

2021年福岡ノ場噴火によって形成された海上軽石群の漂流解析

地震火山地域防災センター 浅野 敏之 中谷 剛

1. はじめに

2021年8月13～15日にかけて小笠原諸島福岡ノ場で、噴煙高度16km、マグマ噴出量0.11～0.26km³という大規模な噴火があった¹⁾。この噴火規模は、2012年の南太平洋 Havre 海底火山噴火²⁾より1桁小さいが、21世紀になって我が国周辺で発生した最大の噴火である。この軽石群は筏状 (pumice raft) となり、海流と風的作用を受けて10月10～13日頃に約1200km離れた鹿児島県奄美大島・喜界島周辺に漂着し、数日後には与論島や沖縄県各地にも軽石群が漂着した。各地の港湾・漁港に侵入した大量の軽石は、船舶の航行・接岸に大きな障害を与えた(写真-1)。10月23日には海上保安庁沖縄第11管区の巡視艇が軽石を吸い込んで航行不能となり、11月上旬には与論島で漂着軽石により重油タンカーが着岸できず、いったんは島への電力供給が心配される事態に陥るなど、各地で被害が発生した。その後11月、12月にかけても、南西諸島周辺に漂流する軽石群や沿岸部にトラップされた軽石群が、黒潮に乗って鹿児島県本土をはじめ、四国・東南海道沖・関東沖までの各地で漂着したことが報告された。鹿児島県危機管理課が公開した県内における軽石漂着による県内の被害状況³⁾は、漂着件数が県内の港湾・漁港・海岸に対してそれぞれ、37件、30件、37件(県管理・市町村管理・未指定の総計、2022年1月17日時点)、漁船被害は43件となっている。軽石の漂着が大量となった与論港(茶花地区)では、10月30日～11月11日の期間に総量2160m³の軽石を回収しており、奄美大島宇宿漁港(10月21～22日期間)と喜界島早町漁港(10月19～21日)でともに200m³を回収している⁴⁾。

筆者らは、地域の港湾物流の中心である鹿児島港が桜島の噴火口に近接して位置していることに着目し、近い将来想定される桜島の大規模噴火に備えて、港湾事業継続計画(港湾BCP)立案に資するための研究を実施してきた^{5)~8)}。そこでは、桜島の大規模噴火によって鹿児島湾内の港湾や航路にどれだけの軽石や火山灰が降下堆積するのか、それによりどのような港湾機能の不全が生じるのか、港湾機能を復旧するために降下火砕物を揚収するにはどの程度の作業船量や作業期間が必要であるのかを検討した。東日本大震災では、津波によって破壊された家屋や船舶などが、瓦礫となって航行障害の2次災害を引き起こした。また近年、九州各地で発生した豪雨災害によっても、流木などが港湾に流入し港湾機能障害が発生している。本研究は、主要港湾で立案されつつある災害時・災害後の航路啓開・復旧作業機材調達・荷役航行支援といった港湾BCP構築⁹⁾に関して、軽石漂着を自然災害外力として考察したものである。

上述した将来想定される桜島大噴火に対する港湾機能確保の予防防災の研究は、現実に発生した災害事象に基づかない想定研究としての限界を持っている。今回、福岡ノ場海底火山噴火の軽石群漂着事象に着目して研究を行った目的は、実際に発生した噴火火砕物による漂流・漂着現象を考察検討



写真-1 奄美市笠利町宇宿漁港における軽石の漂着状況
(2021/10/19撮影)

することで、これまで行ってきた予防防災研究を実証性・定量性・工学的応用性の観点から補強することにある。

2. 軽石群漂流の再現数値シミュレーション

2-1 外力である気象・海象条件

噴火火砕物発生源の福徳岡ノ場(N24°, 17'6", E141°28'54")と、主要な漂着先である奄美大島小湊 (N28° 19 '17", E129° 32'00") を含む、E124° ~E148°、N20° ~N36° を解析対象領域として採用した。解析期間は2021年8月13日~10月20日の69日間である。海上風には、気象庁全球数値モデルGSM(空間解像度20km)のオリジナルデータを基に、京大大学生存圏研究所により収集・配布されたデータベースを用いた。海流・吹送流を総合した海面流は、九州大学応用力学研究所が中心となって開発された数値モデルDREAMS¹⁰⁾による結果を使用した。このモデルの空間解像度は西南日本では経度方向1°を16分割、緯度方向1°を20分割と詳細に取られているが、本研究の対象領域全域にわたるものは経度、緯度それぞれ4, 5分割で約20kmとなっている。図-1に、海面流と風速の2次元ベクトルの状況を示す一例として、軽石群が奄美諸島に初めて大規模に漂着した10月13日の結果を示す。

