

時系列衛星データによる2021年福徳岡ノ場からの 漂流軽石抽出と追跡解析

中山 裕則*・池田 真凛**

An Analysis of Extraction and Tracking of Drifting Pumice from the Fukutoku-Oka-no-Ba 2021 Eruption by Time Series Satellite Observation Data

Yasunori NAKAYAMA* and Marin IKEDA**

(Accepted November 10, 2023)

Fukutoku-Oka-no-Ba of submarine volcano located in the southernmost end in the Ogasawara Islands caused the large-scale eruption on August 13, 2021. The eruption was very large-scale and the volcano spouted a lot of pumices. The pumice raft was drifting toward the west, and the serious influence occurred in the Okinawa island by mass drifting pumice washed ashore in early October. However, the detailed drifting movement situation of the pumice in the ocean from Fukutoku-Oka-no-Ba to the Okinawa island has been not sufficiently investigated. In this study, development of a method of extracting pumice raft from the satellite LANDSAT/OLI optical sensor data by an image data processing firstly was performed. Next, through the applying of the developed method to 20 time-series satellite GCOM-C/SGLI data, the extraction of the drifting pumice raft and detailed tracking of the drifting situation were analyzed in the sea from Fukutoku-Oka-no-Ba to the Okinawa island. Finally, based on analysis and measurement results, the consideration for the characteristics of drift pumice movement was carried out. The result of this study is summarized as below.

1) According to the analysis of the comparatively high spatial resolution LANDSAT/OLI・TIRS data, the result of applying a multi level slice classifier to the visible to short wavelength infrared data showed that the extraction of detailed pumice distribution on the ocean was possible.

2) By the applying of a multi level slice classifier to time-series GCOM-C/SGLI data of high observation frequency, the extraction of the drift pumice distribution and the investigation of its movement situation in the object sea area were sufficiently carried out.

3) Although it became clear that drift pumices mainly moved in an average of about 1.15 km/h toward the west, and reached the Okinawa island in mid-October, it turned out that the complicated drift movement toward the north or the east was also shown temporarily.

4) It was shown that the drift pumice movement was strongly affected by the influence of ocean current or sea wind direction based on the comparative analysis with such related data, and also the influence by a typhoon passing through the neighboring sea area was presumed.

Keywords: drifting pumice, LANDSAT/OLI, GCOM-C/SGLI, multi level slicing, time series analysis, tracking

1. はじめに

小笠原諸島の硫黄島から南へ約60kmにある海底火山の福徳岡ノ場火山 (24° 17.1' N, 141° 28.4' E) は、2021年8月13日から15日にかけて大規模な噴火をおこした。(海上保安庁海洋情報部, 2023; 産業技術総合研究所, 2021)。噴火の概要は、及川ほか (2022) により詳しく報告されている。この最も活発な噴火は13日午後に生

じ、噴煙柱が対流圏上層の約16~19kmまで到達したことが気象衛星ひまわりで確認された。これは日本列島における近年では最大級の噴火で、マグマだまりに貫入した玄武岩マグマの影響で爆発的な噴火となり、多量の軽石を噴出したとされる。火口付近には噴出物による新島が形成され、その周辺海域には多量の噴出した軽石が広がった。その後、この軽石は集合したままとまり (軽石

* 日本大学文理学部地球科学科：
〒156-8550 東京都世田谷区桜上水3-25-40
** 元日本大学文理学部地球科学科：
〒156-8550 東京都世田谷区桜上水3-25-40

*Department of Earth and Environmental Sciences, College of Humanities and Sciences, Nihon University, 3-25-40, Sakurajosui, Setagayaku, Tokyo 156-8550, Japan

**Department of Earth and Environmental Sciences, College of Humanities and Sciences, Nihon University, 3-25-40, Sakurajosui, Setagayaku, Tokyo 156-8550, Japan

いかだ)として、西北西に向かって漂流移動を続け、10月上旬までには南西諸島に到達した(産業技術総合研究所, 2021; 及川ほか, 2023; 海洋研究開発機構, 2022)。沖縄諸島などでは大量の漂流軽石の漂着により、大きな影響が生じた(沖縄県, 2023; 首都圏地盤解析ネットワーク, 2023)。

噴火に伴う軽石の集まりの移動開始から沖縄への漂着までの移動状況については、衛星データを用いた判読による追跡が試みられ報告が行われた(宇宙航空研究開発機構, 2021, 2022; 金田ほか, 2022)。しかし、ほとんどが数シーンの衛星画像の判読による断片的なものであり、対象の全海域における時系列の詳しい漂流移動状況は示されていない。また、衛星データの自動処理を含む解析による漂流軽石抽出の試みも行われているが、時系列による漂流移動把握には至っていない(伊藤ほか, 2022)。さらに、漂流軽石の移動シミュレーションも行われた(海洋研究開発機構, 2021)が、実際の漂流との比較検証は必ずしも十分ではない。

以上のことから、本研究では、これまで必ずしも十分には行われていない、漂流軽石の分布、移動状況を時系列に詳しく抽出、追跡することを目指した。具体的には、人工衛星観測光学センサデータを用いて、画像処理による漂流軽石を抽出する手法の開発を行い、その手法を時系列の人工衛星広域観測データに適用して、実際に福徳岡ノ場から沖縄本島に至るまでの漂流軽石を時系列に抽出、追跡して、漂流状況を詳しく把握することを目的とした。尚、本論では噴出した軽石のまとまり(軽石いかだ)について、以下『漂流軽石』と表して論じる。

