

# 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

浅野 敏之<sup>1</sup>・高橋 忍<sup>1</sup>・甲斐 信治<sup>2</sup>

## Assessment of Work Period Necessary for Removal of Fallen Pumice from Navigation Areas for Continuity of Port Business Following a Large-Scale Volcanic Disaster

Toshiyuki ASANO<sup>1</sup>, Shinobu TAKAHASHI<sup>1</sup> and Shinji KAI<sup>2</sup>

### Abstract

For most major ports in Japan, a business continuity plan (Port-BCP) has been developed to cope with potential functional disorder in port operations caused by natural disasters. The objectives of a Port-BCP are to maintain the minimum vital activities, such as transportation of emergency supplies, and to enable resumption of normal operations within a reasonable period. Existing Port-BCP plans, however, focus only on earthquake and/or tsunami disasters and do not consider volcanic events. This study assessed the impact of predicted pumice fall on Kagoshima Port (Japan) following a supposed large-scale eruption by the adjacent Sakurajima volcano. Numerical simulations were conducted with varying conditions of wind velocity and direction to estimate the volume and mass of pumice deposited in Kagoshima Bay. Based on the results, estimations were performed regarding the work period required to remove the deposited pumice from the navigation areas.

キーワード：火山災害，港湾事業継続計画，堆積軽石量，航路啓開

Key words: volcanic disaster, port business continuity plan, deposited pumice amount, re-opening work of navigation channel

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景と目的

港湾は、わが国の総貿易量を重量ベースで99.7%、金額ベースで74.1%を担うとともに、災

害時には緊急物資の輸送を確保する極めて重要なインフラストラクチャーである。阪神・淡路大震災では神戸港が大きな被害を受け、港湾機能停止の間に国際トランシップ貨物などが釜山港などに

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 国土交通省九州地方整備局鹿児島港湾空港整備事務所  
Kagoshima Port & Airport Development Office, Kyushu  
Regional Development Bureau, MLIT

シフトし、国際港としての地位が凋落した。このことが、災害時・災害後の港湾の事業継続計画（港湾BCP）策定の必要性が認識される端緒となった<sup>1)</sup>。東日本大震災においても、東北太平洋岸から東関東に至る多くの港湾が多なる被害を受けたが、岸壁やクレーンなどの被災だけに留まらず、瓦礫による航路泊地の埋没や船舶の航行障害が生じ、港湾物流機能が停止した。東日本大震災後に制定された国土強靱化基本法に基づくアクションプランとして、港湾が災害により機能不全を生じても緊急物資等の最低限の輸送を確保し、許容される期間内に重要な港湾機能を逐次再開させるための港湾BCPが、重要港湾を中心として策定されるようになった<sup>1)</sup>。しかし、ほとんどの港湾BCPが自然外力として地震・津波を対象としており、火山噴火災害について本格的に検討された例は著者の知る限り無い。

一方、都市機能が高度に集積した広域首都圏において、富士山の大規模噴火による火山灰降灰が国民生活や社会経済活動に与える影響が懸念されている。その予測と対策を調査する目的で、2018年に「大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ」が内閣府中央防災会議の防災対策実行会議の下に組織され、検討が開始されている<sup>2)</sup>。しかし、富士山は宝永噴火以来、噴火活動を行っていないため、大規模降灰の被害形態や災害事象を実態として把握できず、具体例の検討の多くを桜島の噴火による鹿児島県の被害例に依拠している。

鹿児島港は、南北約20 kmの港湾区域を有し、桜島への航路や種子島、屋久島、三島、十島、奄美等への離島航路の発着場になっている。内航の乗客乗降人員数は全国2位の港湾であり<sup>3)</sup>、この地域の物流や離島航路の中心であるが、桜島噴火口から約10 km隔てているに過ぎない。桜島は、1779-1781年（安永噴火）、1914年（大正噴火）に大規模噴火を起こしており、その発生間隔から想定すると、今後30年以内の桜島の大規模噴火発生が懸念されている。大規模火山噴火を対象とした事業継続計画（港湾BCP）においては、大量の噴火火砕物によりどのような港湾機能の不全が生じ

るのか、発生後いかにして物流機能を維持確保するのか、を予め解決しておくことが重要な課題となる。

以上の背景から、本研究は、将来想定される桜島大規模噴火災害時に港湾機能を維持し事業継続を図るため、鹿児島湾海域に降下する火砕物の堆積量と質量換算値を評価し、航路啓開のための揚取量を試算することによって、火山災害時の港湾BCP策定に資する知見を得る目的で実施したものである。

## 1.2 既往研究の状況

アメリカ地質調査所（USGS）<sup>4)</sup>は、火山噴火の降下火砕物による船舶航行への影響として、視程の阻害、海面に浮遊する火山灰や軽石による冷却水の取り入れ口の目詰まり、火山灰や破砕物による船体・機械部の摩耗などを挙げている。またWilsonら<sup>5)</sup>は、チリChaiten火山の噴火調査から、浮遊軽石群による船舶の冷却水取り入れ口の閉塞と、機械のオーバーヒートの発生を報告している。

国交省九州地方整備局・鹿児島港湾空港事務所・日本港湾協会<sup>6,7)</sup>が実施した調査（以下、国交省九地整報告書と呼ぶ）によれば、大型船の場合、外洋航海中は船底にある海水吸入口を、沿岸部では船側高位にある吸入口を使用すれば、水面付近を浮遊する軽石の影響を受けにくいとしている。総トン数20トン以下の小型船については、日本小型船舶工業会が海水吸入口配置について浮遊物を吸い込まないための指針を示している。桜島航路・奄美などへの離島航路のフェリーは総トン数1000トンを超える大型船であるが、報告書では、小型船はもちろん大型船も海面浮遊物の吸引が船舶航行を阻害する恐れはゼロではないとし、大量の軽石が降下したときの避難誘導支援、支援物資輸送、広域後方支援を行うための航路啓開の方法と作業量予測を中心に考察している。

