置して 2 次元移流拡散方程式を差分法で解いている。計算領域は鹿児島県本土全域の約 150km 四方で、大正噴火級の大噴火を扱えるように高度 1500m ~20000m までを計算対象とした。また、2015 年以降は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、噴火口の想定位置を南岳山頂火口とした。

降灰リアルタイムハザードマップシステムの運用については、噴火の 42 時間前に高齢者等の避

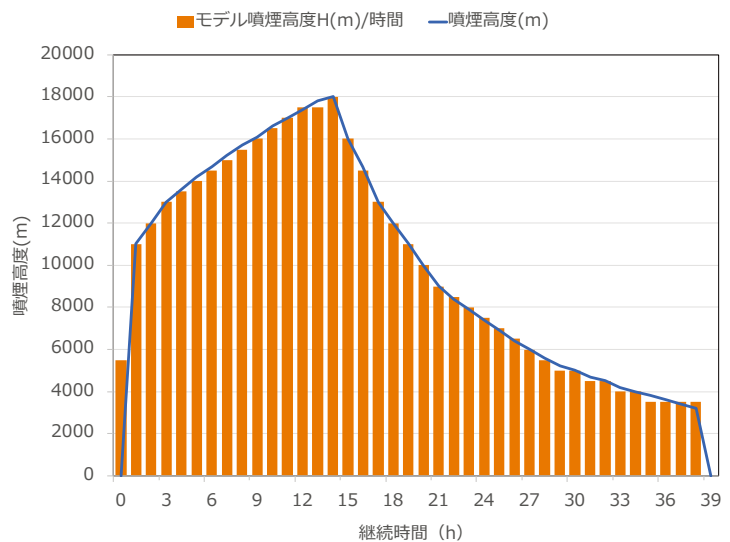


図 2 噴煙高度の時間変化 (大正噴火)