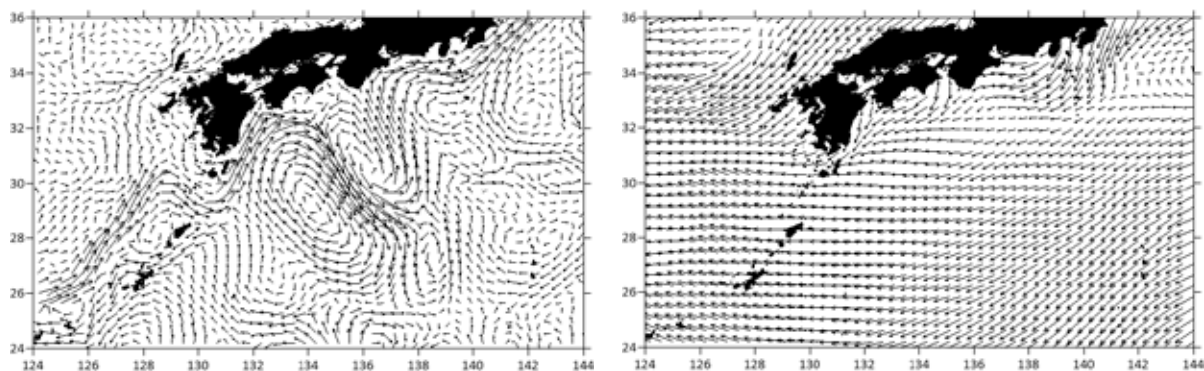


図-1 2021年10月13日の解析対象領域の海面流ベクトル(左図)と海面上の風速ベクトル(煩雑を避けるためベクトルは2計算格子間隔で描画している)

2-2 漂流計算における軽石群分布の初期条件

対象海域の軽石群の漂流計算を行うためには、その初期条件として噴火発生後に海面に降下した軽石群分布を求める必要がある。福徳岡ノ場の噴火は8月13日6:00JSTに始まり、噴火活動の最盛期は同日13:20から、噴火の勢いは20:00頃に弱くなり、8月15日15:55に噴火活動終了と報告されている¹⁾。そこで主要噴火活動期間を8月13日8時~20時とし、総噴出量0.12km³を12時間で案分した時間的に連続な噴出を入

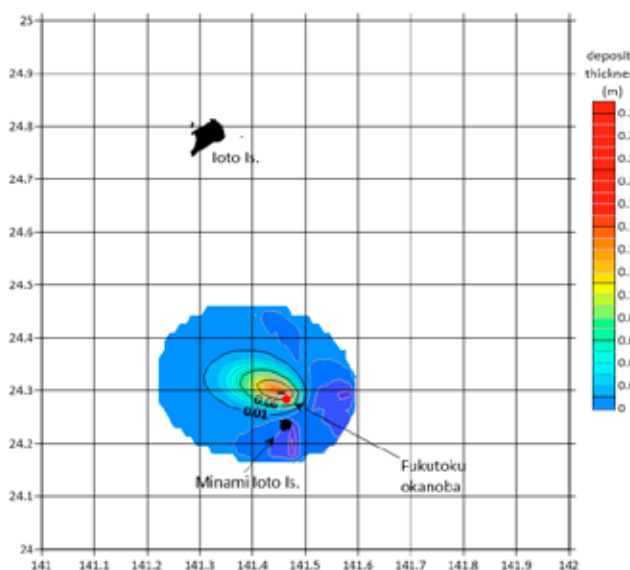


図-2 移流拡散沈降モデルで計算された海面上軽石群の堆積厚(2021年8月13日20:00JST)

力とした。source term として噴煙柱内の火砕物質量分布を Suzuki⁹⁾モデルで与え、当該期間の福徳岡ノ場上空の約 16000m までの風速データを用いて、大気中の火砕物の移流拡散沈降計算³⁾を行い、海面への軽石群の降下堆積量を計算した。降下火砕物の粒径分布は、対数正規分布で与えており、粒径 d から $\phi = -\log_2 d$ で換算される粒子径階級 Φ について -6~5 まで 12 分割して計算を行った。本研究では、港湾や船舶に影響を与える軽石成分を対象とするため、粒径 $d=8\text{mm}$ 以上 ($\Phi=-3\sim-6$) の計算結果を考察の対象とした。図-2 は求められた海面上の降下軽石成分の 12hr 後の堆積厚を示したものである。

