

令和 4 年 5 月 17 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04952

研究課題名(和文)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

研究課題名(英文) Analysis of drifting pumice fallen in a water basin after a volcanic disaster to contribute drafting a port business continuity plan

研究代表者

浅野 敏之 (Asano, Toshiyuki)

鹿児島大学・地震火山地域防災センター・特任教授

研究者番号：40111918

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：大規模火山噴火時には大量の火砕物が周辺海域に降下し、航路や港湾の機能を麻痺させる恐れがある。噴火災害後に港湾機能を復旧するための作業量と作業期間を予め評価しておくことが防災対策上重要となる。本研究では、火山噴煙柱内火砕物の風による輸送・降下過程を記述する数値モデルを開発し、風向・風速を変化させたときの海上降下軽石量の空間分布の特性を明らかにした。さらに降下軽石の潮流による漂流過程を追跡する数値モデルを作成し、軽石の陸上漂着が集中する領域を提示した。揚収作業の対象となる海域内軽石総量の時間的変化には、沿岸への漂着や地形狭窄部での閉塞が関与すると考えられ、その力学機構について実験的な検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大規模火山噴火時に大量の火砕物が周辺海域に降下すると、航路障害や港湾の機能麻痺が生じる。その時どのような港湾機能の不全が生じるか、いかにして物流機能を復旧・維持するか、を予め解決する方策を定めた港湾事業継続計画(港湾BCP)が必要とされる。港湾は、災害後の業務再開に遅れると船主・荷主が近隣港に逃避し、国内的・国際的な地位が低下する。しかし既往の港湾BCPは外力として地震・津波を対象としており、火山噴火災害を本格的に検討した例は無い。桜島は世界でも有数の活火山であるが、鹿児島港はその噴火口からわずか約10km隔てた位置にある。当地の大学として本研究を行う学術的・社会的意義は大きいものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：When a large-scale volcanic eruption occur, huge amount of tephra will be fallen in surrounding marine areas, which can result in hindrance of navigation and port functions. As preparation for a volcanic disaster, assessments of workload required to remove floating pumice from the navigation and port areas are indispensable. This study develops a numerical model to describe transport processes of tephra, and analyzes spatial distributions of fallen pumice on the sea area under various wind conditions. Next, the surface drift of floating pumice under the influence of tidal motion is analyzed. The drift simulation reveals that landing is concentrated in certain restricted areas, where hindering against ship-based transportation and evacuation could occur. For the assessment of the removal operation, the temporal reduction of the total amount of floating pumice by landing and blockage at narrowed areas should be clarified. This study investigates these mechanisms by physical model tests.

研究分野：工学、自然災害科学

キーワード：火山噴火災害 港湾防災計画 事業継続計画 移流拡散降下解析 漂流漂着解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大規模火山噴火が発生すると、広範囲に火山灰や軽石が降下・堆積し、国民生活や社会経済活動に大きな混乱を発生させる。2018年9月に中央防災会議は、富士山大規模噴火による首都圏への火山灰影響を検討するワーキンググループを立ち上げ、大規模火山噴火の影響評価と災害対策の検討を行ったが、富士山は宝永噴火以降活動を休止しているため、具体例の検討の多くを桜島噴火による鹿児島県の被害例に依拠していた。

桜島は、約100年前の大正噴火(1914)、さらに130年前の安永噴火(1779-81)でVEI-4の大規模噴火を発生し、その発生間隔から想定し今後30年以内の大噴火が懸念されている。鹿児島港は、南北約20kmの港湾区域を有し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10km隔てているに過ぎず、火山噴火災害が起こった場合に大量の噴火火砕物が、港湾内や航路上に堆積することが想定される。これ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復旧・維持確保するのか、を予め準備・解決する方策を定めた港湾事業継続計画(港湾BCP)を策定する必要がある。

港湾BCP策定は、阪神・淡路大震災で神戸港が大きな被害を受け、港湾機能停止の間に国際貨物が釜山港などにシフトし国際港としての地位が凋落したことが、必要性の認識の端緒となった。東日本大震災においても、岸壁やクレーンなどの港湾施設の被災に留まらず、瓦礫によって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。この災害でも、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の重要性が認識され、現在まで重要港湾を中心として策定が進められている。しかし、既往の港湾BCPでは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研究例は見当たらない。こうした背景から、世界でも有数の活火山と近代港湾が隣接する当地において、本研究を行う意義は大きいと考え、研究を開始した次第である。