2. 研究の目的

衛星画像を用いたこれまでの福徳岡ノ場起源の漂流軽石についての調査や研究は、画像判読によるその分布の把握や、画像処理手法の検討が主であった。本研究では、以下に示すように、時系列の人工衛星データを適用して、画像解析や計測による、漂流軽石の分布やその追跡による、漂流移動状況の詳細な把握を目的とした。

- ①中高分解能衛星データによる海上における漂流軽石の抽出手法の検討。
- ②検討された抽出手法を適用した広域観測衛星データの時系列解析による漂流軽石分布の詳細把握。
- ③漂流軽石の分布や移動状況の考察。

3. 研究の方法

3.1 研究の概要

研究の主な流れは図1のとおりである。最初に、漂流

軽石を衛星画像データからデジタル処理により詳しく抽出する手法を開発した。この検討のためには、空間分解能が比較的高くかつ可視光線域から赤外線域までの観測波長帯を多く有するLANDSAT衛星搭載OLIセンサの観測データを使って実施した。具体的には、漂流軽石の分光反射特性の分析を行い、その海水や雲とは異なる分光反射特性を求め、その特性による抽出手法を検討して、実際に解析を行った。次に、新たに開発した抽出手法を、LANDSAT/OLIデータと同様の観測波長帯を有するGCOM-C/SGLIデータに適用し、時系列に漂流軽石の分布および移動状況を把握した。解析では、抽出された漂流軽石の分布位置の座標を計測し、漂流軽石の移動方向、速度、特徴などを詳しく求めた。最後に、漂流軽石の分布と移動の特徴について、海流の流動や台風経路との関係から考察を行った。

3.2 対象領域

本研究では、福徳岡ノ場から沖縄本島に至る海域において、衛星データからの漂流軽石の抽出手法の検討と、その手法を適用した実際の漂流軽石の移動状況の解析を目指し、解析対象領域は図2の太枠で示すような漂流が想定された福徳岡ノ場から沖縄諸島までを含む北緯22度~37度、東経125度~145度の範囲とした。データ解析では、漂流軽石の漂流位置計測などのため、緯度経度が等間隔の正方形(正距円筒)座標を用い、面積や距離の計測に関しては、UTM座標や正角割円錐座標に変換して実施した。

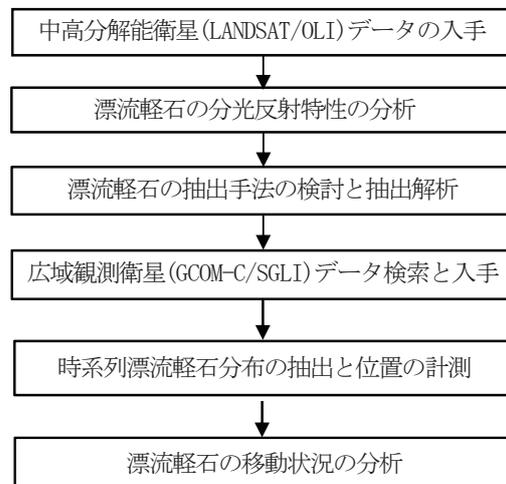


図1 研究の流れ

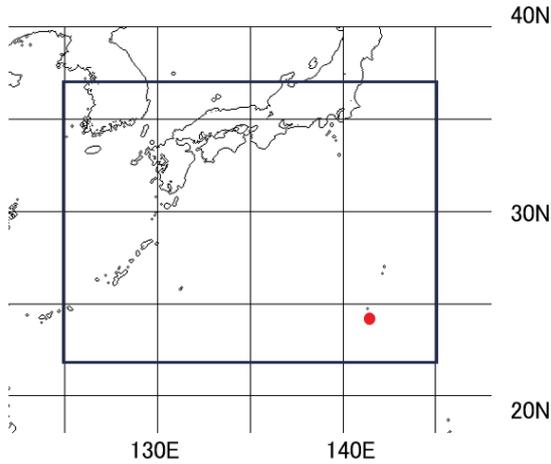


図2 解析対象領域と福徳岡ノ場(赤丸)

3.3 使用衛星データ

使用衛星データは、図1の解析手順に示したように以下の2つの解析に対して、それぞれLANDSAT-8/OLI・TIRSデータとGCOM-C/SGLIデータを適用した。

- 1) 漂流軽石の分光反射特性に基づく抽出手法の開発
- 2) 開発された抽出手法を適用した漂流軽石の時系列分布抽出と移動計測

表1にLANDSAT-8/OLI・TIRSデータとGCOM-C/SGLIデータの観測諸元の比較を示す(U.S.Geological Survey, 2019, 2023a; 宇宙航空研究開発機構, 2019, 2023a)。

(1) LANDSAT-8/OLI・TIRSデータ

LANDSATは米国の地球観測衛星で、1972年以来現在までに8機打ち上げられ(打ち上げ失敗の6号機を除く)、継続的にほぼ全地球を観測したデータをアーカイブしている。現在は主に8, 9号機が運用されており、搭載センサーのOLI (Operational Land Imager) により観測が続けられている。