トレーサーの初期配置は図-2 に示した軽石海面降下量の分布に比例するように設定し、漂流計算を実施した。総計 6846 個のトレーサーを $\Delta t=1200\text{s}$ の時間間隔で次節で述べる海面流と風圧流の作用の下、乱数発生による拡散効果を加えてラグランジェ的に追跡することで、対象海域の軽石群漂流の再現計算を行った。

2-3 軽石群への作用外力のメカニズム

2-1 で述べたように今回対象とする軽石群は、海面流と風の作用で約 1200km の距離を漂流し約 2 ヶ月間後に奄美大島に漂着した。本研究で海面流とは、衛星高度計データから地衝流として算定される海流、潮流、風による吹送流の和と考えられるが、海面高度は風の吹送作用などによっても影響を受けるため 3 者は明確に区分できるわけではない。また海面を浮遊する物体の漂流は風による風圧流の考慮が必要である。これまでに流木¹²⁾、流氷¹³⁾、遭難船舶・遭難者^{14), 15)}、海洋プラスチック¹⁶⁾、流出油¹⁷⁾などの漂流物に対する研究が報告されているが、いずれも漂流状況を説明するためには風圧流の考慮が不可欠であるとされている。風圧流の特性は、対象漂流物の比重（水面下と水上部の体積比を決める）や形状（風圧流や海面流の作用重心位置を決める）によって異なる特性を持つ。風が水上部を押す力が海面流による漂流力より大きい場合は、物体の水中部が抵抗となって働く。逆に海面流が大きければ風圧流の寄与は小さくなる。

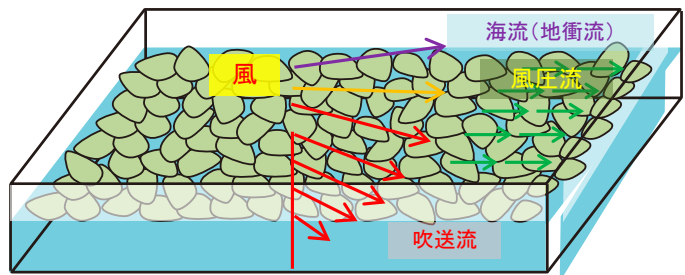


図-3 軽石筏に対する作用外力の模式図

今回の事象では、火砕物総噴出量 0.12km^3 によって生じる大量の軽石群が海面に浮遊するので、時空間的に軽石筏が海面を占有する状況が生まれる。こうした群体に対する風圧流は単体の物体に対するものと異なることが十分に予想される。さらに海水面が軽石群で占有された状態では、風による海水の流れ（=吹送流）が発達しないこととなる。対象とする現象は、図-3 の模式図に示すように複雑な物理過程が関与することが推察できるが、今回の漂流計算では従来の研究にならい、海面流 U と風による風圧流 W のベクトル合成 $U + \alpha W$ で軽石トレーサーが運ばれるものと設定した。風圧流の寄与を示す α の値として福島¹⁴⁾は 0.035 の値を提案しているが、本研究では $\alpha=0.100$ とした。

3. 奄美大島漂着までの再現結果とその考察

図-4 は、軽石群漂流状況の数値解析結果を 5 日間隔で示したものである。8 月 13 日に福徳岡ノ場の噴火があり、その後 8 月末まではほぼ一定に西に向かう漂流状況が読み取れる。9 月については 9 月 4 日と 9 月 30 日の結果を示したが、その間の結果は複雑な様相となったため示していない。