一方、浅野ら<sup>8)</sup>は、桜島大正噴火規模の噴火条件を与え、噴煙柱の解析と風による移流・拡散・沈降の解析を行うとともに、鹿児島湾内の潮流計算を実施し、軽石群の潮流による漂流機構をラグランジェ的なトレーサー追跡によって考察してい

る。

本研究は、この研究によって得られた鹿児島湾内の降下軽石量の算定手法に基づき、大規模噴火災害発災後の航路啓開に必要な揚収量と啓開作業期間の試算を行ったものである。

## 2. 噴煙柱火砕物の移流拡散解析

### 2.1 数値解析の概要

火砕物輸送の数値モデルは精粗さまざまなモデルが提案されているが、浅野ら<sup>8)</sup>は Pfeiffer et al.<sup>9)</sup>による HAZMAP モデルを用いて解析した。このモデルは、Tephra2<sup>10)</sup>等とともに2次元モデルに分類されるもので、噴火の規模と風の場を与えたときに、鉛直方向の線源として与えられた噴煙柱内の火砕物がどのように流送され、陸・海上に降下・堆積するかを計算するものである。移流拡散沈降解析は、さまざまな流体力学の分野で実施されているが、噴煙柱内には火山灰から軽石までさまざまな粒径粒子が分布すること、降下速度  $w_s$  が空気密度・空気粘性係数等の関数となること等が本解析では焦点となる。本研究は、この数値解析で得られた鹿児島湾内に降下する軽石を中心とする火砕物の総質量に対して、揚収作業に必要な船隻や必要日数について議論するのが目的であり、ここでは以下に数値解析の概略のみを説明する。

火山噴煙柱内の粒子の粒径分布を、次式の正規分布で与える。

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

ここで、 $\Phi$ は粒径  $d$  (mm) から  $\Phi = -\log_2 d$  で換算されるスケール、 $\mu$  はその中央値、 $\sigma_\Phi$  は標準偏差である。ここでは標準的な値  $\sigma_\Phi = 2, \mu = -1$  (中央粒径  $d = 2$  mm) を与えた。火砕物粒子の密度  $\rho_p$

( $\text{kg/m}^3$ ) は、粒径が大きいと軽石状となり密度が低下することを考慮し次式で与えた。

$$\rho_p = 700: \Phi < -1$$

$$\rho_p = 700 + (\Phi + 1) \times \left(\frac{1400}{6}\right): -1 < \Phi < 5 \quad (2)$$

表1に、 $\Phi$ スケールに対応する火山噴煙柱内構成粒子の粒径、式(1)の粒径分布から計算される累積粒径分布  $F(\Phi)$ 、式(2)による粒子密度  $\rho_p$  を示す。

降下速度  $w_s$  については、Wilson-Huang<sup>11)</sup>の研究に基づき、高度  $z$  とともに変化する空気密度と粘性係数、火砕物の粒径・密度・形状係数の関数となる Reynolds 数や抗力係数を考慮して決定した。図1は、降下速度  $w_s$  を火砕物の粒径と高度をパラメーターとして示したものである。

噴煙柱鉛直方向の質量分布は、次式の Suzuki<sup>12)</sup> モデルで与えた。

$$S(z) = S_0 \left\{ \left[ 1 - \frac{z}{H} \right] \exp \left[ A \left( \frac{z}{H} - 1 \right) \right] \right\}^\lambda \quad (3)$$

ここに、 $S_0$ :規格化噴出物質量、 $H$ :噴煙柱高度、 $A, \lambda$ :鈴木係数で、本研究では標準値  $A = 4, \lambda = 2$  を採用した。移流の外力となる風は、上空の風の

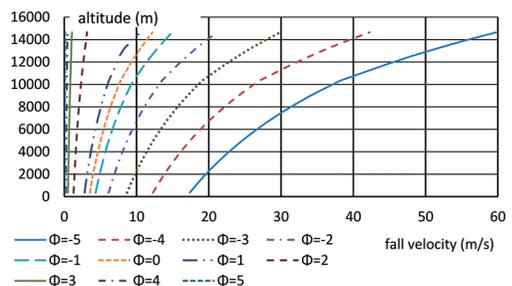


図1 火砕物降下速度の高度ならびに粒径による変化

表1 火砕物の粒径ごとの密度と累積分布関数

$\Phi$	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5
$d$ (mm)	0.0320	0.0625	0.1250	0.25	0.50	1.0	2.0	4.0	8.0	16.0	32.0
$\rho_p$ ( $\text{kg/m}^3$ )	2100	1867	1633	1400	1167	933	700	700	700	700	700
$F(\Phi)$	0.0013	0.0062	0.0228	0.0670	0.1588	0.3087	0.5000	0.6913	0.8412	0.9330	0.9771