OLIは、同一地域の観測が16日ごとであるものの、185km幅の観測域を空間分解能30mにより、可視光線域から短波長赤外線域までを7バンド(波長帯)に分けてデータを取得し、熱赤外線域データも空間分解能100mの2バンドで観測している(表1)。このため、特に可視光線域から短波長赤外線域の分光反射特性を調査するのに適している(以下「OLIデータ」とする)。

本研究では、対象物の詳細抽出が可能な比較的高い空間分解能と、多波長域の分光反射特性の観測特性のため、本データを用い漂流軽石抽出のための適正バンドと

実際の抽出手法の検討を行った。使用データの検索・入手は、米国Geological SurveyのEarthExplorer (U.S. Geological Survey, 2023b) により行った。

(2) GCOM-C/SGLIデータ

GCOM-C (Global Change Observation Mission-Climate 1:「しきさい」) は日本の打ち上げた地球環境変動観測ミッションのひとつで、水循環変動の観測を行うことを主目的とした人工衛星である。搭載されたセンサーのSGLI (Second-generation Global Imager) により全球の観測が行われている(以下「SGLIデータ」とする)。

SGLIは、1150km幅の観測域で空間解像度250から1000mにより、可視光線域から短波長赤外線域および熱赤外線域までを19チャンネル(波長帯)に分けてデータを取得している。このうちの多くがOLIと同一の波長帯に対して250m空間解像度で観測している。空間解像度はOLIに比べてやや低下するが、観測幅が1150kmと広い(表1)、同一地点を2~3日に1度、観測が可能で、より頻度の高い時系列の調査に適用される。

本研究では、この中間分解能で比較的観測頻度が高く、OLIと同一かつ多波長域を有する観測特性に基づき、漂流軽石とその移動追跡の時系列解析を行った。使用データの検索と入手は、宇宙航空研究開発機構の地球観測衛星データ提供システム(G-Portal) (宇宙航空研究開発機構, 2023b) により行った。

表1 LANDSAT-8/OLIとGCOM-C/SGLIの観測諸元の比較

LANDSAT-8/OLI・TIRS			GCOM-C/SGLI			
回帰日数	16日		回帰日数	34日		
観測幅	185 km		観測幅	1150 km		
観測時	10:00-10:15		観測時	10:15-10:45 ※1		
バンド	波長帯 (μm)	空間分解能 (m)	チャンネル	中心波長 (μm)	波長幅 (nm)	空間分解能 (m)
			VN1	0.380		250
			VN2	0.412	10	250
1	0.435-0.451	30	VN3	0.443	10	250
2	0.452-0.512	30	VN4	0.490	10	250
3	0.533-0.590	30	VN5	0.530	20	250
			VN6	0.565	20	250
4	0.636-0.673	30	VN7	0.6735	20	250
			VN8	0.6735	20	250
			VN9	0.763	12	250
5	0.851-0.879	30	VN10	0.8685	20	250
			VN11	0.8685	20	250
6	1.566-1.851	30	SW3	1.63	200	250 ※2
7	2.107-2.294	60	SW4	2.21	50	1000 ※2
8	0.503-0.676	15				
9	1.363-1.384	30				
10	10.60-11.19	100	T1	10.8	0.74	250
11	11.50-12.51	100	T2	12	0.74	250

※1 公開値 ※2 偏光観測

4. 漂流軽石の抽出方法の解析結果

4.1 漂流軽石の分光反射特性の分析

まず、広範囲の海域を漂流して移動する漂流軽石を検出し、その分布状況を精密に抽出するために、可視光線域から短波長赤外線域までの分光反射のどの波長帯データが有効かの検討を行った。この解析には中高分解能かつ多波長観測のOLIデータを用いた。観測シーンとしては、福徳岡ノ場の噴火直後で比較的まとまった漂流軽石が目視でも容易に確認可能であった2021年8月17日(表2)のシーンとした。

福徳岡ノ場周辺から北西に漂流軽石の分布が認められる解析対象のOLI拡大画像(約90×80km)を図3に示す。福徳岡ノ場は画像内の右下に位置している。この画像は短波長赤外線、近赤外線、可視光線の各バンドによるカラー合成のため、漂流軽石の分布は、画像内北西部に濃青灰色で比較的大きな塊と複数の線状パターンとして判読できる。

福徳岡ノ場からの漂流軽石は、ほとんどが太平洋の海域を漂流移動したと考えられ、福徳岡ノ場付近および沖縄諸島付近を除けば、画像内に分布するのは漂流軽石を除けばほとんどが海水と雲である。このため、対象のOLIの各観測波長帯(バンド)の、漂流軽石、海水、雲、および島(硫黄島)の分光反射特性の分布を計測し比較検討を行った。図4のグラフには、対象項目である漂流

表2 使用したOLIデータの観測日時

パス-ロウ	観測年/月/日	観測開始時	観測終了時
104-043	2021/8/17	01:00:22 (UTC)	01:00:54 (UTC)

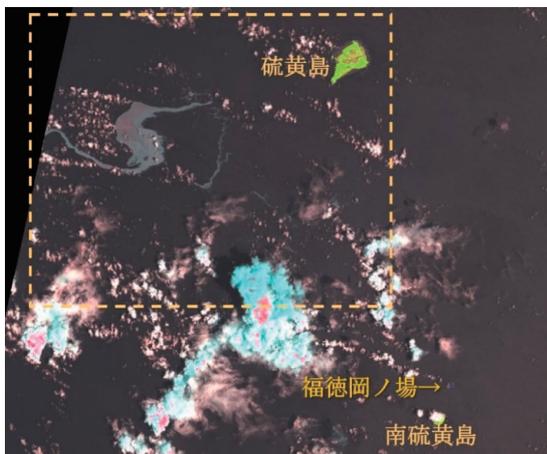


図3 福徳岡ノ場(右下)と漂流軽石分布(左上)を捉えた8月17日のOLIカラー画像 [RGB:バンド6,5,3]