2. 研究の目的

本研究は、大規模噴火時に鹿児島湾域に降下する火砕物の中で、船舶の航行や接岸に影響を与える軽石成分に着目し、以下の3課題の解明を目的として実施した。

(1) 軽石群の風と潮流による流動機構

大正噴火レベルの大規模噴火によって鹿児島湾域に降下する軽石ならびに火山灰の降下量を予測する数値モデルを開発する。これを用いてさまざまな風向・風速を与えたときの鹿児島湾域や湾内の港湾内、航路上に堆積する火砕物降下量の変化特性を定量的に検討する。次いで、鹿児島湾内の潮流シミュレーションを実施し、西桜島水道等の狭窄部を有する鹿児島湾内の流況を再現する。潮流と風を外力として、海面に降下した軽石群がどのように漂流し、どの部分に漂着するかに関する漂流数値解析を実施し、船舶による避難や物資輸送に支障をきたす可能性のある箇所の特定を行う。

(2) 狭窄部における軽石群の閉塞機構

西桜島水道や鹿児島港の防波堤開口部などの狭窄域で軽石群が閉塞すると、湾内全体の軽石群の漂流に影響し、また航行や航路啓開の不全の直接的な原因となる。軽石流動の外力は、海流・潮流・吹送流による「海面流」と、風が軽石物体の海面上部分を押し「風圧流」で構成される。軽石の海面上・海面下の形状、重心位置などにより、風圧流の特性は異なると考えられる。粒子径や形状・比重が異なる軽石を用いて、流れや風圧流による軽石の漂流特性を調べる。また、実

験水槽内に狭窄部を作成して、風や流れ作用下の軽石群の流動特性を検討する。軽石単体と軽石群体とでは、風応力の遮蔽作用や群体間作用により漂流特性や閉塞特性が異なると考えられ、両者に対する実験を実施する。

(3) 時間軸上での軽石群の物質収支の解明

噴火発生後、時間とともに海域表面に浮遊する軽石群の総量がどのように変化するかを明らかにすることは、航路啓開や揚収の全体作業量・調達作業船量・港湾機能回復時間等を見積もる上で必須の要件である。(1)の課題で得られる、軽石群の海域への降下量、潮流、吹送流による流動や漂流計算の数値解析結果を応用し、鹿児島湾内の港湾や航路に降下する軽石量の定量評価、軽石揚収作業量・作業時間の評価を行う。また、軽石群の陸上への打上げや軽石空隙部への浸水による海底沈下等によって、海域表面に浮遊する軽石総量がどのように時間的に減少するかを試算する。

3. 研究の方法

(1) 軽石群の風と潮流による流動機構

噴火時の風向・風速を入力パラメータとして海面への降下軽石量を算出する移流拡散沈降解析モデルを開発した。単位時間あたりに放出される噴煙柱内火砕物の質量分布には Suzuki モデルを採用し、総噴出量や噴煙柱高度等の噴火条件は、桜島大正噴火と同等規模とした。海上に降下した火砕物は潮流の作用により時間の経過とともに鹿児島湾内で拡散漂流する。潮流計算は Princeton Ocean Model (POM) に基づき風による吹送流を考慮した3次元解析を行った。火砕物中の粒径の大きな軽石成分に焦点をあて、噴火時に海面に降下した軽石分布を初期条件として、それが潮流と吹送流によって漂流する状況を Kako et al. が開発した粒子追跡モデルを用いて解析した。

(2) 狭窄部における軽石群の閉塞機構

大規模噴火時に降下した大量の軽石群は、西桜島水道や港湾の湾口防波堤などの狭窄部に集中し閉塞することが予想される。(1)の漂流解析では軽石を比重1のトレーサーとして扱っているが、軽石はさまざまな形状や比重を有しており、それによって漂流特性が異なることが考えられる。そこで形状や比重の異なる軽石材料を用いて、その漂流特性を軽石単体と群体の両者について風洞水槽内で実験的に検討した。閉塞機構については、実験水槽の一部の幅を数通りに変化させ、開口幅による狭窄部の影響を調べた。また水槽の斜面端部において軽石群は打ち上げられるが、この現象は水域内の軽石群物質収支の観点から重要であり、この打ち上げ量の特性を実験的に検討した。

(3) 時間軸上での軽石群の物質収支の解明

(1)の解析結果から、噴火直後に軽石群は桜島より北側の海域と南側の海域に風向・風速に依存して特定の割合で降下し、その後潮流によって最狭部の西桜島水道を介して南北水域間の流出入が発生することがわかった。そこで、軽石群の潮流や吹送流による沿岸部への打ち上げや、西桜島水道を通過する軽石量の南北海域間の交換を数値解析により算出し、噴火発生からの時間経過に沿った軽石群の湾域内総量の物質収支を議論した。一方、港湾BCP立案の観点から、桜島大噴火時に想定される降下軽石量についての本研究結果を応用し、鹿児島湾内の主要港湾・主要航路に対して揚収対象軽石量を風向・風速をパラメータとして定量評価し、揚収に要する日数等を試算した。

