

□ GIS を活用した降灰リスク予測と 降灰リアルタイムハザードマップ

鹿児島大学地震火山地域防災センター
特任研究員 中谷 剛

1. はじめに

火山噴火災害の中で降下火砕物(いわゆる降灰)の影響範囲は広く、噴火規模によって数100kmに及ぶ。社会や生活への影響が大きく、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程度の降灰では自動車走行が不能となり、30cmの降灰(湿潤)では木造家屋倒壊の可能性も指摘¹⁾されている。豪雨時には、堆積した降灰が流されて発生する泥流や、堆積によって河積阻害を起こした河川からの出水、道路側溝や下水道閉塞による内水氾濫など、複合的災害が長期化する可能性もある。

大規模噴火は稀な自然現象で、現在の私たちに被災経験がない。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詳細な記録²⁾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、どのような降灰被害が社会や生活に及ぶのかは想像するしかない。また、降灰の影響範囲や降灰堆積量はその時の気象条件(風向・風速)に左右されるため、事前の被害想定を難しくしている。本報では、このような困難さに

対応し降灰被害軽減を支援する技術として、降灰シミュレーションによる降灰ハザードマップの作成、GISを利用した降灰リスクの予測、及び降灰リアルタイムハザードマップについて紹介する。

2. 降灰シミュレーションモデル

以下の2次元移流拡散方程式を基礎方程式³⁾とした降灰シミュレーションモデルは、取り扱いやすいというメリットがある。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次元的な降灰計算が可能である。

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

ここに、 C_L 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、 $W_{L,s}$ 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⁴⁾で鉛直分布を与えている。

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

ここに、 S_0 :規格化係数、 H :噴煙柱高度、 A, λ :

Suzuki 係数で標準値 $A=4$, $\lambda=2$ を与えた。粒径ごとの降下速度 W_{L_s} 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、大気密度や粘性は高度や気温の関数であり、抗力係数が粒径や降下速度で記述される Reynolds 数の関数となるため、標準大気 (U.S. standard atmosphere, 1976) を仮定して算出した。粒径分布は Φ 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 $\mu = -1$ (2 mm) とし、粒径別噴煙量を算出している。

噴火想定規模は、鹿児島県地域防災計画の火山災害対策編 (令和 3 年 5 月、第 3 部桜島) で想定されている大正 3 年の噴火規模 (1914 年の大正噴火) とした。図 1 に示すように、大正噴火は約 39 時間継続している⁵⁾。降灰シミュレーションでは、1 時間毎の噴煙高度は一定とした。噴煙高度を H (m)、単位時間当たりの噴出量を ΔM (kg/s) とすると、以下の経験式が提案されている⁶⁾。

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

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^{7), 8)} ので、(3) 式に噴煙高度 H の時間変化を与えて得られる総噴出量が、6 億 m^3 となるように補正し

て ΔM (噴出量) を求めた。

降灰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、高度 1500m (桜島の標高は 1117m) ~ 20000m までを計算対象とした。計算格子数は 169x169x38 の約 100 万点で、水平方向には桜島周辺が 500m、計算領域端付近が 1330m となる不等間隔格子を採用した。高さ方向は 500m 間隔とした。なお、地上の地形は考慮していない。

3. 桜島の降灰ハザードマップ

降灰シミュレーションモデルと鹿児島県地方気象台のゾンデ観測による風向風速を使って、桜島の降灰ハザードマップ (図 2) を作成した。この降灰ハザードマップは、2020 年 ~ 2021 年の 2 年を対象に、毎日で大正噴火が起こると想定し 48 時間後の降灰堆積深を 730 日分求めて、その最大値による等高線図になっている。図 3 に降灰ハザードマップの作成手順を示した。