軽石、島(硫黄島)、海水、雲の分光反射に対応するデジタル(DN)値の上限(最大)値と下限(最低)値の範囲を、それぞれ太い実線(赤色)、細い実線(緑色)、破線、点線で示してある。ここで、OLIデータは12ビットデータで配布されるが、本対象地域では主に漂流軽石と、海水、雲に限られことから、データ操作が容易な8ビットデータに容量を減らして解析を行った。

各項目の分光反射特性のうち、漂流軽石(赤色)は、特に限られた上限値と下限値のデータ分布範囲を示していた。具体的には、DN値分布の上限値と下限値間を矢印で表示したバンド3, 4, 5, 6(可視光線の緑と赤、近赤外線、短波長赤外線に対応)において、他の項目のDN値と分布が独立して重なっていない。また、及川ほか(2022)によれば、福徳岡ノ場を期限とする漂流軽石の特徴の見た目は「白色から黄みがかった灰色」とされており、図4の可視光線域の緑から短波長赤外線域(バンド3から6)が海水より高いことと一致すると考えられる。したがって、これらの特徴的なバンドのDN値の分布範囲に属する画素を抽出する解析操作で、漂流軽石が抽出できる。

4.2 LANDSAT/OLIデータによる漂流軽石の抽出

漂流軽石の分光反射特性は複数のOLIバンドにおいて特徴的な値を示すことが明らかとなったため、その各バンドのDN値分布の条件を満たす画素を抽出するデータ処理で、漂流軽石分布を分類抽出した。その画像処理手法としては、マルチレベルスライス法を適用した。本手法は、予め計測した対象物の各分光反射(バンド)データの上限値と下限値を用いて、全バンドの条件(上限値と下限値内)を満たすDN値の画素をその項目として分類するというものである(日本リモートセンシング学会, 2011)。すなわち、各項目間でDN値分布に重なり

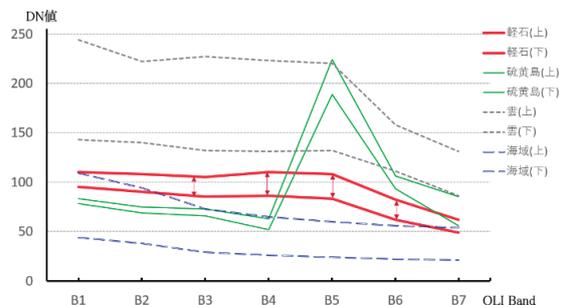


図4 漂流軽石、海域、雲、島(硫黄島)に対するOLIデータ各バンドのDN値分布(上限値と下限値)



図5 OLIデータ(図3)よりマルチレベルスライス法で分類抽出された8月17日の福徳岡ノ場からの噴出漂流軽石の分布

の無いバンドがあれば、独立した対象項目として分類可能である。

OLIデータの図3に黄色の破線の矩形で示した領域内において、実際に、図4の各バンドのDN値の上限値と下限値によりマルチレベルスライス法による処理を行った結果の漂流軽石の抽出画像を図5に示す。この8月17日の抽出結果では、漂流軽石分布が大きなまとまりと、複数の線状あるいは小さな点状の分布として明瞭に分類抽出された。

5. SGLIデータによる漂流軽石分布の時系列解析

5.1 SGLIシーンの検索とデータ入手

OLIデータの複数バンドにマルチレベルスライス法を適用することにより、漂流軽石の分布を明瞭に分類抽出することができた。この結果より、同データと同一波長帯のチャンネルを有し、空間分解能がやや劣るが観測頻度のはるかに高いSGLIデータにおいても、同様の抽出が可能と考えられた。

日々移動する漂流軽石を、SGLIデータで時系列に抽出するため、まず、地球観測衛星データ提供システム(G-Portal)の機能によりSGLI画像内の漂流軽石分布を判読し、抽出解析が可能なシーンの選定を行った。データは、ブラウザ画像の判読で時系列の漂流軽石の抽出が可能と考えられた表3に示す20シーンである。選定後、G-Portalの機能により、幾何学補正およびフォーマット変換までが行われたSGLIデータを入手した。