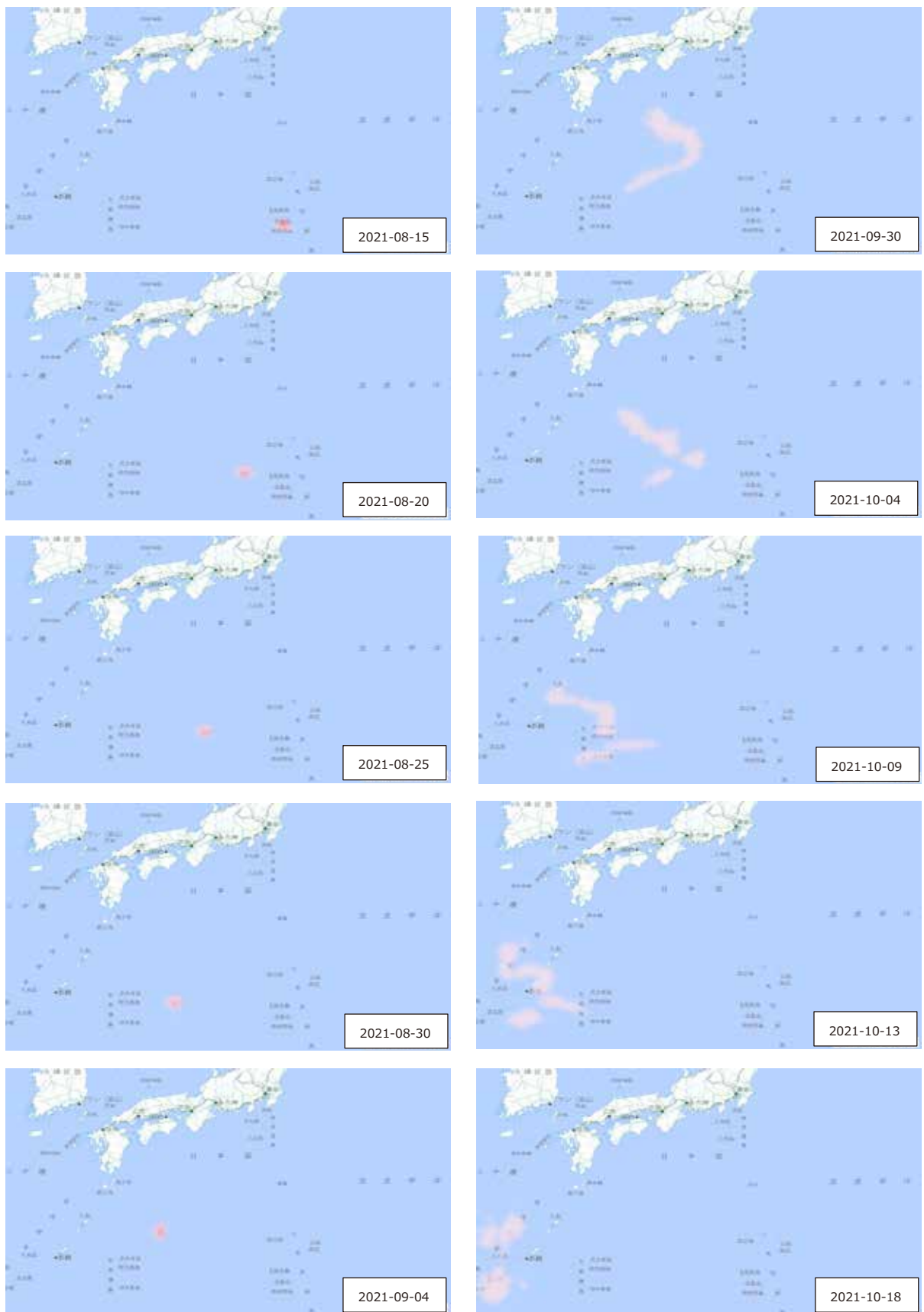


図-4 軽石群の漂流状況の数値シミュレーション結果

い。なぜならこの期間、9月8日付近で台風14号が当該海域の南端付近に近づき、9月末には台風16号がこの海域を進行・北上したことで、数値解析結果に大きな擾乱が生じたためである。9月末までに大きく拡散した軽石トレーサー群は、10月になると整然とした形を取り戻し西方に移動し、10月13日には奄美大島に漂着することが読み取れ、現地で軽石群の漂着が確認された日付と整合する。前述したように本研究では風圧流の寄与係数 α を0.100としたが、 α を小さくすると奄美大島への漂着時が遅れることがわかった。

計算結果の妥当性を検証するために、NASAの衛星アーカイブ画像¹⁸⁾で観察される福徳岡ノ場の軽石漂流状況を水産大学校島田助教が解析した結果を図-5に引用する。図-4に示した軽石群の本シミュレーション結果は、図-5の衛星画像に認められる漂流状況をおおむね再現していることがわかる。