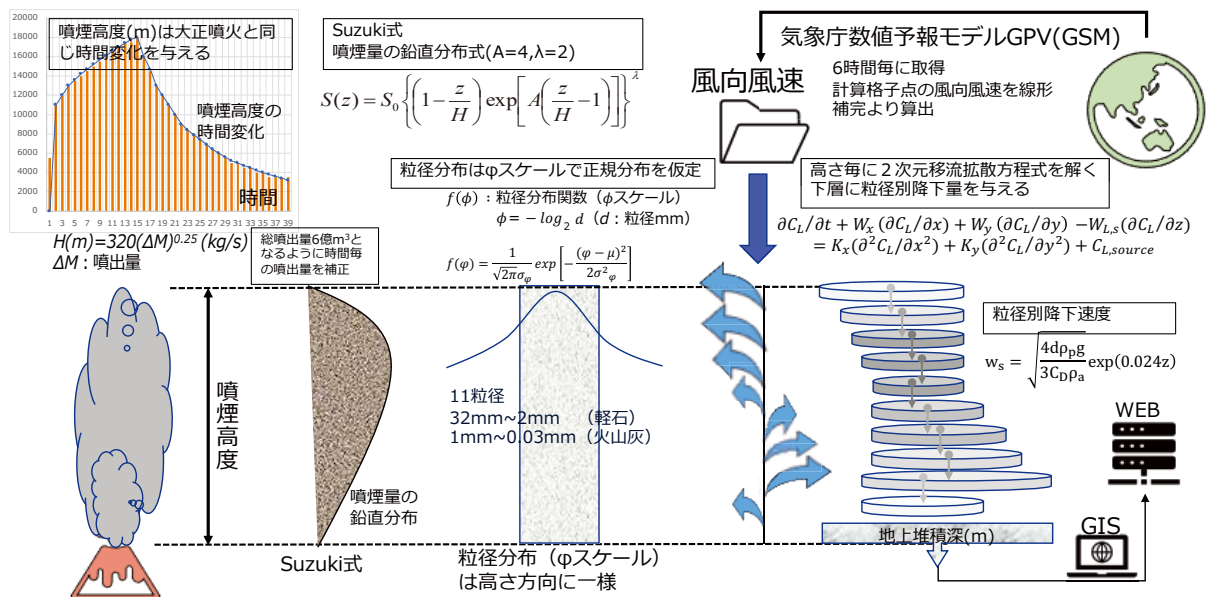


図 3 降灰リアルタイムシミュレーションモデルの概要

難、及び噴火の30時間前に避難指示の発令を想定した。さらに避難判断のリードタイムを確保するため、また気象庁数値予報モデルGPV(GSM日本域)の風向風速の予測値の更新が6時間間隔であることから、現時刻から6時間以内(意思決定プロセスを含む)に情報提供が可能となるような運用を前提とした。6時間の内訳は、GPVデータの取得に2時間、降灰シミュレーションに2時間、情報提供及び意思決定に2時間とした。そのため、現時刻から36時間後に噴火を想定し、その後18時間先の予測堆積深を6時間以内に提供する30時間前予測情報と、現時刻から48時間後に噴火を想定し、その後18時間先の予測堆積深を6時間以内に提供する42時間前予測情報を作成する必要がある。これらの要件を満たし2時間以内に計算を終了できるように、水平方向の計算格子間隔は桜島周辺が700m、計算領域端付近が1400mとなる不等間隔格子を採用した。また、高さ方向は1000m間隔とし、噴火から18時間先の予測堆積深を求めることで計算時間を短縮した。なお、18時間後の予測堆積深は48時間後の予測堆積深の概ね80~90%程度であることが既存の検討からわかっている。表1に、降灰リアルタイムシミュレーションの運用イメージを示した。また表2に、昨年度までの降灰ハザードマップを作成したシミュレーションモデルの諸元と今回のモデルの比較を示した。

表1 降灰リアルタイムシミュレーションの運用イメージ

予測時間	0	1	2	3	4	5	6	7	8	~	33	34	35	36	37	38	~	48	49	50	51	52	53	~	63	64	65
GSM00UTC (6時間更新)	GPV取得	計算	意思決定	リードタイム30時間												噴火	18時間後の降灰深										
	GPV取得	計算	意思決定	リードタイム42時間												噴火	18時間後の降灰深										

表2 降灰リアルタイムシミュレーションモデルの諸元

項目	降灰ハザードマップ(既存)	降灰リアルタイムハザードマップ
噴火規模	大正噴火級	→
基礎方程式	2次元移流拡散方程式	→
計算範囲	150km 四方(鹿児島県本土域)	→
計算高度	20km	20km
水平解像度	500m~1330m	700m~1400m
垂直解像度(高度方向)	500m	1000m
計算時間間隔	$\Delta t=2\text{sec}$	$\Delta t=4\text{sec}$
風向風速の解像度	鹿児島気象台1地点	GSM20km 四方(指定気圧面)
風向風速の更新時間	12時間	6時間
計算結果	48時間後の堆積深	18時間後の堆積深
必要な総計算時間(1ケース)	約53時間	約2時間
備考		2日後及び1.5日後に噴火を想定した計算を同時に実施

### 3. 降灰リアルタイムハザードマップシステムの概要

システム全体のOSには、Ubuntu20.04LTSを利用した。気象庁数値予報モデルGPV(GSM日本域)の風向風速データをオンラインで取得するプログラムは、Python3.6で記述した、数値予報モデルGPVの気象データは、世界気象機関WMOが定める国際気象通報式FM92GRIB二進形式格子点資料気象通報式(第2版)(略称:GRIB2)というフォーマットが採用されている。これらのデータを降灰シミュレーションに取り込んで計算ができるように処理するために、wgrib2(米国海洋大気庁NOAAが提供しているGRIB2処理プログラム)を利用した。降灰シミュレーションのメインプログラムはGFortranを採用した。降灰計算結果から災害リスクとして、堆積深が10cm以上のエリア内人口及び世帯数(2015年国勢調査)と、65歳以上の高齢者人口及び高齢者の一人世帯数・夫婦世帯数の情報を抽出している。図4にはGISによる人口・世帯数の抽出方法の手順を示した。同様な手法で、通行できない区間があると推定される道路名を抽出している。また、堆積深が30cm以上のエリア内を流下する河川を、降灰による河積阻害によって一時的に治水安全度が低下する河川として抽出している。これらのGIS処理はPython、GDAL、GeoPandas