5.2 SGLIデータによる漂流軽石の抽出処理

漂流軽石の解析のためのSGLIデータは、表1に淡黄色で示したOLIのバンド1～6とほぼ同じ波長帯である

表3 使用したSGLIデータとその観測日時

シーン番号	観測日 (年/月/日)	観測開始時 (UTC時:分:秒)	観測終了時 (UTC時:分:秒)
①	2021/08/17	01:08:34.04	01:13:21.72
②	2021/08/20	01:29:21.43	01:34:09.12
③	2021/08/21	01:02:38.27	01:07:25.96
④	2021/08/24	01:23:25.59	01:28:13.27
⑤	2021/08/27	01:44:12.84	01:49:00.53
⑥	2021/08/28	01:17:29.62	01:22:17.31
⑦	2021/09/01	01:11:33.53	01:16:21.21
⑧	2021/09/04	01:32:20.61	01:37:08.30
⑨	2021/09/07	01:53:07.65	01:57:55.34
⑩	2021/09/08	01:26:24.36	01:31:12.04
⑪	2021/09/12	01:20:27.95	01:25:15.64
⑫	2021/09/15	01:41:14.79	01:46:02.47
⑬	2021/09/20	01:08:34.84	01:13:22.53
⑭	2021/09/23	01:29:21.53	01:34:09.22
⑮	2021/09/26	01:50:08.14	01:54:55.83
⑯	2021/09/27	01:23:24.70	01:28:12.39
⑰	2021/10/01	01:17:27.74	01:22:15.43
⑱	2021/10/07	01:59:00.49	02:03:48.17
⑲	2021/10/15	01:47:05.66	01:51:53.35
⑳	2021/10/26	01:55:56.06	02:00:43.75

VN3,4,6,7,10およびSW3の6チャンネル(CH)とし、サングリッタの影響が認められた場合は、その影響を低減させるために熱赤外線チャンネルのT1(OLIのB10)も適用した。なお、OLIおよびSGLIデータの観測時間は、両者ともに地方時10時から11時(UTC 1:00から2:00)頃である。

解析処理では、まずOLIと同観測日(8月17日)のSGLIカラー合成画像(図6)において、使用チャンネルのDN値分布を確認後、マルチレベルスライス法により漂流軽石を分類抽出した。その結果、図6において淡青色で確認される漂流軽石分布は図7のように抽出された。この結果では、OLIによる限られた観測幅(185km)では捉えきれなかった、より広域に広がった漂流軽石の分布が検出され、漂流軽石の分布と推移の把握が可能であることが確かめられた。ただし、空間解像度が250mであるため、抽出の難しい小規模な漂流軽石もあった。

5.3 SGLI観測画像毎の漂流軽石抽出結果

第5.2節の漂流軽石抽出結果に基づき、対象とした20シーンのSGLIデータに対し、漂流軽石の抽出解析を行った。各シーンの抽出された漂流軽石分布の画像を図8に①から⑳として示す。各抽出画像範囲は、東西2度15分、

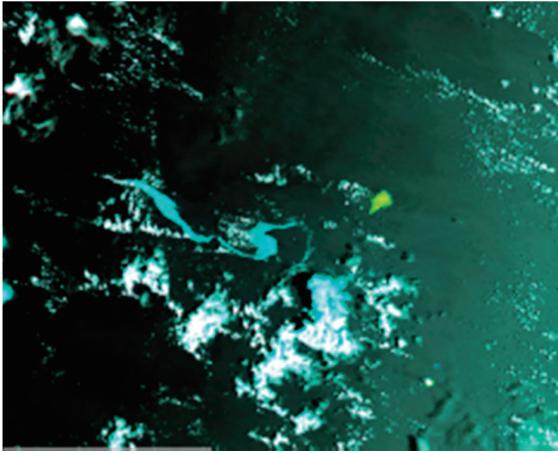


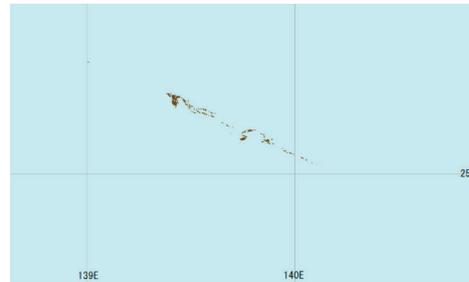
図6 解析に使用した8月17日のSGLIデータのカラー合成画像 (RGB: チャンネルSW3,NV10,VN6)



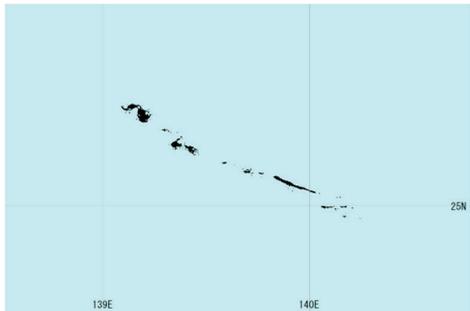
図7 SGLIデータ(図6)よりマルチレベルスライス法で分類抽出された8月17日の福徳岡ノ場からの漂流軽石分布



① 8月17日



② 8月20日



③ 8月21日



④ 8月24日



⑤ 8月27日



⑥ 8月28日

図8 SGLIデータより抽出された各シーンの漂流軽石分布 (1/3)