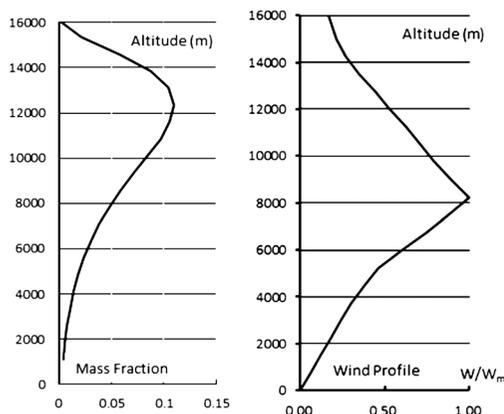


図2 噴煙柱内火砕物質量と風速の鉛直分布

鉛直分布を代表する形で与えた。本計算で仮定した噴出物質量と風速の鉛直分布を図2に示す。

## 2.2 計算条件

計算領域は、鹿児島湾全域を含む東経130.4～130.9°、北緯31.1～31.8°とし、水平  $x$ 、 $y$  方向をそれぞれ45、72、鉛直  $z$  方向を21で格子分割した ( $\Delta x = \Delta y = 1250$  m,  $\Delta z = 714$  m)。粒子径階級  $L$  は、 $\Phi = -5 \sim 5$  を11分割した。火砕物の降下速度  $w_s$  は大粒径で高度が高い地点で最大約60 m/s となることから、クラン条件より時間刻みを  $\Delta t = 6$  s とした。拡散係数  $K_x$ 、 $K_y$  は3000 m<sup>2</sup>/s とした。

噴火条件については桜島大正噴火と同規模で与えた。Todde et al.<sup>13)</sup> は桜島や大隅半島各地でこのイベントで堆積した火砕物を調査し、総噴出体積  $V_{total} = 0.33$  km<sup>3</sup> を推定した。山科<sup>14)</sup> はさまざまな角度の考察から、大正噴火時の噴煙柱高度として  $H = 15000$  m を提唱したが、その噴煙高度と噴出物量の関係から推論すると、噴出軽石の体積は約0.4 km<sup>3</sup> となる。田村ら<sup>15)</sup> は、大正噴火の噴出物総量を2.1 km<sup>3</sup>、このうち溶岩流出量が1.56 km<sup>3</sup>、軽石・火山灰が0.62 km<sup>3</sup> とした。国交省九地整報告書では、京都大学防災研桜島観測所の井口教授にヒアリングを行い、その結果から大正噴火時の総噴出体積は  $V_{total} = 0.5$  km<sup>3</sup> とし、すべて粒径1 cm以上の軽石とした。このように大正噴火における軽石体積の推算結果は研究者によりさまざまであ

る。質量で評価する場合には、軽石から火山灰の細粒部まで密度が700～2500 kg/m<sup>3</sup> に変動することから、火砕物の粒度組成をどう評価するかによって異なってくる。

本研究では、これらの研究を考慮し総噴出体積  $V_{total}$  を0.42 km<sup>3</sup> とした。粒径分布は(3)式で  $\sigma_p = 2$ 、 $\mu = -1$  とし密度の大きな火山灰成分で多く構成する形で与えた。噴煙柱高度は Biass et al.<sup>16)</sup> や山科<sup>14)</sup> と同じく  $H = 15$  km とした。風速の鉛直分布は既往の研究を考慮し、その最大値を10 m/s と20 m/s の2通りとし、最大となる高さは地上8000 m とした。桜島上空の風向きは、冬季は偏西風の影響を強く受けるが、夏季は偏西風が弱まるとともに、下部成層圏は東風が変わり、気圧配置や前線等の影響を受ける。鹿児島港に火砕物が多く落下するのはE(東からの風)を中心とする風向きであるが、45°ごと全8方位の計算を行った。噴火開始から噴火終了(24時間後とした)までの高度  $z = 0$  におけるすべての粒径階級  $L$  を総和した海面及び陸上への降下火砕物総堆積厚を最終的なアウトプットとした。

## 2.3 降下火砕物の堆積厚の計算結果

図3は、粒径  $d > 8$  mm と  $d < 8$  mm で軽石成分と火山灰成分を分けたときの、火砕物堆積厚さの空間分布を示したものである。図3(a)と(b)は、SEからの風向(北西に向かう風)で、それぞれ、鉛直方向の最大風速が10 m/s と20 m/s の場合、図3(c)、(d)はNからの風向き(南に向かう風)で、最大風速が10 m/s と20 m/s の場合の結果である。

本計算では北緯31.1°～31.8°、東経130.4°～130.9°を解析領域としたため、風により移流拡散する降下火砕物の一部が解析領域外に出て行くことになる。また、軽石成分は降下速度が大きいため、火山灰成分と比較すると堆積量が大きな範囲は火口近くの狭い領域に留まることがわかる。最大風速が10 m/s から20 m/s に増加すると、移流が拡散より卓越するために、堆積量の分布の幅が狭くなることを見いだされる。また、鹿児島湾は南北約60 km あるが、桜島は北1/4に位置するた