などの言語で記述したプログラムを作成して自動化している。これらの結果をわかりやすく表示する目的で、鹿児島大学内に公関係 WEB サーバー（仮想環境）を整備し、閲覧サイトを構築した。本システムでは複数の開発言語を使用しているが、いずれもオープンソースなものを採用した。また、GIS データや表示用の背景地図等についても、GIS ホームページ（国交省：<https://nlftp.mlit.go.jp/index.html>）、e-Stat（統計で見る日本：<https://www.e-stat.go.jp/>）、及び国土地理院（<https://www.gsi.go.jp/top.html>）など、無料で公開されているデータを利用している。図5に降灰リアルタイムハザードマップシステムの概要を示した。また、図6には、降灰リアルタイムハザードマップのイメージを示した。

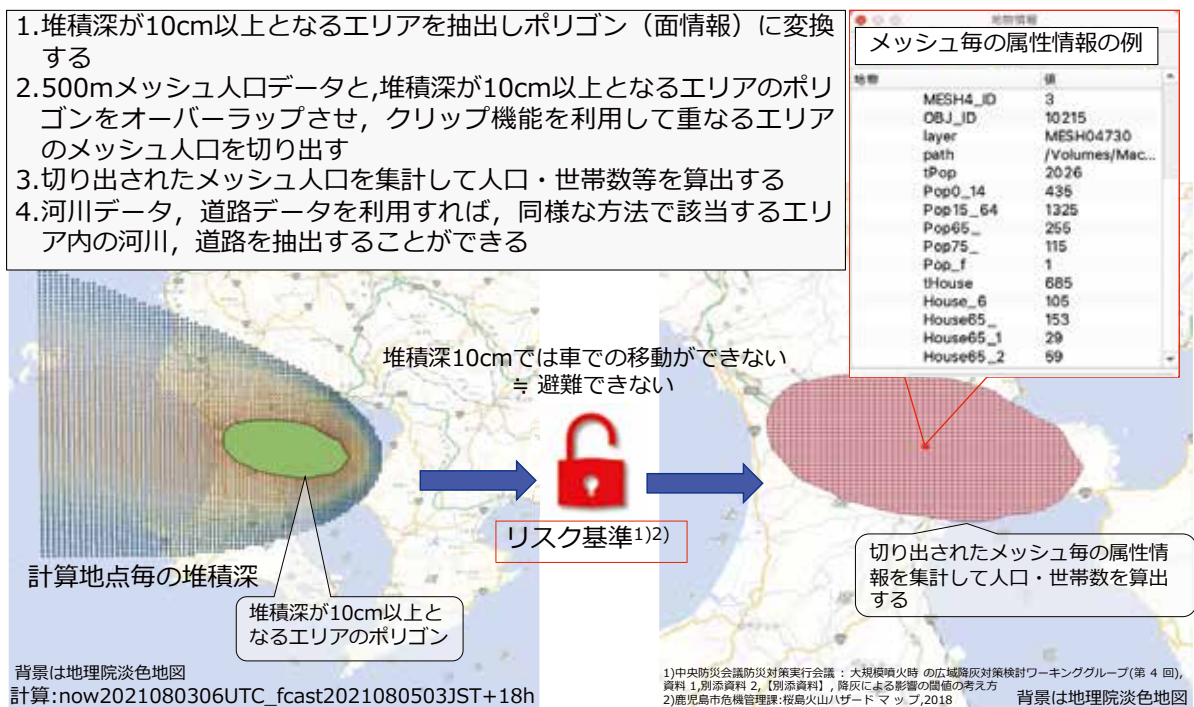


図4 GISによる人口・世帯数の抽出手順