時系列衛星データによる2021年福徳岡ノ場からの漂流軽石抽出と追跡解析

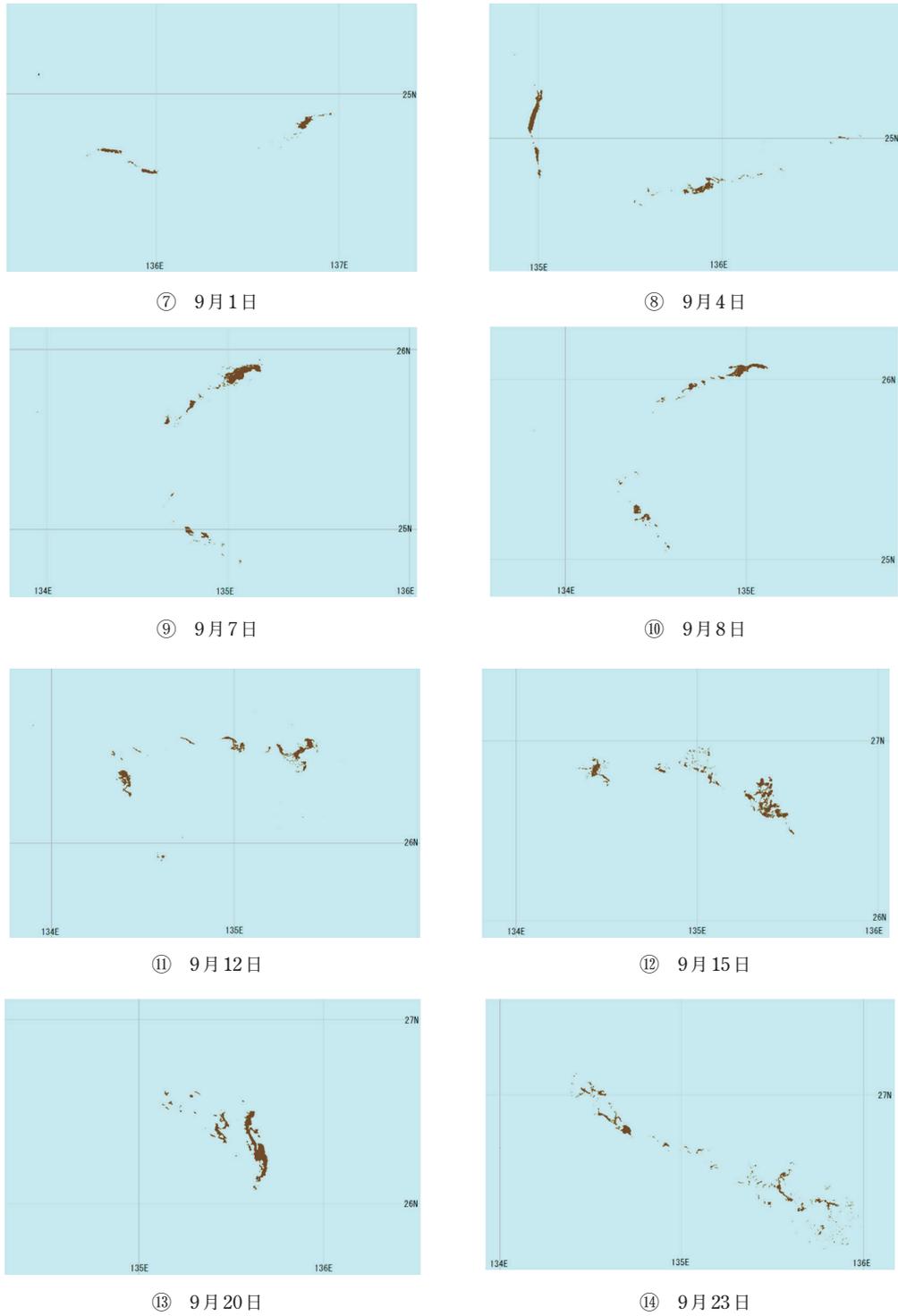


図8 SGLIデータより抽出された各シーンの漂流軽石分布 (2/3)