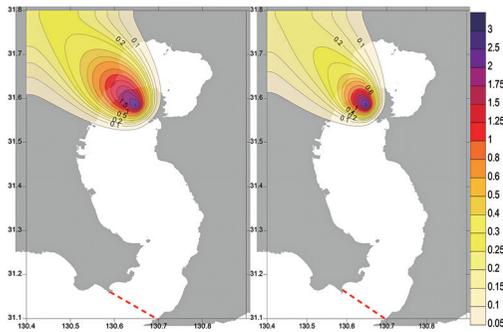


図3 (a) 降下火山灰(左)と降下軽石(右)の堆積量(単位:m)  
風速  $W_{max} = 10$  m/s, 風向: SE

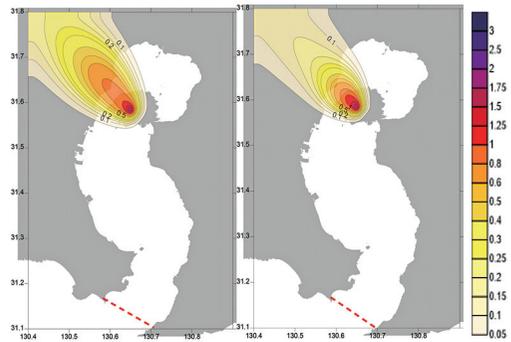


図3 (b) 降下火山灰(左)と降下軽石(右)の堆積量(単位:m)  
風速  $W_{max} = 20$  m/s, 風向: SE

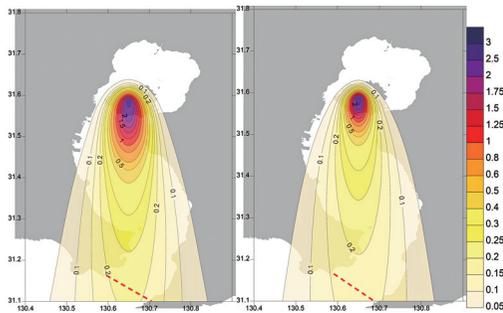


図3 (c) 降下火山灰(左)と降下軽石(右)の堆積量(単位:m)  
風速  $W_{max} = 10$  m/s, 風向: N

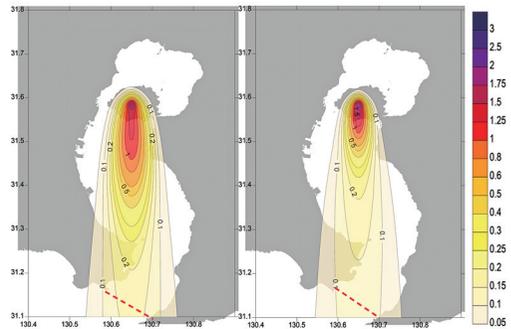


図3 (d) 降下火山灰(左)と降下軽石(右)の堆積量(単位:m)  
風速  $W_{max} = 20$  m/s, 風向: N

め、鹿児島湾に降下する降下火砕物は地形的にNからの風の場合に多くなることがわかる。

### 3. 火砕物の鹿児島湾内への降下量・堆積量の計算

大規模火山噴火発生後の事業継続計画にあたっては、鹿児島港の航路啓開に必要な作業船量、作業復旧時間、仮置き場等の見積もりが求められる。この評価には鹿児島湾内に降下する軽石量の定量的把握が必要となる。そこで45°間隔で8方位を与え、鉛直方向最大風速として10 m/sと20 m/sの2とおりに変えた計算を実施した。結果は降下火砕物量を海と陸とで区別し、質量ベースで整理した。図3に示した計算領域を超える火砕物につ

いてはカウントされない。また図3に破線で表示するように、薩摩半島長崎鼻 (E130.59°, N31.15°) と大隅半島佐多伊座敷 (E130.70°, N31.10°) を結ぶ線より南西側は鹿児島湾外とし、この領域に降下したものは海への降下火砕物から除外した。

結果は、火山灰成分と軽石成分を総和した降下火砕物総質量と、軽石成分のみを取りだした軽石質量に分けて表示する。図4にそのレーダーダイアグラムを、数値を表2にまとめた。図4では風向を噴煙柱が流される方向に表示している。まず海上への降下量について考察する。降下火砕物総質量が最も大きくなるのは、北からの風N(=南に向かう風; 堆積方位角180°)の風速が10 m/sの場合である。その理由はこの方向に鹿児島湾が最

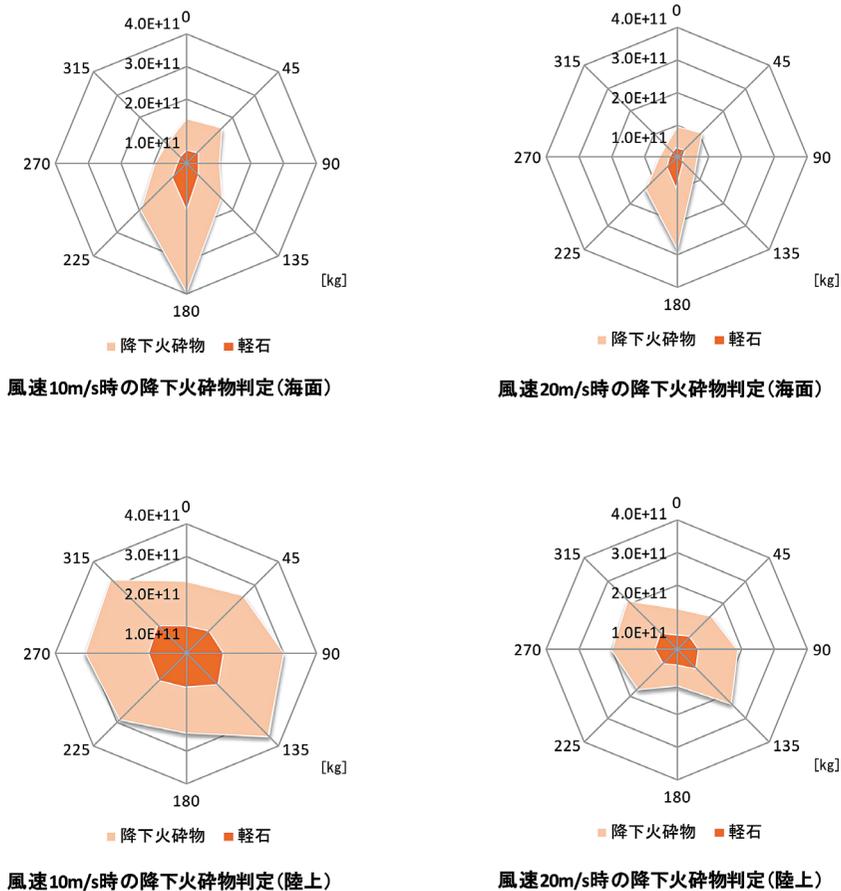


図4 海面と陸上に降下する火砕物と軽石の質量の風向別結果

も拡がっているからである。軽石についても最大値をとる風向は同じである。SE～S～SWからの風は噴煙が北側に流され、鹿児島湾の桜島北部海域に降下する結果となる。降下火砕物量・軽石量はNからの風に比べて小さくなる。桜島より北向きの風では海域が狭くなるのが原因であるが、この領域に降下した火砕物は、狭い西桜島水道を介してのみ南部に流出入するので、量的な把握をしておくことはBCP立案上で重要である。