降灰ハザードマップで示した 0.1m を超える範囲は、車による走行ができないので避難が困難なエリアとなる。鹿児島県の広い範囲でその可能性

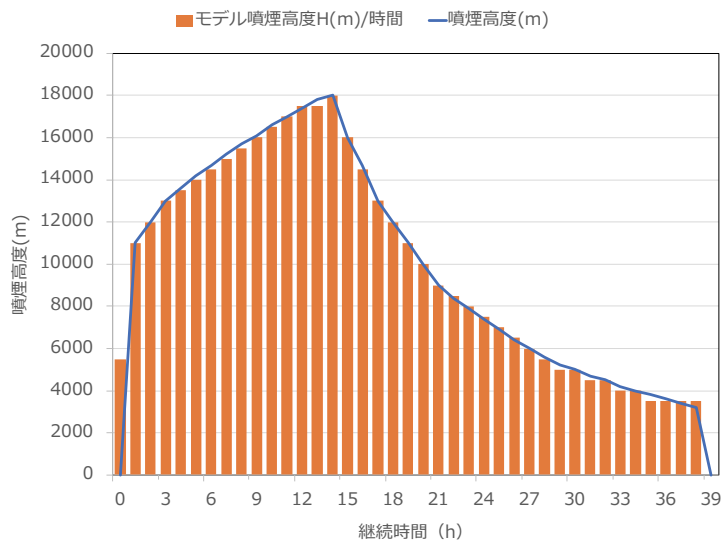


図 1 噴煙高度の時間変化 (大正噴火)

桜島の降灰ハザードマップ

(背景は地理院写真)