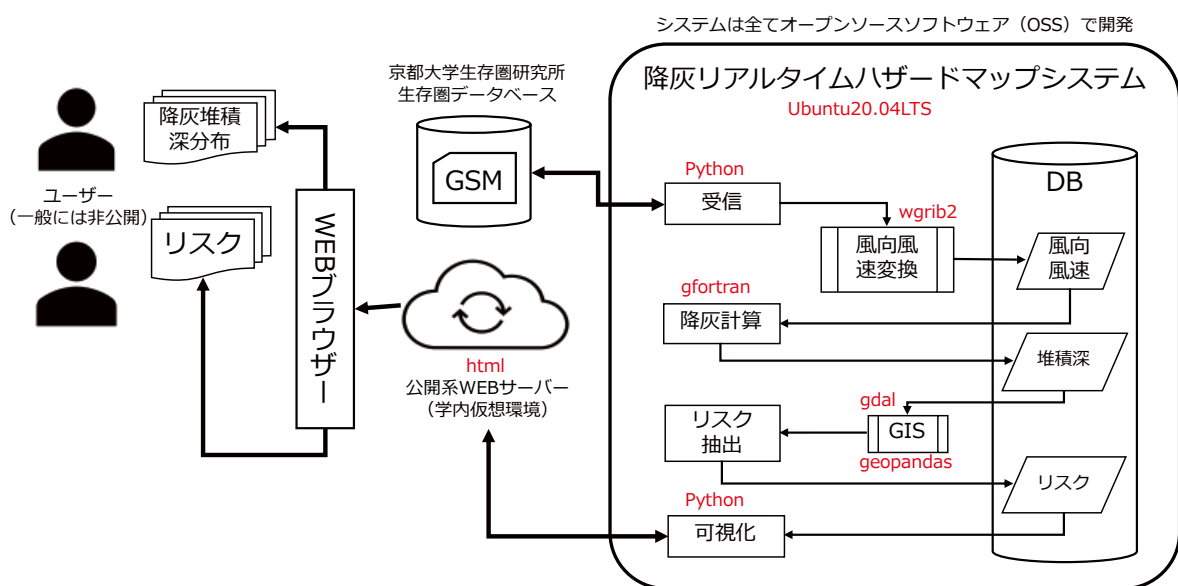


図5 降灰リアルタイムハザードマップシステム概要

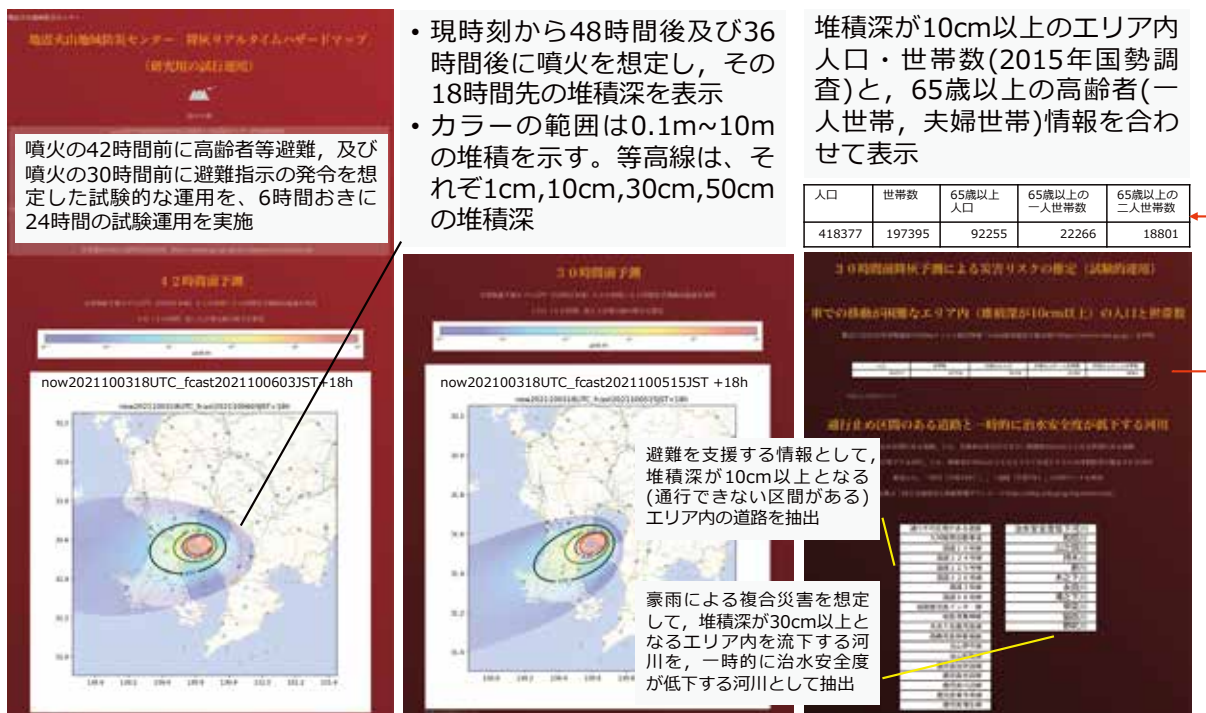


図6 降灰リアルタイムハザードマップ

#### 4. 降灰予測情報の一般公開への課題

降灰リアルタイムハザードマップは自治体の防災担当者だけでなく、市民や民間企業のBCPにも有効だと考えられる。しかし台風の進路予測とは異なり、実際には起きていない大規模噴火が「もし」起きたら、という情報になっている。このような新しい情報を提供する場合には、ユーザーがどのようにしてこの情報を活用できるのかということ併せて検討する必要がある。そこで、将来的に一般市民へ情報公開を行う場合の課題抽出を行う目的で、気象予報士会鹿児島支部の会員の方々に期間限定で降灰リアルタイムハザードマップを閲覧して頂き、情報利用の可能性や課題等について自由記述式アンケート調査にご協力を頂いた。気象予報士の方々は気象一般に関する知識が豊富で、予測された降灰堆積深が示す意味を的確に理解できる。また、会員は多様な職業に就いており、防災にも関わっている方もおられることから、このような新しい情報の活用について共同研究を行う最適な方々である。

公開期間は、2020の8月1日～31日とした。図7に、2020年2月と8月の毎日午前9時に観測(気象庁鹿児島気象台)された風向風速を示した。図の角度は北を0°とし右回りに風向を示している。また、半径方向は風速の大きさを示している。図中の丸印は高度別に観測された風向風速を示している。偏西風が卓越する2月は、西寄りの強い風をどの高度でも観測していることがわかる。偏西風の勢力が弱まる8月は全方向の風向が観測されている。このうちの数日間に桜島が大規模噴火すれば、鹿児島市などが位置する桜島の西側の地域でも大きな降灰被害を被ることとなりやすく、鹿児島市にとって8月は降灰リスクが高まる期間となっている。実際に、2020年の1年間を通した降灰シミュレーションの結果によると、鹿児島中央駅付近の堆積深が大きい上位10ケースの内、9位までが8月に集中していることがわかっている。