4. 研究成果

(1) 軽石群の風と潮流による流動機構

さまざまな粒径を持つ火砕物が、上空の風により移流・拡散・沈降する過程を表現する数値モデルを開発し、鹿児島湾内へ降下する火砕物の堆積層厚・堆積量の特性を明らかにした。軽石成分は火山灰より火口近くの狭い領域に堆積する、風速の増加とともに堆積量の分布の幅が狭くなる、湾内に降下する火砕物総量は北からの風の場合に最大となる、等の結果を得た(図-1)。

海面高度計測衛星によって測得された鹿児島湾湾口部の海面高度データを境界条件として与え、7日間にわたる潮流計算を実施したところ、湾内各地で観測された潮流流速の時系列変動を本研究による数値解析結果は十分な精度で再現することが確認された。吹送流を考慮した湾内の3次元潮流場の計算結果では、西桜島水道や岬先端部において吹送流による潮流流速の増加の効果が明らかになり、風向き対岸となる沿岸部で潮流が加速することがわかった。

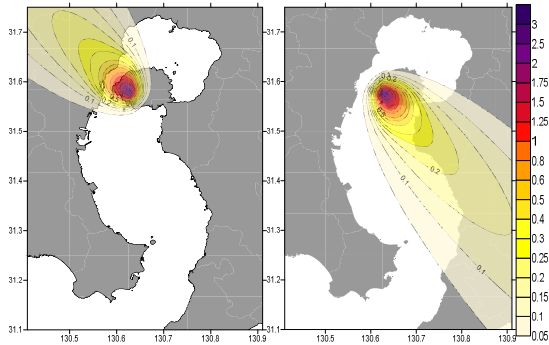


図-1 降下軽石の堆積量 (単位:m)
 (左図:風向:SE,風速 $W_{max}=10\text{m/s}$ 右
 図:風向NW,風速 $W_{max}=10\text{m/s}$)

海面に降下後の軽石群の潮汐による漂流を再現する数値モデルを検討した。トレーサーの追跡にランダムウォークによる分散を考慮することにより、軽石群が時間とともに分散しながら漂流する過程を再現できた。海陸境界セルごとに漂着個数をカウントし整理したところ、一部区間に集中して漂着する結果が得られ(図-2)、災害時の港湾による避難や物資輸送に支障をきたす個所の特定につながる知見が得られた。

2021年8月に発生した福岡ノ場の大規模噴火では、洋上の軽石群が約2ヶ月後に1200km離れた奄美大島や沖縄諸島に漂着し、各地の港湾・漁港に大きな被害を与えた。本研究で開発した軽石群の漂流解析モデルが、現実が発生した大規模軽石群の漂流事象を説明できるかを検討したところ、軽石群に作用する風圧流を考慮することにより、当該海域を撮影した衛星画像による観測漂流状況をほぼ再現できることがわかった。

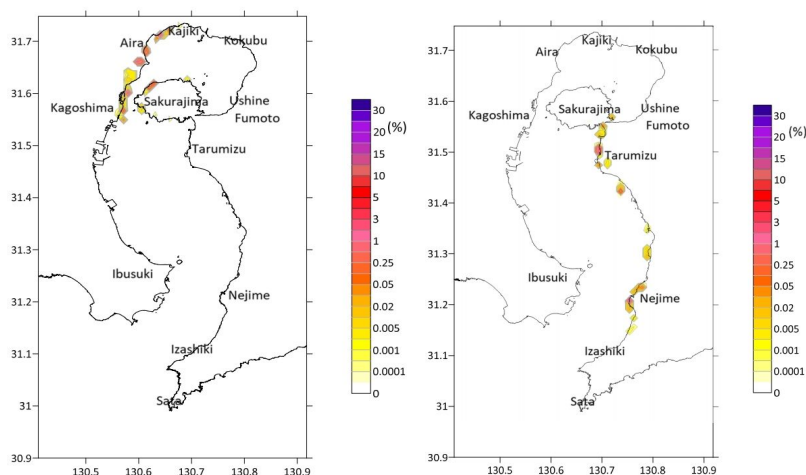


図-2 噴火発生から5日後の軽石群トレーサーの着岸個数の平面分布
 (左図:風向SE、右図:風向NW)(海岸地点ごとに漂着と判定された
 トレーサー個数と初期配置全個数との比を、パーセントで表示)

(2) 狭窄部における軽石群の閉塞機構

単体の軽石を使った風による漂流実験では、軽石の比重が大きくなると水面下に沈む部分が

増加し、海面上の風の作用面積は少なくなるが、風による軽石の動揺が少なく、漂流速度は増加する結果となった。軽石形状特性の指標による漂流速度への影響を調べたところ、ばらつきはあるものの長短度の増加、扁平度・Zingg 係数の減少とともに漂流速度が増加する傾向が認められた。軽石群体による漂流速度の特性の変化についても検討を行った。