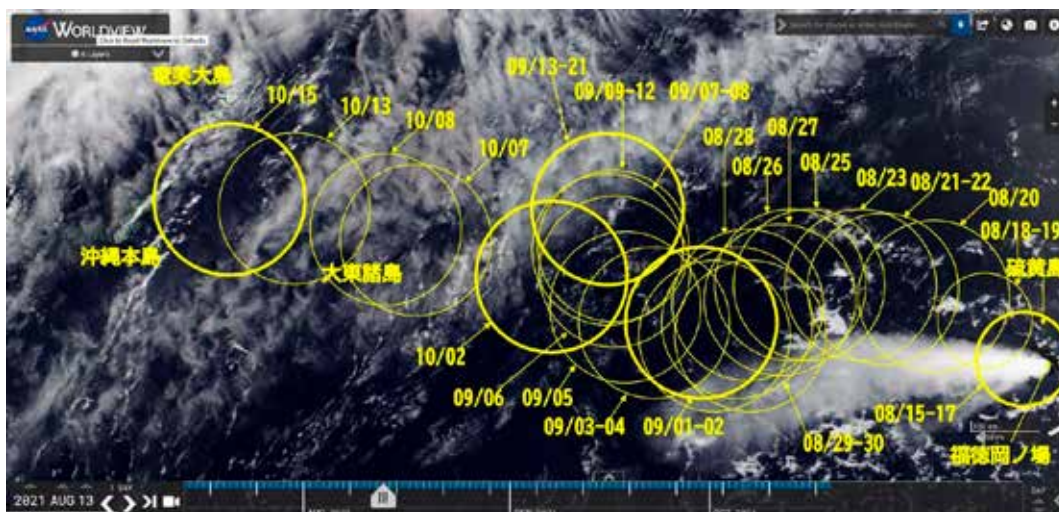
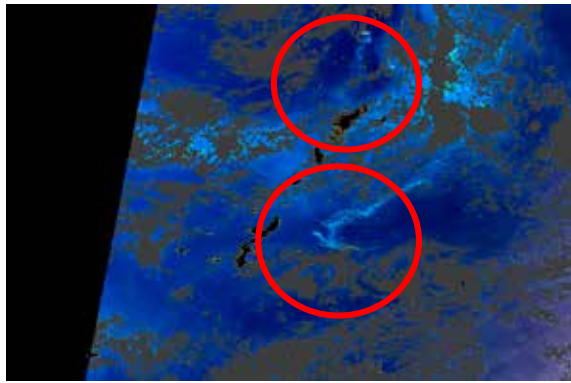


図-5 当該海域におけるNASA衛星画像¹⁸⁾による軽石漂流状況
(水産大学校 嶋田陽一助教の解析結果を引用)

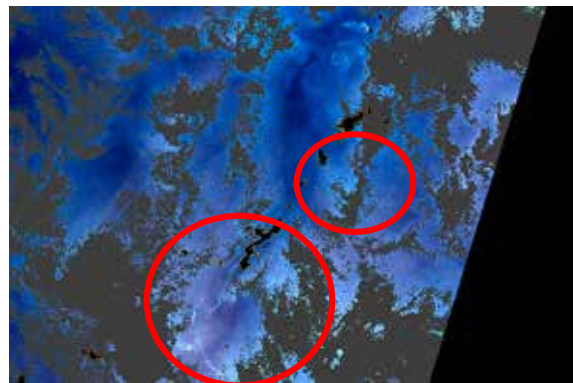
4. 奄美大島漂着後の軽石群北上について

奄美大島に大量の軽石漂着が確認された10月中旬以降、11月～12月になっても鹿児島県や沖縄県の南西諸島各地で軽石の漂着が断続的に確認された。この期間では、10月に沖縄本島や奄美群島周辺とそれらの入り組んだ海岸、港湾などに漂着していた軽石群が、強風により流出しそれが黒潮の強い流れに乗って北上することで、宝島・悪石島などの吐噶喇列島、種子島・屋久島などの大隅諸島に漂着したと考えられる。宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、衛星GCOM-C「しきさい」が観測した福徳岡ノ場噴火の軽石群漂流状況をWEB上で公開しているが¹⁹⁾、図-6はそのうちの南西諸島海域での10月中旬～11月初旬における画像を抽出引用したものである。海域の青色の背景上に白く”すじ状”に見える部分が軽石群と推定される個所である。