次に陸上への堆積量について考察する。本計算は、北緯31.1°～31.8°、東経130.4°～130.9°を解析領域としており、ここで示した量はあくまでもこの領域に堆積する結果で、領域設定に依存する。例えば南からの風向では噴煙は北部の霧島方面に

移流されるが、この方向には特に領域が制限されている。そのことより、図4の陸上への堆積量の方角特性が鈍くなっている。いったん、陸上に堆積した軽石群は、降雨により時間とともにゆっくりと河川を通じて海域に流入したり、土石流等で流入することが想定される。この過程を考える上では、海から分水嶺までの領域にわたって軽石降下量を積分し、海洋に流入する軽石の潜在的総量を算定する方が精度が高く、今後の課題となろう。

次に風速を10 m/sから20 m/sに増加させた場合の計算結果を検討すると、海上・陸上を問わず、降下火砕物総質量・軽石量ともに減少することがわかる。これは風による移流が卓越し、かなりの部分が計算領域外に輸送されるためである。

表2 海上と陸上に降下する火砕物・軽石質量の風向別結果

■風速10 m/s 時の降下火砕物判定 (海上)

堆積方位角 (deg)	風向	降下火砕物 (kg)	軽石 (kg)
0	S	1.40E+11	4.22E+10
45	SW	1.55E+11	4.72E+10
90	W	9.93E+10	3.07E+10
135	NW	1.47E+11	5.18E+10
180	N	3.94E+11	1.42E+11
225	NE	2.01E+11	6.50E+10
270	E	9.62E+10	2.96E+10
315	SE	8.70E+10	2.68E+10

■風速20 m/s 時の降下火砕物判定 (海上)

堆積方位角 (deg)	風向	降下火砕物 (kg)	軽石 (kg)
0	S	9.72E+10	3.14E+10
45	SW	1.08E+11	3.27E+10
90	W	6.27E+10	1.91E+10
135	NW	7.59E+10	2.66E+10
180	N	2.81E+11	9.30E+10
225	NE	1.38E+11	4.44E+10
270	E	5.55E+10	1.95E+10
315	SE	4.86E+10	1.83E+10

■風速10 m/s 時の降下火砕物判定 (陸上)

堆積方位角 (deg)	風向	降下火砕物 (kg)	軽石 (kg)
0	S	2.22E+11	8.73E+10
45	SW	2.50E+11	9.96E+10
90	W	2.97E+11	1.13E+11
135	NW	3.58E+11	1.37E+11
180	N	2.42E+11	1.02E+11
225	NE	2.85E+11	1.15E+11
270	E	3.08E+11	1.16E+11
315	SE	3.23E+11	1.22E+11

■風速20 m/s 時の降下火砕物判定 (陸上)

堆積方位角 (deg)	風向	降下火砕物 (kg)	軽石 (kg)
0	S	1.27E+11	4.54E+10
45	SW	1.47E+11	5.43E+10
90	W	1.83E+11	6.46E+10
135	NW	2.32E+11	8.09E+10
180	N	1.09E+11	4.64E+10
225	NE	1.70E+11	6.16E+10
270	E	2.02E+11	6.77E+10
315	SE	2.16E+11	7.13E+10

火砕物の総堆積量に占める軽石堆積量の比率は、質量ベースで30~43%である。特にN系の風では40%を超える結果となっている。表1に示したように軽石の密度は火山灰密度の1/2程度であるため、体積ベースにおける軽石の占有率はこれより大きくなる。火山灰は比重が重く海面に降下後、数日ですべて海底に沈降するので、以下では軽石について考察を行うことにする。

堆積量が最大となった風速10 m/s、風向Nのケースと、同じ風速で風向Sのケースについて計算結果の定量的な考察を行う。Nからの風(方位角180°)の時の軽石の総質量は $1.42 \times 10^{11} \text{ kg} = 1.42 \times 10^8 \text{ ton}$ で、軽石の密度を $700 \text{ kg/m}^3$ とすると体積は $2.03 \times 10^8 \text{ m}^3 = 0.203 \text{ km}^3$ となる。降下火砕物総質量から軽石質量を差し引いた火山灰総質量は $2.51 \times 10^{11} \text{ kg} = 2.51 \times 10^8 \text{ ton}$ で、火山灰の密度を $1500 \text{ kg/m}^3$ とすると、 $1.67 \times 10^8 \text{ m}^3 = 0.167 \text{ km}^3$ となる。軽石の火山灰に対する比は、質量では57%、体積では122%となる。Sからの風(方位角0°)では、軽石の総質量は $4.22 \times 10^{10} \text{ kg} = 4.22 \times 10^7 \text{ ton}$ (体積 $6.03 \times 10^7 \text{ m}^3 = 0.060 \text{ km}^3$ )でNか