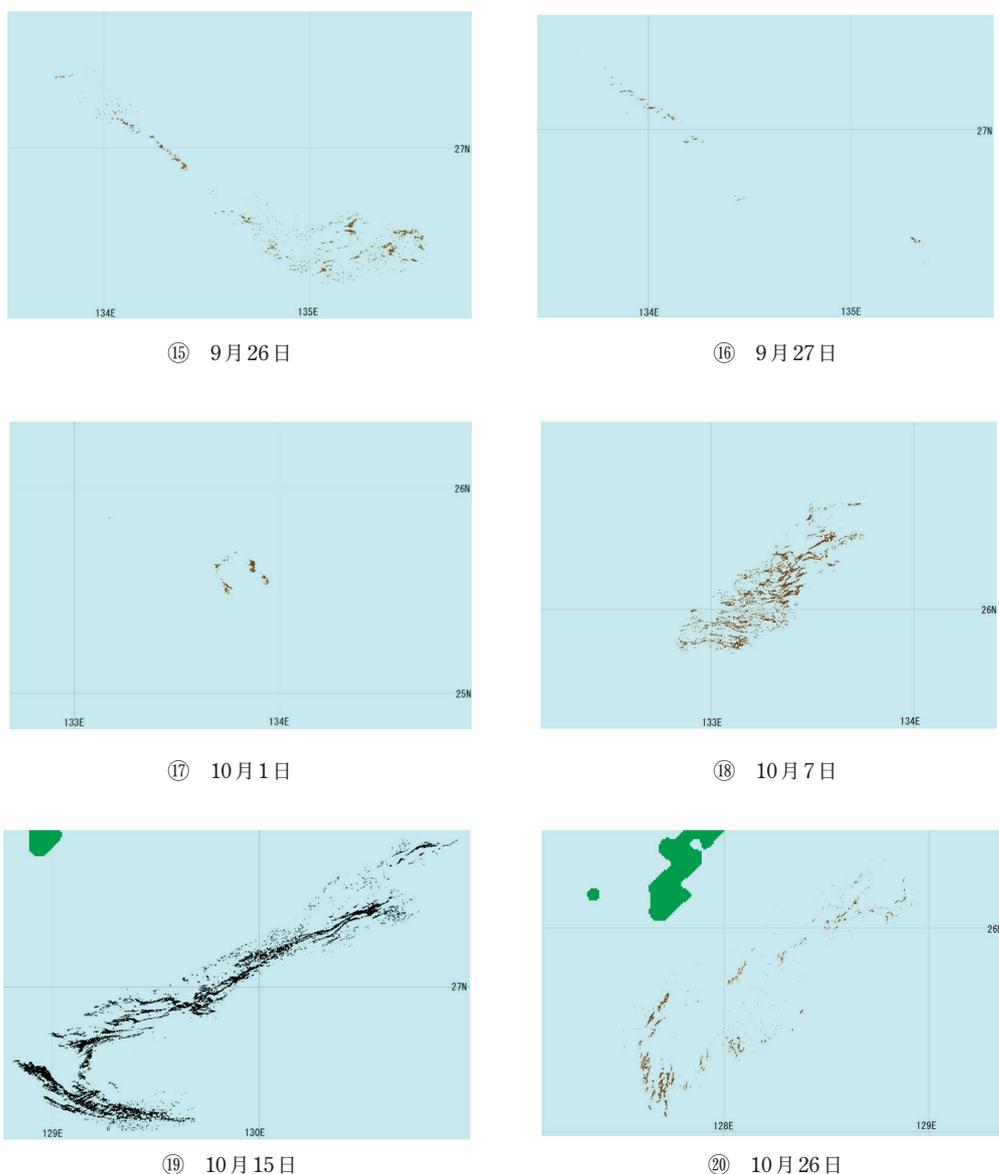


図8 SGLIデータより抽出された各シーンの漂流軽石分布 (3/3)

南北1度30分である。これらのうち9月1日 (⑦), 9月8日 (⑩), 9月27日 (⑬), 10月1日 (⑰) のシーンはやや雲の被覆が多く、抽出にその影響もあったと考えられる。

また、各時期 (①~⑳) の漂流軽石の異なる配色による分布と、各時期の漂流軽石の移動による最西端の位置を矢印で表した画像を図9に示す。これらの結果によれば、福徳岡ノ場から移動を始めた漂流軽石は、当初、西方向に分布域を細長く線状に広げながら移動していたが、9月1日から15日にかけては北に移動方向を変えて、

その後、東寄り、そして西寄りへと複雑に移動方向を変化させた。さらに9月27日からは南下し、10月1日より再び西へ向かって移動を続けて、最終的に10月中旬以降、沖縄付近に到達したことが示された。

5.4 漂流軽石の漂流移動状況の計測結果

漂流軽石の分布抽出の画像 (図8および9) より、各漂流時の分布最西端の座標 (緯度経度) を計測し、抽出期間ごとの移動方向と距離、漂流の速度 (時速) をまとめた結果を表4に示す。漂流方向はE,W,S,N (東西南北) で