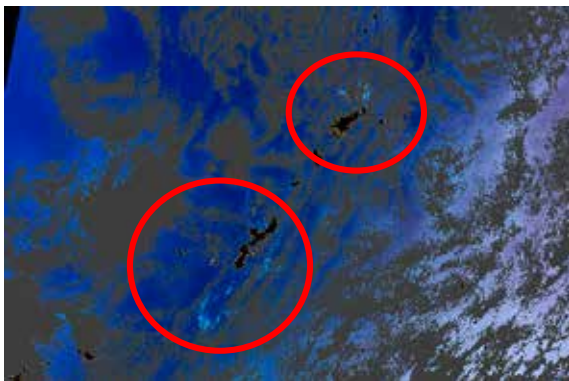
図-6の11月3日の画像を画像解析ソフトウェアImageJを使って白黒2値化し、計算格子の輝度情報から格子内に存在する軽石個数に相当する量を算出し、それを初期条件とした(図-7)。11月～12月初旬期間における沖縄-南西諸島-南九州海域での軽石群北上に関する再現漂流シミュレーションでは、計算対象領域をE124°～E132°、N24°～N32°とした。海上風、海面流のデータは、気象庁のメソスケールモデルMSM(京大生存圏研究所より配布されたものを利用)、数値モデルDREAMSである。この領域では空間解像度が、経度方向1°を16分割、緯度方向1°を20分割と詳細になっており、それを使用して計算を実施した。



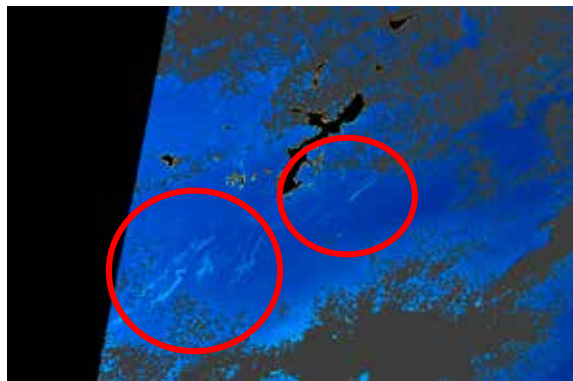
GC1SG1_2021/1015/13400



GC1SG1_2021/1029/020400



GC1SG1_2021/1026/014300



GC1SG1_2021/1103/13100

図-6 衛星 GCOM-C「しきさい」¹⁹⁾が撮影した軽石群 (JAXA 提供、赤丸は著者加筆)

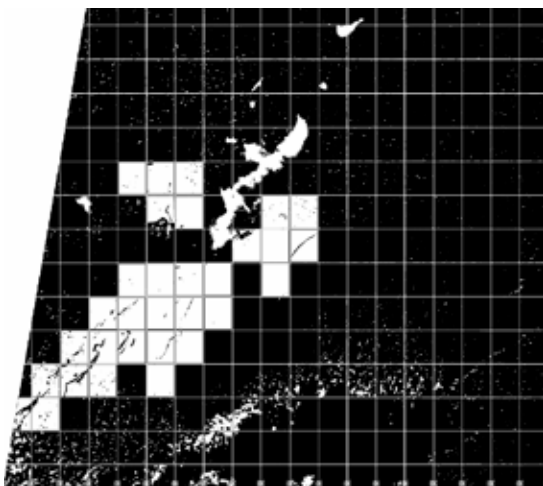


図-7 11月漂流解析における軽石群の初期分布

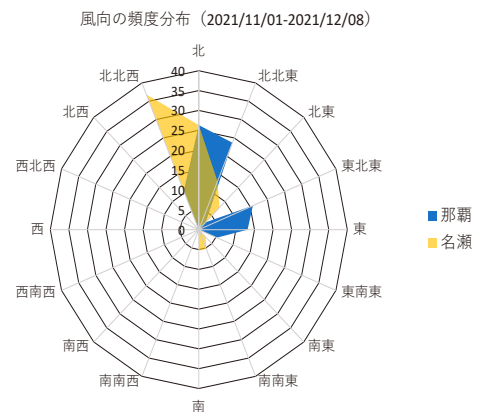


図-8 2021年11月1日～12月8日期间における名瀬市と那覇市の風向分布

当該期間においてこの海域の風向を調べたところ、図-8のように風向は北北西～北～北北東が卓越し、大部分の軽石トレーサーは北上することなく南下する結果となった。乱流拡散係数を大きくすることでわずかな割合で北上するトレーサー粒子も確認されたが、ここでは実際に問題とされた南西諸島を北上する状況を図面上に再現するために、軽石群の初期配置を経度 2° 西方に移動させ、黒潮の流軸に近づけた計算を実施した。その結果を図-9 に示す。主に黒潮の作用により軽石群が北上するようすが再現されている。