らの風の結果の30%の小さい値となる。これは軽石が流送され降下する範囲が鹿児島湾の桜島以北の狭い海域に限られるからである。

#### 4. 港湾機能維持のための火山噴出物への対応

ここでは、前節で得られた大規模火山噴火時の海上に降下する軽石総質量に対する航路啓開等の対応について検討する。港湾BCPに関わる災害時の航路啓開作業量の検討は、東日本大震災時の津波瓦礫に対する研究<sup>17)</sup>等があるものの、火山噴火による降下火砕物に対する研究は著者の知る限り見当たらない。シミュレーション結果から海上の軽石質量は極めて大量であり、揚収作業は短期間には困難な状況が容易に想定される。以下では港湾機能の回復のための対策を短期的な対策と中長期的な対策に分けて考察する。

大規模噴火の発災時から数日間は、火山噴火の被害を直接受ける住民(特に桜島の住民)の海上からの避難援助、緊急物資の輸送が重要となり、緊急的な航路啓開を図る必要がある。桜島大正噴

火では約1日半にわたる大噴火後も、噴火活動は断続的に継続し終息まで1年数ヶ月を要した。その間の物資・人員の輸送が必要となり、港湾機能・航路の確保を行わなくてはならない。ここでは短期的な啓開対策として、鹿児島港・桜島港・垂水港の港湾区域、ならびに桜島・大隅半島側と鹿児島市を結ぶ桜島航路・垂水航路、鹿児島市と種子島・屋久島・奄美大島を結ぶ離島航路の啓開を対象とする。航路啓開の航路幅については、基準では船舶の行き違いを想定する航路においては船長 $L$ の1倍以上の適切な幅とされているが<sup>18)</sup>、ここでは国交省九地整報告書と同じ $2L$ で算出した。例えば、離島航路の最大船長は約145 mであるから、航路啓開幅は290 mとなる。

表3は、港湾区域と航路に降下した軽石の堆積量を本数値解析に基づいて計算し、軽石群の揚取対象量と揚取に要する作業日数を示したものである。この区域に降下する軽石量が最大となるのは風向E(西向きの風)で風速10 m/sの場合であり、表中の軽石堆積量はその条件下の値である。ただし、離島航路については桜島の南方に位置するため、風向N(南向きの風)、風速10 m/sの条件下の計算結果を用いている。揚取作業日数の算定に

あたっては、国交省九地整報告書の調査に基づき調達可能な作業船量を50隻/日とし、1日あたりの作業時間を8時間または12時間、年間稼働日数250日とした。揚取量原単位は、河田ら<sup>19)</sup>が津波により破壊された木造家屋の海面流出瓦礫に対する除去能力の提案値の重量換算値20.65トン/(時間・隻)<sup>17)</sup>を採用した。したがって作業船50隻を用い、1日あたり作業時間8時間、12時間で揚取する軽石量は、それぞれ8260トン、12390トンとなる。表3に示すように港湾区域内の軽石を揚取するのに必要な日数は92~137日と試算された。また桜島航路・垂水航路の揚取には19~29日の結果を得た。離島航路は鹿児島港から湾口までと長く、航路啓開幅も広いので、203~305日の作業日数が得られた。国交省九地整報告書<sup>7)</sup>の同様な試算を行っているが、風向・風速に係わらずすべての海域で軽石が一律の値0.16ton/m<sup>2</sup>で堆積すると仮定しており、精度は本結果より低いと考えられる。なお、同報告書の全港湾区域の揚取作業日数は、本結果の1.40倍、離島航路の日数では0.82倍の値となっている。

表3に示した期間で港湾区域と航路の水面が啓開されれば、船舶の航行が可能となる。陸上の港

表3 港区・航路に降下した軽石の揚取量および揚取に要する日数(風向E, 風速10 m/sの条件で堆積量を算定, ただし離島航路については風向N, 風速10 m/sで算定)

対象港区	堆積量参照地点	啓開対象面積 (m <sup>2</sup> )	堆積量 (トン/m <sup>2</sup> )	揚取対象量 (トン)	作業日数 (8時間/日)	作業日数 (12時間/日)
鹿児島港	本港区	N31.592 E130.571	1,227,000	0.396	485,892	
	新港区	N31.582 E130.568	224,000	0.360	80,640	
	中央港区	N31.535 E130.549	1,232,000	0.169	208,208	
	谷山一区・二区	N31.480 E130.549	6,663,000	0.039	259,857	
	鴨池港区	N31.554 E130.562	149,000	0.224	33,376	
桜島港	N31.593 E130.598	91,000	0.719	65,429		
垂水港	N31.495 E130.697	331,000	0.002	662		
合計		9,917,000		1,134,064	137	92
対象航路	航路延長 (m) × 航路幅 (m)	啓開対象面積 (m <sup>2</sup> )	平均堆積量 (トン/m <sup>2</sup> )	揚取対象量 (トン)	作業日数 (8時間/日)	作業日数 (12時間/日)
桜島航路	2,400 × 120	288,000	0.484	139,392		
垂水航路	14,100 × 160	2,256,000	0.043	97,008		
合計		2,544,000		236,400	29	19
対象航路	航路延長 (m) × 航路幅 (m)	啓開対象面積 (m <sup>2</sup> )	平均堆積量 (トン/m <sup>2</sup> )	揚取対象量 (トン)	作業日数 (8時間/日)	作業日数 (12時間/日)
離島航路	44,300 × 290	12,847,000	0.196	2,518,012	305	203

湾道路や施設に堆積する火砕物の除去は海上の除去より容易であるので、この時点で主要な港湾業務は再開可能と考える。湾内全域に広がる浮遊軽石群は、啓開完了区域に流入してこない限り港湾業務に大きな支障はなく、また流入しても港湾等の啓開作業拠点はすでに確保されているので、除去作業に十分対応できる。