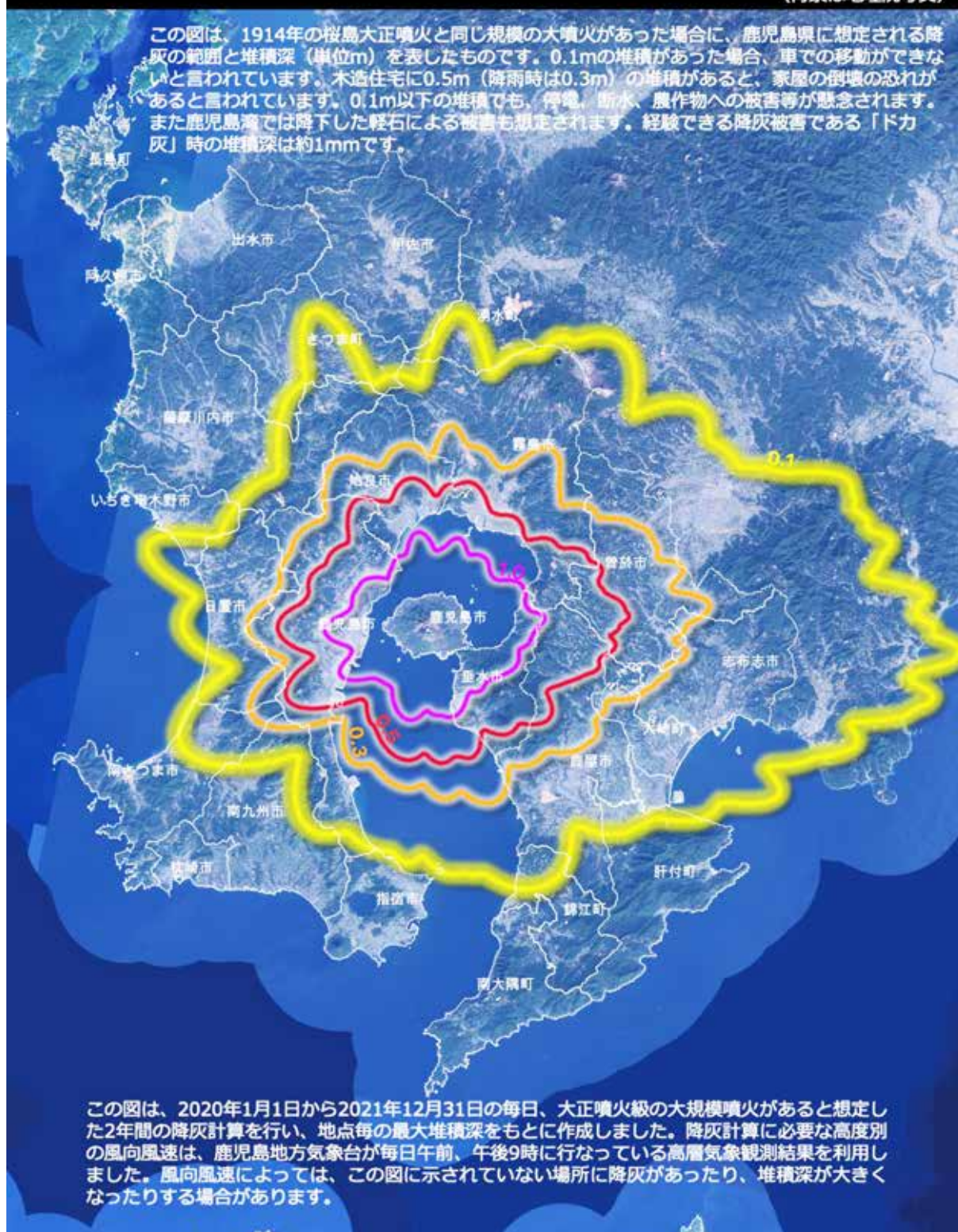


図2 桜島の降灰ハザードマップ

があることがわかる。0.3mを超える範囲では降灰による河積阻害が懸念され、一時的に河川の治水安全度が低下するため、出水期には浸水被害等の複合災害に注意が必要なエリアと言える。0.5mを超える範囲では、古い木造住宅などが倒壊する可能性があるエリアで、建物外への避難は実質的に困難となる。1.0m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エリアと言える。

降灰被害には、大きな被害を受けるリスクと被害を被る頻度が高いリスクの2つの要素がある。鹿児島観測所（気象庁）の高度別月別風向風速の平年値（午前）を図4に示した。風向の360°は北からの風を表している。鹿児島県の上空では