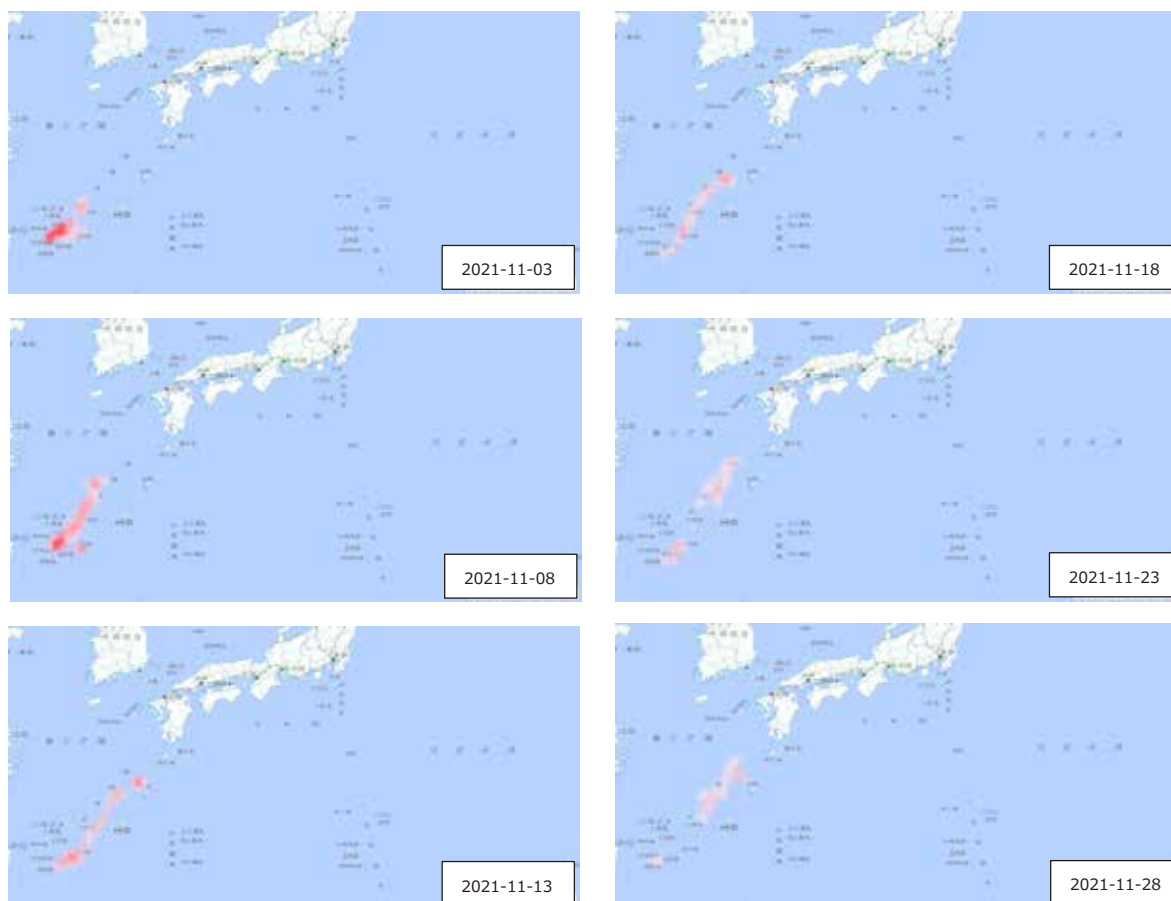


図-9 2021年11月における軽石群の漂流状況

5. 結びに

本研究では、昨年8月に発生した福徳岡ノ場海底火山で発生した大量の軽石群が、約1200km離れた奄美大島まで約60日をかけて漂流した状況、ならびに一旦南西諸島に漂着した軽石群が11月～12月初旬に北上する状況の再現数値シミュレーションを実施した。本研究の目的は、衛星画像などで既に確認されている漂流状況の再現にあるのではなく、再現解析を通じて実現象のモデル化で未解明になっているメカニズムや、数値解析におけるモデル化や技法の中の問題点を発掘することにある。本解析では軽石に作用する風圧力の重み係数 α を0.100とすることにより、衛星画像で観測された軽石の漂流状況のある程度再現することができたが、再現精度は時空間解像度に大きく依拠するので、本解析には明確な限界を有している。風圧力の重み係数 α は、大規模噴火により大量の軽石が海面を覆った状態での、海上風が浮遊軽石群に作用することによる漂流力と表面海水流による漂流力の比を表すが、設定した値が普遍性を持つかは不明である。群体としての筏状軽石に作用する風圧力については軽石個体間の干渉力が発生するであろうし、そうした状況で風による海水の吹送流の評価も軽石群が無いものとした大気-海水間の応力の伝達で説明できるか不明である。現在、長山ら¹⁸⁾が実験風洞水槽内に多数の軽石を投入し、風による漂流状況の研究を行っており、大気-漂流群体-海水間の物理的素過程の解明ができれば、その成果を数値モデルに取り込むことで軽石漂流計算がさらに精度向上していくものと考えられる。