しかし、軽石群は、潮流や風により漂流拡散し面的に広がることを考えると、中長期的には鹿児島湾の全域に広がる軽石の除去作業についても考察する必要がある。敷設の簡便なオイルフェンスやカーテン丈の長いシルトプロテクターを用いて航路などの揚収エリアを遮断し、軽石群の流入を防ぐのも一つの方策であるが、長期的な遮蔽には限界がある。ここでは、噴火災害後の中長期にわたる復旧・復興に関わる事業継続計画を策定する上での概略値を得るため、潮流や吹送流などを考慮せず、海面上に堆積した軽石群の除去作業に要する日数を試算することにした。

表4は、風速10 m/sで風向S(北向きの風)と風向N(南向きの風)に対して得られた、それぞれ $4.22 \times 10^{10}$  kg、 $1.42 \times 10^{11}$  kgの2つの降下軽石総質量に対する、揚収作業に必要な所要期間を示したものである。表に示すように1年間の揚収作業を実施しても、風向S、風向Nでそれぞれ5%、2%程度しか軽石を除去できず、火山噴火直後に海面上に降下する軽石総量をすべて揚収するには、20年~50年の長期間を要する試算結果が得られた。

しかし、下記の物理機構により、揚収対象となる軽石総量は計算結果の数分の1程度に低減することが考えられ、それによって揚収作業期間も短縮されることが予想される。この短縮機構が現時

点でどの程度、解明されているのか、今後どのような課題の検討が必要であるかを以下に考察する。

(1) 湾内の潮流や風の流送による総量の減少

火山噴火で鹿児島湾内に降下した軽石群は、図5の模式図に示すように、潮流により流送され、その一部は湾口から流出し、時間とともに湾内の軽石群の総量が時間とともに漸減するであろう。潮流の数値シミュレーション技術は、さまざまなモデルが提案され確立された段階にある。風向・風速など風の状況は一律ではなく、その影響は簡単に取り扱えないが、台風などによる強風時には、海面上の軽石群の多くが陸上に打ち上げられる。この総量は、イベント期間における風向・風速を仮定して流体力学モデルで推算可能である。台風や洪水時に発生する海岸近くに打ち上げられた流木群の撤去作業では、流木群をオイルフェンスなどで囲い込み、作業の容易な海岸近くに曳航して作業の効率化を行っている。これから推察できるように、陸上に打ち上げられた軽石群の回収作業は海面上のものをクレーン付き台船などで回収するより容易であり、揚収作業期間の短縮に繋がると思われる。一方では、風による軽石群の吹き

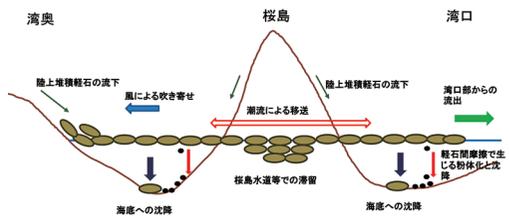


図5 鹿児島湾に降下した軽石群の物質収支の模式図

表4 鹿児島湾に降下した軽石の揚収量及び揚収に要する日数

項目 風向	軽石の海上 落下総質量	揚収量 原単位 (トン/h・隻)	作業時間 (h/日)		作業船隻数 (隻/日)	1年間の揚収量
			平均	最大		
S: 北向きの場合	$4.22 \times 10^7$ トン	20.65	8	12	50	206.5~309.8万トン ⇒海上落下総質量の4.8~7.3%
N: 南向きの場合	$1.42 \times 10^8$ トン	20.65	8	12	50	206.5~309.8万トン ⇒海上落下総質量の1.5~2.2%

寄せは、桜島水道や港口の狭隘部で滞留や閉塞の問題を引き起こすことも想定される。また、陸域に堆積したものが降雨作用で海域に流れ込むことも想定でき、こうした物質収支に係わる物理機構については今後の検討が必要である。

### (2) 軽石間摩擦で生じる粉体化・沈降による総量の減少

軽石は摩擦に弱く漂流中に擦れ合って表面から削り取られていく。粉碎された部分は比重約2.5のガラス体であるから、直ちに海底に沈降し、浮遊軽石群の総量の減少に帰することになる。軽石の気泡の大きさやみかけ密度は、マグマの化学組成や噴火の形成過程により変化し<sup>20)</sup>、軽石の摩擦粉碎特性に影響する。摩擦による粉体化をマグマ化学組成や噴火形態を考慮して定量的に説明する事は、今後の検討課題と言える。

### (3) 軽石の吸水による沈下による総量の減少

軽石は多孔性であるため、海底に水没するまでに相当長時間を要する<sup>21)</sup>。Whitham and Sparks<sup>22)</sup>は、さまざまな軽石サンプルを水中投入し、小胞内に水の浸入した軽石の重量測定実験を1年半にわたって継続した結果、有効密度が1を超え水没する時間はサンプルにより数時間、数日、数月、数年と異なることを明らかにした。14サンプルのうち5つは1年半後も沈むことはなかった。外挿によって推定された最長水没時間は30年のサンプルもあった。こうした相違は、軽石の寸法、初期密度、小胞の寸法分布、小胞間の結合状況によって生じるとした。一方、彼らは段階的な温度で加熱した軽石サンプルを没水させ、有効密度の測定実験も行った。その結果、150℃を超えると小胞内の空気が水で置換されはじめ、700℃では90%が水で置換されることがわかった。これは、熱せられた水が高熱の水蒸気となり小胞内に侵入し、空気を押し出す置換メカニズムがあるためで、噴火直後の状態にあたる高熱の軽石は直ちに水没すると結論している。ただし、現実の噴火において海面に降下する軽石のどの割合がこの高温条件を満たすのかは不明である。