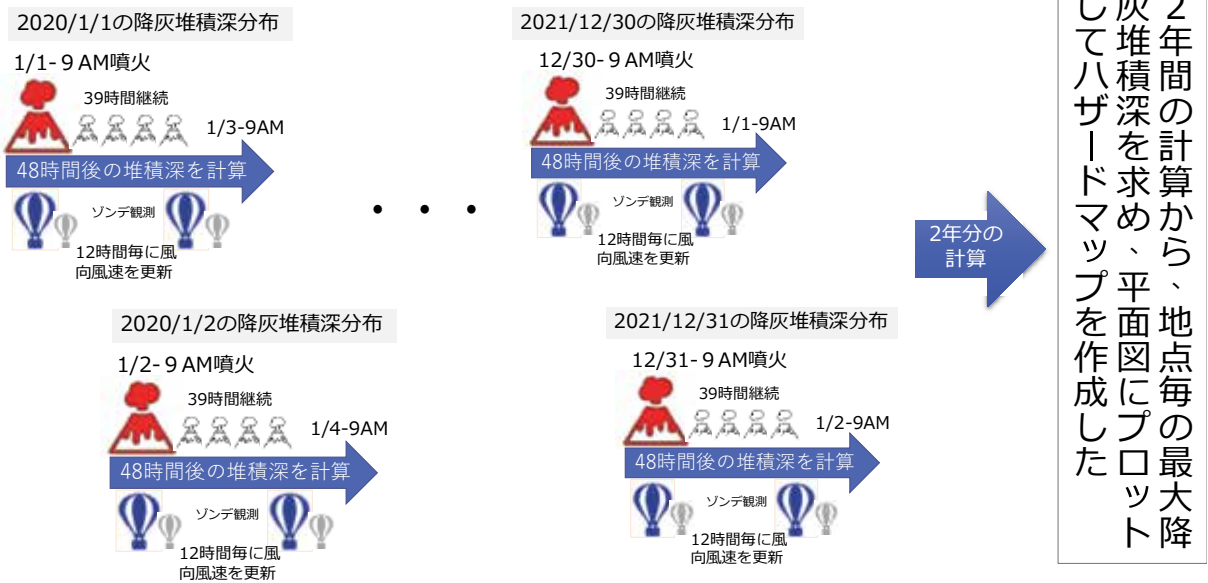


図3 降灰ハザードマップ作成の手順

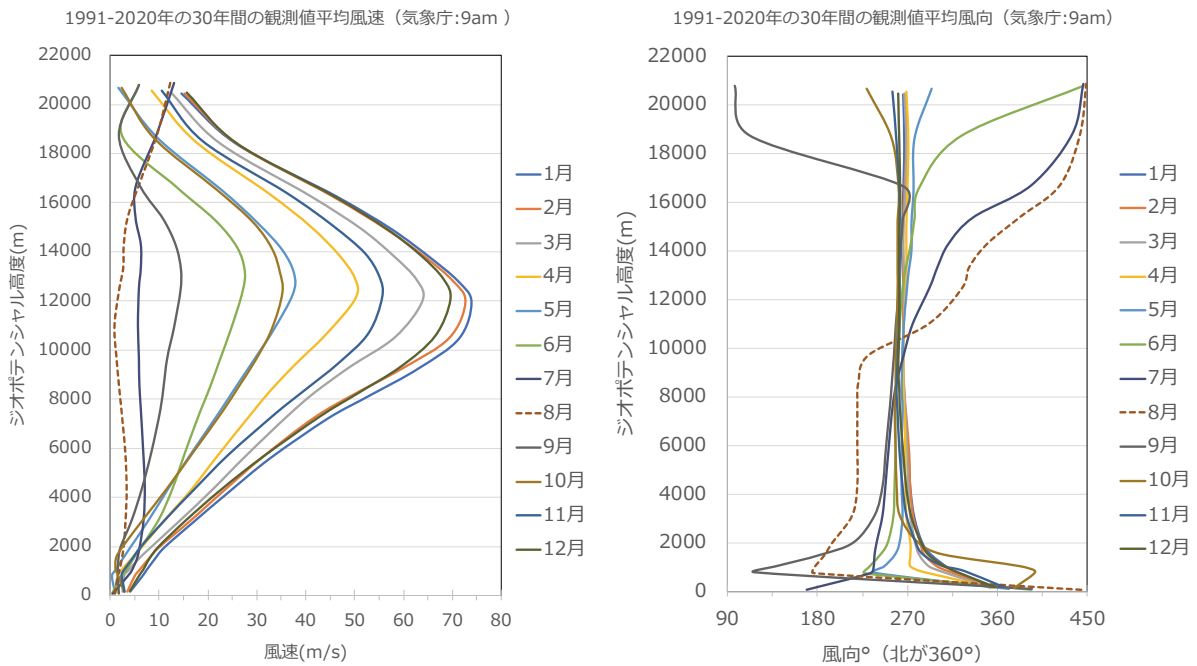


図4 高度別月別風向風速の平年値（鹿児島・午前9時観測値）

偏西風の影響で概ね西風が吹いている。堆積深が10cm以上となる日数の分布を図5（2020年）に示した。桜島の東側地域は日数が大きくなっているが、これは卓越風向方向と一致している。風向の卓越方向側の地域では、ある程度の被害を被る頻度が高いというリスクがあることがわかる。

偏西風は冬季に強まり夏季に弱まる。2020年8月に実際に観測された高度別の風況（午前）を図6に示した。角度は風向を表しており、0°が北からの風である。半径方向は風速(m/s)を表している。偏西風が弱まる8月は風速も小さく風向もばらつく傾向があり、ほぼ全方位からの風が観測されている。この時期に大規模噴火があると、弱い上空の風のため降灰が移流されにくく、桜島近郊で降灰堆積深が大きくなりやすい。2020年の降灰計算では、鹿児島中央駅（新幹線駅）付近の最大降灰堆積深は約1mで、堆積深の上位10ケースのうち9ケースまでが8月に集中した。風向の卓越側でない地域でも、大きな被害を被るリスクがあることがわかる。降灰リスクを風向から想定す

る傾向があるが、卓越風向側が大きな降灰被害を被るとは必ずしも言えない。事前に風向風速の統計処理を行って降灰シミュレーションを実施する場合は、大きな被害を被る降灰リスクを見逃す可能性があることに注意する必要がある。

4. GIS を利用した降灰リスク予測

GISとは、地理的な位置情報を見出しとして、その位置に関わる空間的な情報を管理し加工して視覚的に表示するだけでなく、高度な分析により迅速な判断を可能にする技術⁹⁾である。ここでは2021年8月5日の降灰シミュレーション結果を利用して、避難困難者人口及び世帯数の予測（図7）と道路交通阻害の予測（図8）について紹介する。この日は、鹿児島市街地の広い範囲で48時間後の降灰堆積深が1mを超える計算事例（図9）である。