【謝辞】本研究を行うにあたり、NASA衛星画像¹⁸⁾に基づいた軽石漂流の解析結果を、水産大学校 海洋生産管理学科 嶋田陽一助教から提供を受け掲載を許可していただいた。GCOM-Cの衛星

画像¹⁹⁾は JAXA から掲載を許可していただいた。海面流の数値モデル DREAMS による解析結果結果は、本学理工学研究科 海洋土木工学 PG 加古真一郎准教授より提供いただいた。鹿児島県内の軽石漂着状況や回収対応などについては、鹿児島県港湾課・漁港課、大島支庁河川港湾課、奄美市役所土木課・農林水産課、海上保安庁奄美海上保安部の方々からデータや情報の提供を頂いた。本報告の図面作成やデータ整理においては、本センターの技能補佐員 下別府夏美さんにご担当いただいた。ここに記して謝意を表します。

また本研究は、日本学術振興会科学研究費（「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」課題番号 19K04952）の研究活動の一環であり、研究費の補助を得たことを付記し謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 及川輝樹ら：小笠原諸島 福德岡ノ場における 2021 年 8 月の噴火、2021 年度日本火山学会秋季大会講演予稿集、P1-34, 2021.
- 2) Jutzeler M. et al.: On the fate of pumice rafts formed during the 2012 Havre submarine eruption, *Nature Communications*, DOI: 10.1038/ncomms4660, 10p., 2014.
- 3) 鹿児島県危機管理課：軽石漂着による被害状況、http://www.pref.kagoshima.jp/aj01/documents/90882_20220117110755-1.pdf, 2022 年 2 月 1 日確認
- 4) 国土交通省港湾局・水産庁：漂流軽石の回収技術に関する取りまとめ、令和 3 年 11 月 <https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001443575.pdf>, 2022 年 2 月 1 日確認
- 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, pp.1321-1326, 2020.
- 6) 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, pp.45-56, 2020.
- 7) 浅野敏之・長山昭夫・加古真一郎：桜島の大規模火山噴火を想定した海域内降下軽石群の漂流解析、鹿児島大学地震火山地域防災センター令和 2 年度報告書、p.25-30, 2021.
- 8) Asano, T. and A. Nagayama: 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, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol.64, <https://doi.org/10.1016/j-ijdr.2021.102511>, 2021.
- 9) 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.
- 10) Hirose N. et al.: Regional data assimilation system extended to the East Asian marginal seas, *Umi to Sora*, Vol.89, No.2, pp.1-9, 2013.
- 11) 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.
- 12) 例えば、柿木哲哉・辻本剛三・外村隆臣：令和 2 年 7 月球磨川豪雨災害で発生した流木の八代海における挙動に関する研究、*土木学会論文集 B3(海洋開発)*, Vol.77, No.107, 2021.
- 13) 例えば、河合孝治ら：サロマ湖内結氷部氷縁部における流入流水の運動に関する研究、*海洋開発論文集*, Vol.13, pp.795-800, 1997.
- 14) 福島繁樹：漂流予測の高度化のための基礎調査、一風圧流と偏角について一、*海上保安庁海洋情報部技報*, Vol.24, pp.107-115, 2006.
- 15) 浅原悠里ら：漂流予測プログラム Ver6.0 の紹介、*海上保安庁海洋情報部研究報告*、第 52 号、pp.107-113, 2015.
- 16) Kako S. et al.: A decadal prediction of the quantity of plastic marine debris littered on beaches of the East Asian Marginal Seas. *Marine Pollution Bulletin* 81: 174-184, 2014.
- 17) 犬飼直之ら：数値計算による吹送流を考慮した海表面浮遊粒子追跡に関する研究、-ナホトカ号重油流出事故について、第 44 回海岸工学講演会論文集、pp.1046-1050, 1997.
- 18) アメリカ航空宇宙局 NASA: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>, 2022 年 2 月 1 日確認
- 19) 宇宙航空研究開発機構 JAXA: <https://earth.jaxa.jp/karuishi/report/index.html>, 2022 年 2 月 1 日確認
- 20) 長山昭夫・井崎丈・浅野敏之：土木学会論文集 B3 (海洋開発)、Vol.78, 2022 年 6 月(投稿準備中)