## 5. まとめ

1) 火山噴火時の噴出物総量と噴火時の風向・風速を与え、海上に降下する軽石群の堆積量とその質量換算値を算定する数値解析結果を提示した。軽石群の降下総質量の計算結果に基づき、港湾区域と航路内に降下した軽石群の揚収対象量と揚収作業期間の試算結果を示した。港湾海面と航路海面の啓開完了により、基本的な港湾業務がほぼ再開できると考えられるので、この試算結果は、大規模火山噴火時の港湾BCP策定に資するものとする。

2) 中長期的対応として、鹿児島湾全域に拡がる降下軽石量の総質量に対する揚収作業期間についても試算を行った。その結果、1年間で総質量の2～7%程度しか揚収できない結果となった。ただし、陸上への打ち上げによる揚収作業の効率化、湾口からの流出、高温軽石の吸水機構や軽石間の摩擦による粉体化による沈下促進があり、実際に揚収対象となる軽石量は数分の1程度に減少すると考える。今後、この軽減量の定量的評価が課題となる。

3) 噴火災害の発生からタイムラインに沿って、港湾には避難誘導、航路点検、航路啓開、揚収物の仮置場確保、揚収物処分などの対応すべき課題がある。降下軽石群の潮流や風による漂流機構や物質収支を明らかにし、軽石群総量の時空間分布を把握した上での揚収作業と港湾機能復旧の計画立案が課題となろう。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C):(19K04952)「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」)の補助を得たことを付記し、謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 小野憲司編著：大規模災害時の港湾機能継続マネジメント，公益社団法人日本港湾協会，271p，2016。
- 2) 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, <https://www.bousai.go.jp/kazan/kouikikouhaiworking/index.html>, 2020年3月31日
- 3) 日本港湾協会: 数字で見る港湾2017, 259p, 2017.
  - 4) United States Geological Survey: [https://volcanoes.usgs.gov/volcanic\\_ash/transportation.html](https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/transportation.html), 2020年3月31日
  - 5) Wilson et. al.: Volcanic ash impacts on critical infrastructure, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol.45-46, pp.5-23, 2012.
  - 6) 国土交通省九州地方整備局・鹿児島港湾空港整備事務所・日本港湾協会: 平成28年度事務所管内活火山災害発生時に関する基礎的検討調査報告書, 163p, 2017.
  - 7) 国土交通省九州地方整備局・鹿児島港湾空港整備事務所・日本港湾協会: 平成27年度九州地域の沿岸部における活火山災害発生時に関する基礎的検討調査報告書, 189p, 2016.
  - 8) 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)*, 印刷中, 2020.
  - 9) 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.
  - 10) 萬年一剛: 降下火山灰シミュレーションコードTephra2の理論と現状 - 第四紀学での利用を視野に, *第四紀研究*, Vol.52, (4), pp.173-187, 2013.
  - 11) Wilson, L. and Huang, T.C.: The influence of shape on the atmospheric settling velocity of volcanic ash particles, *Earth Planet Sci. Lett.*, Vol.44, pp.311-324, 1979.
  - 12) Suzuki, T.: A theoretical model for dispersion of tephra, *Volcanism: Physics and Tectonics Arc*, Edited by Shimozuru, D and I. Yokoyama, pp.95-113, 1983.
  - 13) Todde A. et al.: The 1914 Taisho eruption of Sakurajima volcano: stratigraphy and dynamics of the largest explosive event in Japan during the twentieth century, *Bull. Volcanol.*, Vol.79, 2017.
  - 14) 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.
  - 15) 田村圭司・山越隆雄・松岡 暁・安養寺信夫: 火山噴火後に土石流が発生した事例, *土木研究資料*, Vol.52-3, pp.34-39, 2010.
  - 16) Biass et al.: Potential impacts of tephra fallout from a large-scale explosive eruption at Sakurajima volcano, Japan, *Bull. Volcanol.*, Vol.79, 2017.
  - 17) 富田孝史・若尾晃宏: 津波災害時の航路啓開計画における作業船量分析, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol.74, No.2, pp.379-384, 2018.
  - 18) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (平成30年改訂版), 2200p., 2108.
  - 19) 河田恵昭・小鯛航太・鈴木進吾: 東南海・南海地震発生時の港湾機能を活用した緊急輸送戦略, *海岸工学論文集*, 第54巻, pp.1326-1330, 2007.
  - 20) 加藤祐三: 軽石 - 海底火山からのメッセージ, 八坂書房, 264p., 2009.
  - 21) Bryan S.E. et al.: Pumice rafting and faunal dispersion during 2001-2002 in the Southwest Pacific, Record of a dacitic submarine explosive eruption from Tonga, *Earth and Planetary Science Letter*, Vol.227, pp.135-154, 2004.
  - 22) Whitham A.G. and R.S.J. Sparks, *Pumice*, *Bull. Volcanology*, Vol.48, pp.209-223., 1986.

(投稿受理: 令和2年3月27日  
訂正稿受理: 令和2年7月9日)

## 要 旨

港湾が災害により機能不全を生じて、緊急物資等の最低限の輸送を確保し、許容される期間内に重要な港湾機能を逐次再開させるための港湾 BCP が、重要港湾を中心として策定されている。しかし自然外力としては主に地震・津波を対象としており、火山噴火災害についての港湾 BCP はほとんど検討されていない。本研究は、将来想定される桜島大規模噴火災害時に、鹿児島湾域に降下する火砕物の堆積量と質量換算値を風向・風速を条件として定量的に評価し、発災後の航路啓開に必要な揚収量と啓開作業期間を試算することによって、火山災害時の港湾 BCP 策定に資する知見を得ることを目的としたものである。