降灰堆積深が10cmを超えると車の走行ができないので、このエリア内を避難困難地域とし、

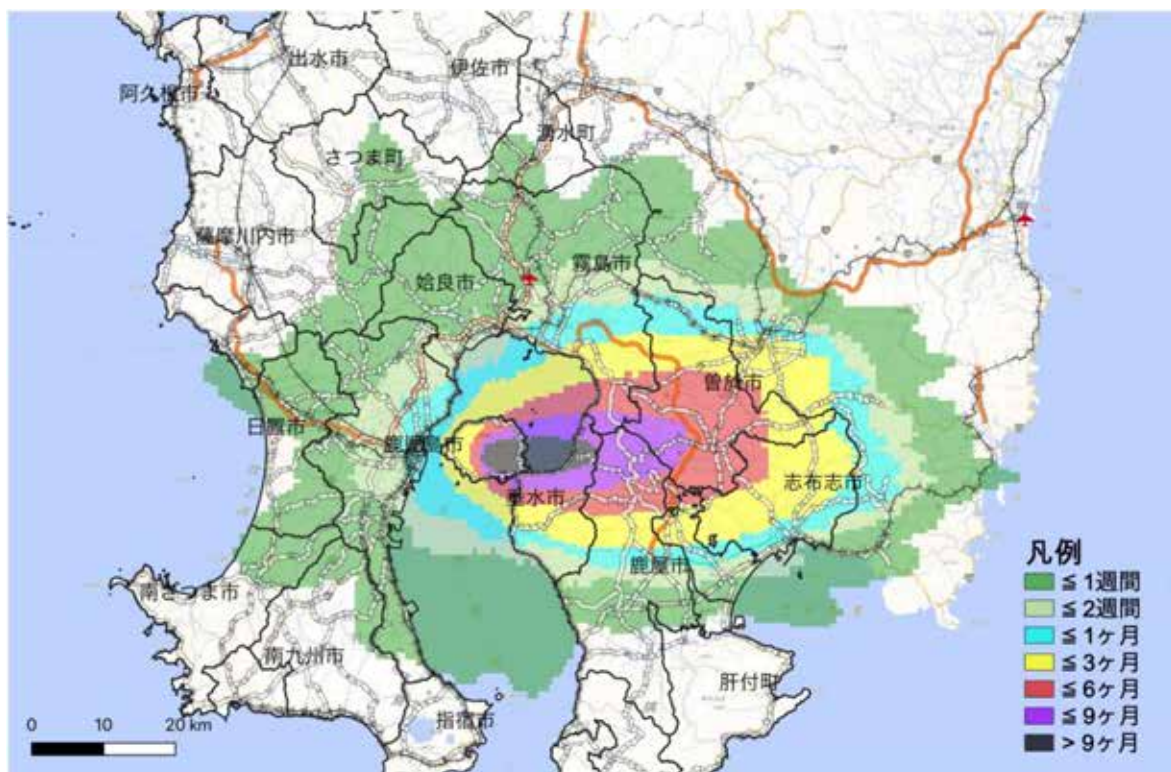


図5 堆積深が10cm以上となる日数分布（2020年）

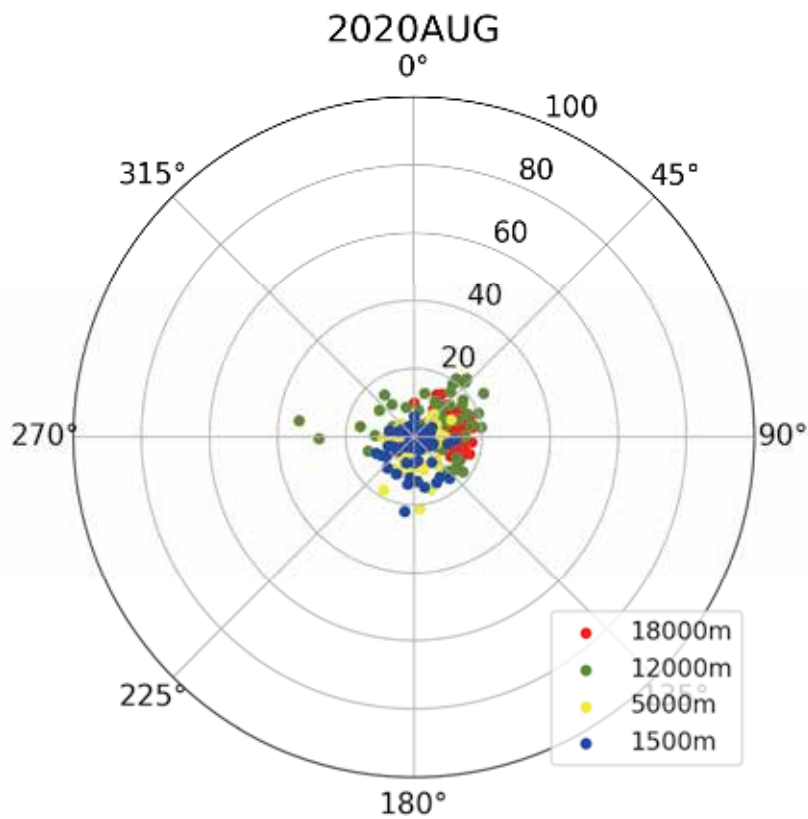


図6 2020年8月の高度別風況図（午前9時観測値）

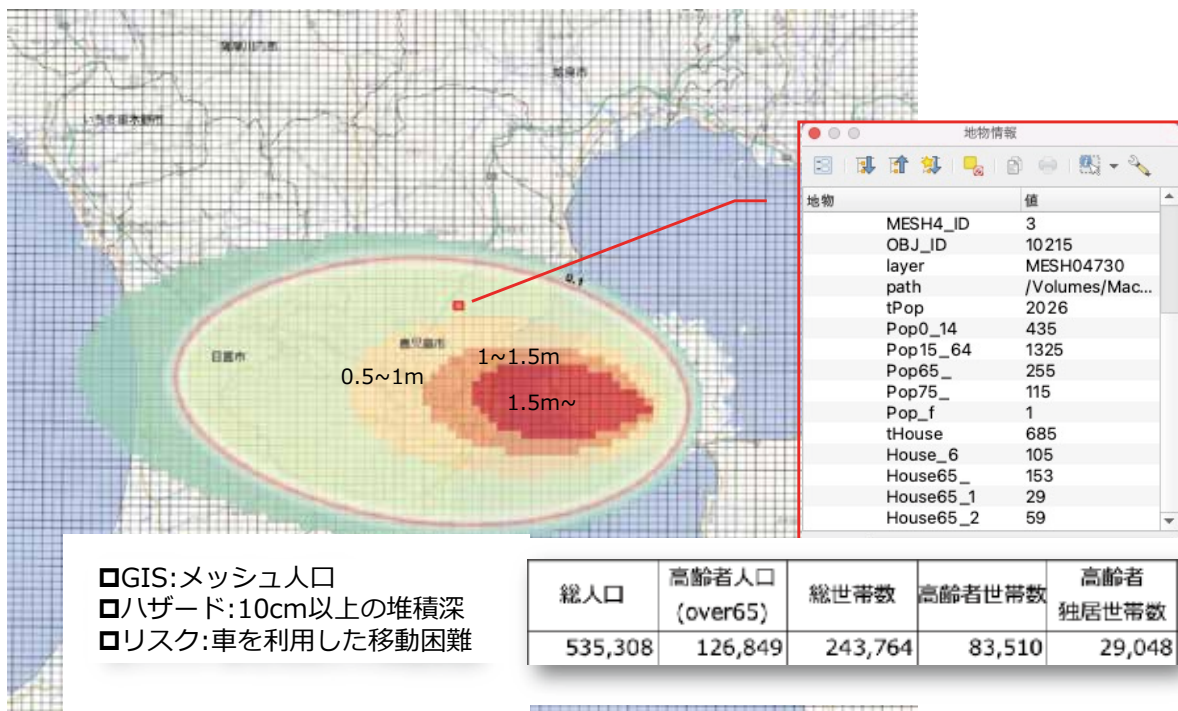


図7 GISによる避難困難者人口及び世帯数の予測（2021年8月5日）

GISで降灰堆積深が10cmの等高線（線情報）を作成する。次にこの等高線をポリゴン（面情報）に変換すると、堆積深が10cm以上となるエリアと共通する範囲の500mメッシュ人口を切り出すことができる。切り出したメッシュ人口の属性から必要な項目（図7の tPop, Pop65, tHouse, House

65, House65_1）を集計して、被災総人口・高齢者人口、総世帯数・高齢者世帯数及び高齢者独居世帯数を予測できる。人口や世帯数の推計には500mメッシュ人口（2015年国勢調査）データを利用した。このデータは、e-Stat（統計で見る日本：<https://www.e-stat.go.jp/>）で公開されて