公開する情報としては、現在時刻から1.5日(36時間)後に噴火を想定し、その先18時間後の堆積深分布図とした。なお、風向風速データを取得してから情報を提供するまでに6時間の計算時間が必要なことから、公開情報としては「30時間前降灰予測情報」とした。図8に公開したWebサイトのコンテンツ例を示した。表3に、アンケート調査の結果を取りまとめて整理した。アンケート調査の結果から、降灰予測情報の利用可能性が示唆されると同時に、降灰被害の経験がなく降灰そのものへの認知不足等から、情報公開がなされる前に一般市民への防災教育・啓発による理解度の向上などが先行されなければならないという課題があることがわかった。

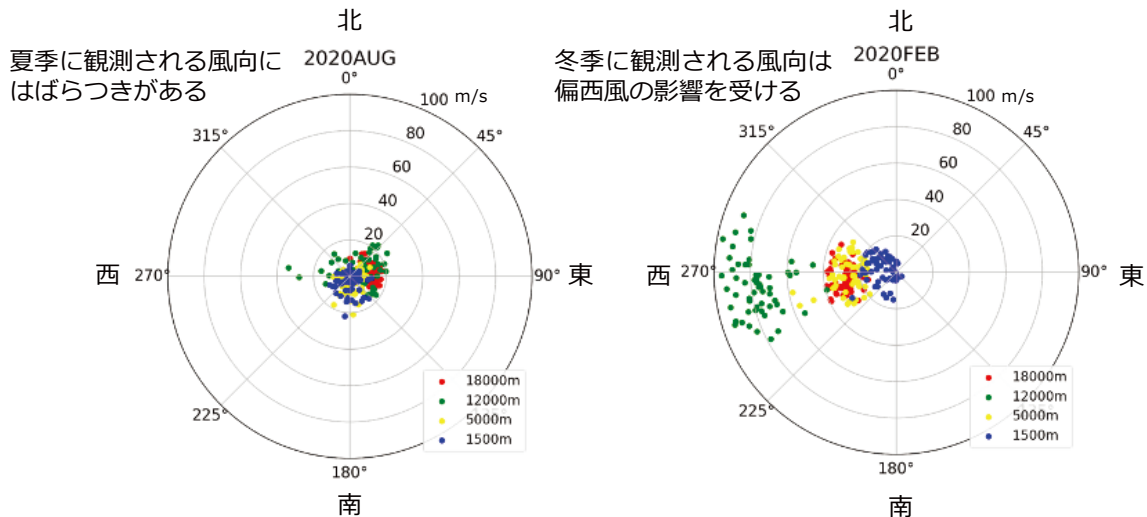


図7 2020年2月と8月に観測された風向風速（鹿児島气象台）



図8 アンケート調査用の公開コンテンツ例

表3 アンケート調査の取りまとめ

Keywords	2021年8月_降灰リアルタイムHM閲覧コメントの整理
避難	日々更新される降灰量予想をもとに、避難ルート選定のシミュレーションを日々行うことができるのではないかと思います。 シナリオ通りにいかないのが火山の噴火だと思います。ありとあらゆるシナリオを想定する必要があると感じます。 風向きが変わりやすいこと、灰が遠くまで飛ぶ場合があることがよくわかります。風向き、飛散エリアの予想をもとに、九州南部（鹿児島・宮崎・熊本）の自治体が広域連携して、避難を考える必要があると感じました。 視程障害により自動車自体は走行できるが前が見えず運転が出来なくなるのはどのくらいの堆積深だと視程障害になる？というのもあっていいと思います。
ライフライン	このような降灰により都市機能が停止した場合、どのような影響が考えられるか、電気・水道事業者の対策を調べてみようと思いました。 防災関係者、一般市民が使用する情報網が遮断されるおそれがあります。携帯電話、光回線、無線、放送電波などの維持・復旧に関して、検討が必要だと思います。 シミュレーションをもとに、機能不全になるライフラインをリストでまとめる必要があると感じます。空路、陸路、海路、電気、水・食料などが断たれて、避難や避難後生活が成り立たなくなる可能性があります。 海上浮遊物（軽石）の量がどれくらいあるのか？ どのような影響があるのか？ 考える必要があると感じます。
教育	視覚的なシミュレーションとしてこのようなものが作れるのではないのでしょうか。 <a href="https://m.youtube.com/watch?v=dY_3ggKg0Bc">https://m.youtube.com/watch?v=dY_3ggKg0Bc</a> (A Day in Pompeii - Full-length animation) 子どもも、大人も、遊んで、学んで、考えられる、防災カードゲームが開発できたらよいかもしれません。 シミュレーションをもとに、降ってくる軽石の重さ、スピード、熱さ、歩きにくさなどを、リアルに体感・実験できる施設や企画展などがあると、市民の理解が深まりやすくなると思います。見たり、触れたりして、実感できるものが大事だと思います。 大量の降灰については過去やほかの地域での経験がほとんどないと考えられます。一般住民が降灰堆積深予測情報を防災行動にどう役立てるか理解が進んでいない中での情報公開には疑問がある。