軽石群体の狭窄部通過を模した実験では、狭窄部開口幅が最小のケースでは、軽石通過量は閉塞により最小となったが、開口幅が中のケースでは狭窄部を流れる流速が増加することにより軽石通過量はピークを生じ、それより開口幅が広いケースより通過量は大きくなった。

実験水槽斜面端部での軽石群の打ち上げについては、軽石投入量が小さいケースでは打ち上がった軽石が引き波により水域内に戻されるが、投入量を多くしたケースの場合には、軽石群体間の作用力が流下する軽石を支える形になり、全体として斜面上に打ち上げる駆動力を形成する。よって軽石投入量が多い方が斜面上への打ち上げが効率的になされることがわかった。

(3) 時間軸上での軽石群の物質収支の解明

港湾内、航路内からの揚収作業の対象となる海域内軽石総量の時間変化について、桜島を挟んだ北部海域と南部海域に対する定量的試算結果を提示した(図-3)。本数値解析では潮流による海岸への漂着条件を、トレーサーの海域セルから陸域セルへの移動をもって判定したが、その妥当性には今後の検討が必要である。海域上の軽石群の物質収支については、波や潮流による陸上への打ち上げ、陸上堆積軽石の降雨等による海域への流入、軽石間の摩擦で生じる粉体化による海底への沈降、高温軽石の吸水機構による沈降等の解明を今後の課題として指摘した。

海上に降下する軽石群の総質量を計算する数値解析モデルから、さまざまな風向・風速条件下での港湾区域と航路内に降下する軽石群の揚収対象量と揚収作業日数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ため、本試算結果は大規模火山噴火時の短期的対応として港湾 BCP 策定に資するものとする。

中長期的対応として、鹿児島湾全域に広がる降下軽石量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、陸上への打ち上げ、湾口からの流出、高温軽石の吸水機構、軽石間の摩擦による粉体化による沈下促進等を考慮しなければ、最悪の風向・風速の条件下では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。

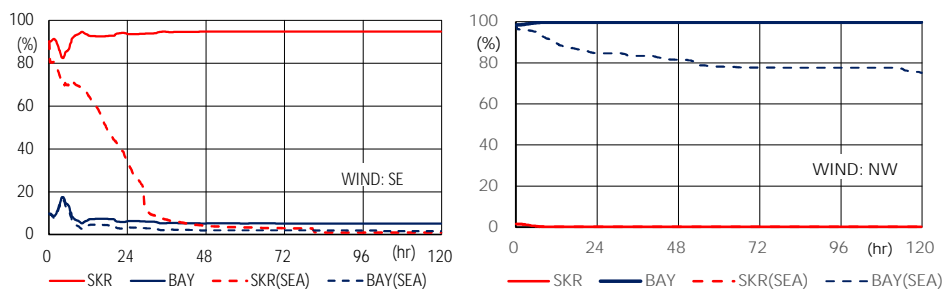


図-3 桜島北部海域(SKR)と桜島南部湾域(BAY)の軽石総量の時間変化

(左図：風向 SE、右図：風向 NW、破線：トレーサーの陸上遡上を系外流出として評価)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 浅野敏之・長山昭夫・加古真一郎	4. 巻 76
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 1321-1326
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 浅野敏之・高橋忍・甲斐信治	4. 巻 39
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 自然災害科学	6. 最初と最後の頁 45-56
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Toshiyuki Asano, Akio Nagayama	4. 巻 64
2. 論文標題 Analysis of workload required for removal of drifting pumice after a volcanic disaster as an aspect of a port business continuity plan: A case study of Kagoshima Port, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Disaster Risk Reduction	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijdrr.2021.102511	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 浅野敏之・長山昭夫・井崎丈・松田健宏
2. 発表標題 火山災害時の港湾BCP立案の基礎となる海面降下軽石の漂流実験
3. 学会等名 日本自然災害学会学術講演会講演概要集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅野敏之・長山昭夫
2. 発表標題 火山災害時の航路啓開作業量評価のための海域降下軽石群の漂流解析
3. 学会等名 土木学会海岸工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅野敏之・中谷剛
2. 発表標題 福徳岡ノ場噴火によって形成された海上軽石群の漂流解析
3. 学会等名 鹿児島大学地震火山地域防災センター令和3年度活動報告書
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	長山 昭夫 (Nagayama Akio) (40621438)	鹿児島大学・理工学域工学系・助教 (17701)	
研究分担者	加古 真一郎 (Kako SHin-ichiro) (60709624)	鹿児島大学・理工学域工学系・准教授 (17701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------