図8 主要な交差点を対象にした道路交通阻害の予測（2021年8月5日、噴火から4時間後）



図9 噴火から48時間後の降灰堆積状況の可視化例（2021年8月5日に噴火想定）

いる。同様な方法で、1時間毎の降灰計算結果を利用し、主要な交差点でどのように交通障害が発生するかを可視化した例が図8（噴火から4時間後）である。降灰堆積深が5cmで車は時速10km/h走行、降灰堆積深が2cmで20km/h走行¹⁾としている。鹿児島市街地北部では、噴火から4時間後には通行不可となる道路（交差点）が発生するため、大規模噴火後の車による避難は実質的に困難であることが想像できる。交差点の位置情報はOpenStreetMapの道路情報を利用した（© OpenStreetMap contributors, <https://www.openstreetmap.org/copyright>。）

5. 降灰リアルタイムハザードマップ

火山噴火そのものの予測は困難である。しかし、数日後に大規模噴火を想定した待ち受け計算は可能である。そこで、大正噴火級の大規模噴火を2日後（48時間後）及び1.5日後（36時間後）に想定し、噴火から18時間先の降灰堆積深を、6時間毎に更新しながら24時間連続稼働させる降灰リアルタイムハザードマップシステムを紹介する。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。リアルタイムというと大規模

噴火と同時に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るという意味でリアルタイムとしている。

風向風速は、気象庁数値予報モデルGPV(GSM日本域)を利用する。この数値予報モデルは、水平方向の格子間隔が20km（指定気圧面）で、少なくとも5.5日先までの予測値を6時間更新で入手できる。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、現時刻から意思決定に関わるプロセスを含み6時間以内に情報提供が可能となる運用を想定した。そのため降灰計算では、水平方向の計算格子間隔が桜島周辺で700m、計算領域端付近が1400mとなる不等間隔格子を採用した。高さ方向は1000m間隔とした。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と、降灰リアルタイムハザードマップのモデル諸元の比較を表1に示した。

降灰リスク予測情報として、堆積深が10cm以上となる避難困難エリア内の人口及び世帯数、65歳以上の高齢者人口及び高齢者の一人世帯数・二人世帯数のほか、通行できない区間がある道路を抽出した。また、堆積深が30cm以上のエリア内を流下する河川を、一時的に治水安全度が低下す

表1 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モデル	降灰リアルタイムハザードマップモデル
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まで	20kmまで
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

る河川として抽出した。これらの結果を表示するWeb閲覧サイトを開設し、2021年7月～2022年2月まで試験的な運用を行なった。システムの有効性を評価する目的で、鹿児島県及び関係市町村の防災担当者には期限を限定して公開したが、気象業務法により制限があるので、一般公開は行っ

ていない。降灰リアルタイムシミュレーションの概要を図10に、降灰リアルタイムハザードマップシステム概要を図11に、また図12には、降灰リアルタイムハザードマップのイメージをそれぞれ示した。