被害軽減	建築物が軽石の飛来・堆積に対応し、新築する場合の参考になるようなガイドラインを設ける必要がある。行政・病院・避難所などの窓ガラスが、飛来する軽石で割れないようにする。木造民家が軽石の堆積で倒壊しないよう、構造的に強化する、雪国のように屋根に傾斜があるタイプにする。

## 5. おわりに

図9に示すように、桜島は日常的にも爆発的噴火を繰り返している活発な火山であり、その10km圏内には人60万人都市の鹿児島市中心市街地があることから、大規模噴火時には降灰による被害が懸念される。本研究で紹介した降灰リアルタイムハザードマップシステムをうまく活用することで、被害軽減につながることを期待できる。

技術的に残されている課題としては、噴火規模が大正噴火級に固定されていることがある。噴火想定規模への柔軟なシステム対応が望まれる。実用面での課題としては、こうした情報を誰が継続的に作成し維持管理を行うのかという運用面での課題がある。予測情報を広く一般に公開することは、気象業務法により制限があることを含め、今後は研究成果の出口戦略の検討が必要になると考えられる。

最後に、研究に用いたGPVは、気象庁のオリジナルデータを京都大学生存圏研究所が運営する生存圏データベースによって収集・配布されたものを利用した (<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp>)。ここに記して感謝を表します。また、本研究にご協力頂いた気象予報士会鹿児島支部及びコメントを寄せて頂いた会員の皆様に感謝の意を表します。

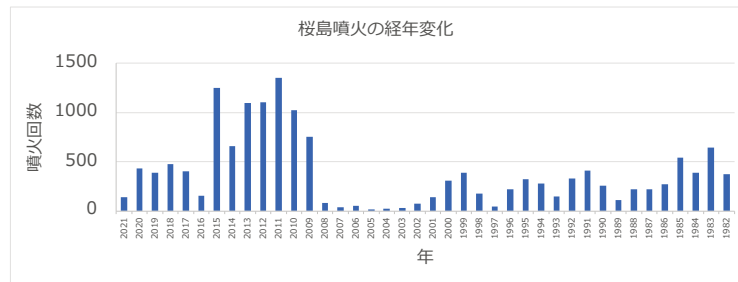


図9 桜島の噴火回数の経年変化（鹿児島気象台）

## 参考文献

- 1) 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(令和2年4月),「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),2020.
- 2) 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 40 特別号 175-189,2021.
- 3) Suzuki, T.: A Theoretical Model for Dispersion of Tephra, *Volcanism; Physics and Tectonics*, edited by D. Shimozuru and I. Yokoyama, pp.95-113, 1983.
- 4) 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.
- 5) 山科健一郎:桜島火山 1914 年噴火の噴煙高度-目撃資料の検討,火山第 44 巻,第 2 号, pp.71-82, 1999.
- 6) 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, 2021 年 6 月 30 日
- 7) 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.