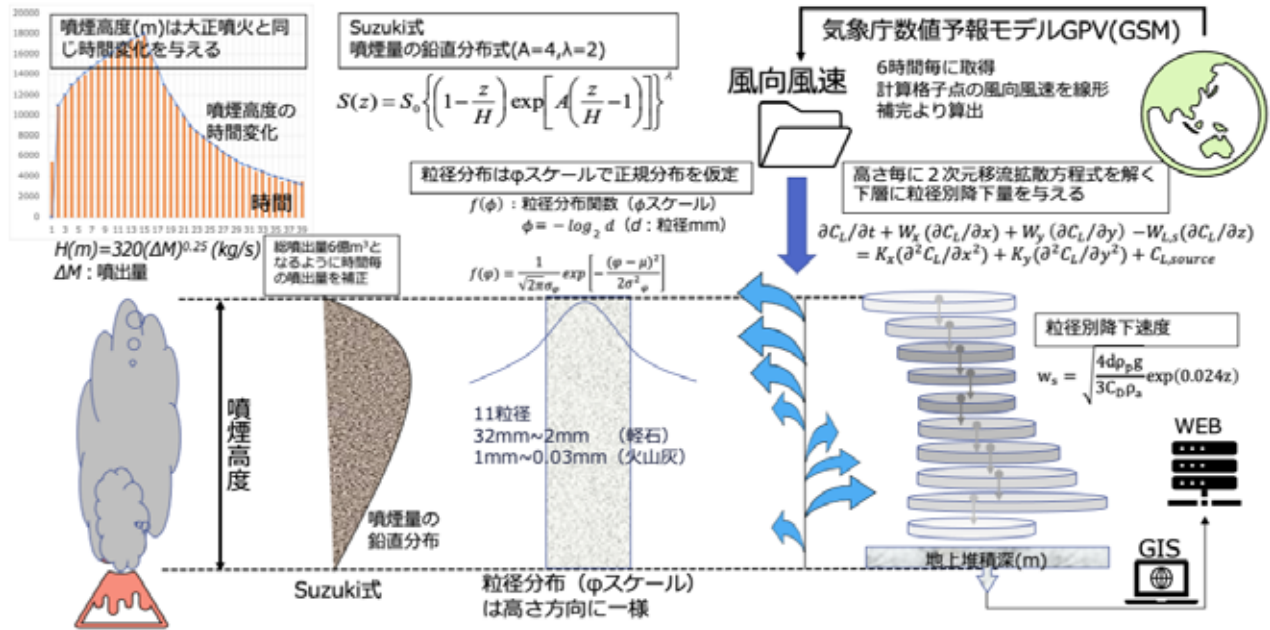


図10 降灰リアルタイムシミュレーションの概要

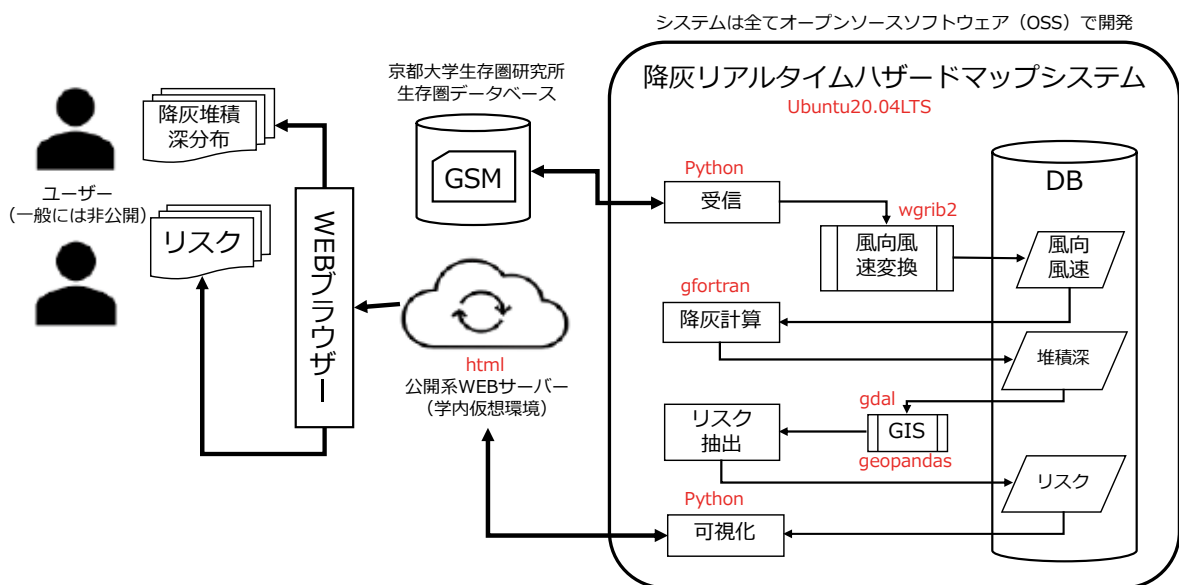


図11 降灰リアルタイムハザードマップシステム概要



図12 降灰リアルタイムハザードマップ

6. おわりに

本報で紹介した降灰リアルタイムハザードマップシステムの開発言語は、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は、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。本システムは、どの火山にも応用できる。このようなシステムの継続的な運用・維持管理を担う主体はどのような組織が望ましいのか、という運用面での課題が残されている。本システム試験的運用期間の GPV(GSM 日本域)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>）。ここに記して謝意を表す。

【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) (中央防災会議) 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書：1914桜島噴火報告書、内閣府
- 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 40 特別号 175-

- 189,2021.
- 4) Suzuki, T.: A Theoretical Model for Dispersion of Tephra, *Volcanism; Physics and Tectonics*, edited by D. Shimozuru and I. Yokoyama, pp.95-113, 1983.
 - 5) 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.
 - 6) 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.
 - 7) 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.
 - 8) 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.
 - 9) 国土地理院 (<https://www.gsi.go.jp/GIS/whatisgis.html>)