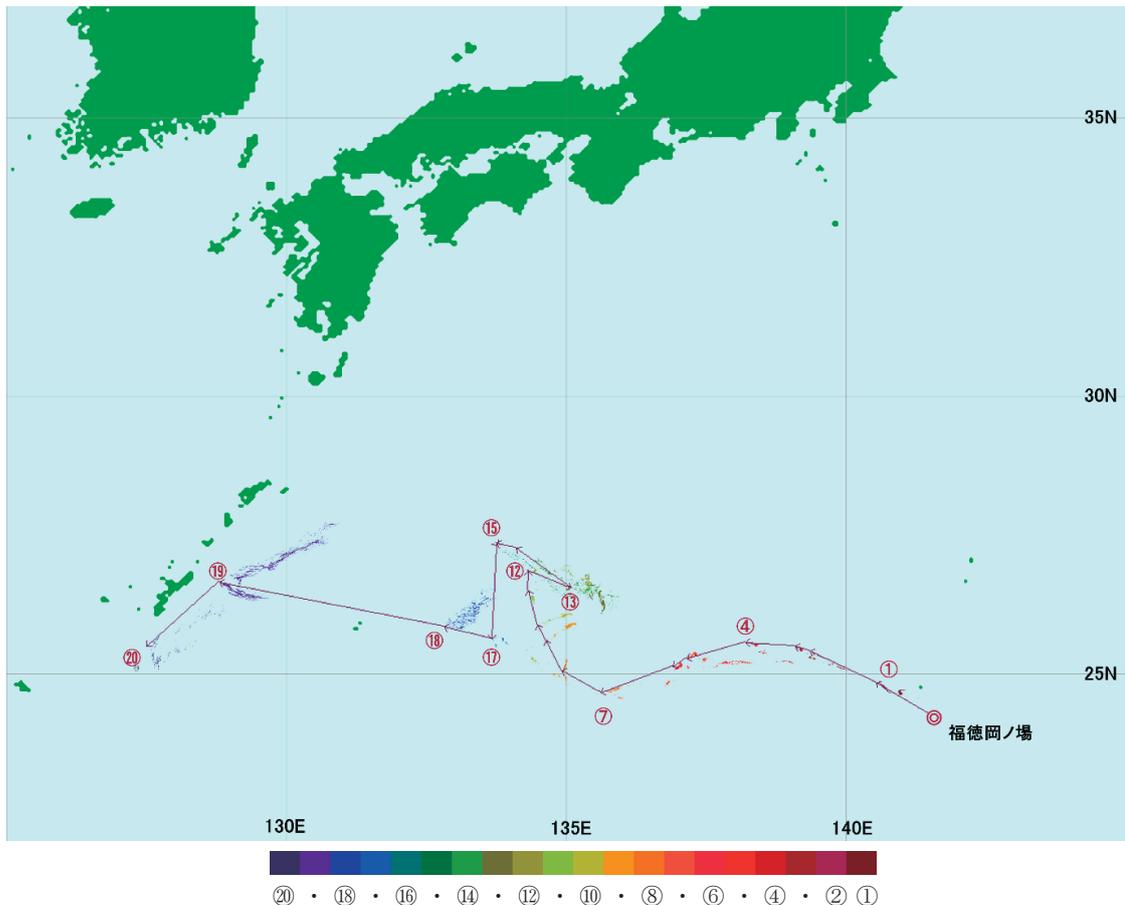


図9 SGLIデータより抽出された8月17日から10月26日までの漂流軽石の移動状況(◎は福徳岡ノ場)、計測日ごとにカラーバーの配色で漂流軽石の分布を表してある。

表した。また、漂流移動距離は、測定された2地点間の緯度経度を地球球面の歪みの影響の少ないUTM座標に変換し求めた。さらに、漂流移動速度は、各SGLIデータの観測がほぼ同時刻とし、計測期間を日数×24時間として求め、最終的に時速として示した。全74日間の漂流移動速度は、ほぼ約0.5km/hから2km/hの範囲で、平均速度としては約1.15km/hと求められた。

6. 漂流軽石の漂流移動状況のまとめ

6.1 漂流軽石分布と移動状況の詳細把握

2021年の福徳岡ノ場からの漂流軽石の南西諸島方面への移動状況については、及川ほか(2023)によれば、北大東島や南大東島を経て、10月10日から14日に奄美大島や沖縄本島などに漂着したとされているが、途中の漂流状況の記載は僅かである。

本研究による時系列SGLIデータの解析結果では、福徳岡ノ場から沖縄諸島に至る海域における漂流軽石の移

動状況の詳細が示された。8月13日の福徳岡ノ場からの噴出以降、漂流軽石は9月上旬まではほぼ西方に向かって漂流して移動したが、9月4日頃より方向を北に変えて、その後、9月末まで、北、東、西、そして南方へと複雑に方向を変えて移動し、10月初めより再び西へ向かい、10月中旬に沖縄本島(南西諸島)に到達した。特に、東経135度から133.5度までの海域にて複雑で特徴的な移動が示された。福徳岡ノ場から沖縄本島までは約1380kmあり、10月15日頃、福徳岡ノ場の噴火から約63日後に沖縄本島付近に到達した(表3)。この間の平均漂流移動速度は約1.15m/hと算出されたが、実際には両地点間の最短距離に対して13日程度多く日数を要していた。この遅れは、上述の途中での北方向への一時的な漂流移動方向の変更によるものと考えられた。

表5には、各SGLIデータによる漂流軽石の位置計測時の移動方向(表4の一部を参照)と、その時点の海流の方向、北大東(北大東島)および父島における風向を

表4 SGLIデータによる各漂流軽石の分布最西端の座標および抽出期間ごとの移動方向、距離、移動速度

計測番号	月/日	噴火後経過日	期間日数	緯度(北緯)〔度〕	経度(東経)〔度〕	移動方向	漂流移動距離〔km〕	移動速度〔km/h〕
福岡ノ場	8/13	0	—	24.28129	141.4833	—	—	—
①	8/17	4	4	24.8417	140.55413	WNW	112.71	1.174
②	8/20	7	3	25.40837	139.3583	WNW	135.92	1.888
③	8/21	8	1	25.4792	139.09164	WNW	27.95	1.165
④	8/24	11	3	25.54795	138.21247	W	88.73	1.232
⑤	8/27	14	3	25.26462	137.16039	WSW	110.44	1.534
⑥	8/28	15	1	25.12087	136.92081	WSW	28.93	1.205
⑦	9/1	19	4	24.65837	135.62498	WSW	140.57	1.464
⑧	9/4	22	3	25.05837	134.93956	NW	82.20	1.142
⑨	9/7	25	3	25.58962	134.64789	NNW	65.74	0.913
⑩	9/8	26	1	25.87295	134.50206	NNW	34.62	1.443
⑪	9/12	30	4	26.48545	134.32914	NNW	70.00	0.729
⑫	9/15	33	3	26.8417	134.32498	N	39.46	0.548
⑬	9/20	38	5	26.53962	135.09164	ENE	83.29	0.694
⑭	9/23	41	3	27.24586	134.10831	NW	125.12	1.738
⑮	9/26	44	3	27.33753	133.76248	WNW	35.70	0.496
⑯	9/27	45	1	27.30211	133.78748	S	4.64	0.193
⑰	10/1	49	4	25.62503	133.68123	S	186.08	1.938
⑱	10/7	55	6	25.82712	132.82915	WNW	88.39	0.614
⑲	10/15	63	8	26.63128	128.81665	WNW	410.64	2.139
⑳	10/26	74	11	25.48962	127.51249	SW	181.68	0.688

示した。海流は気象庁で公開されている「日本近海の海流解析図」(気象庁, 2023a)より読み取ったものであり、風向は同じく気象庁のアメダスデータ(気象庁, 2023b)によるものである。図10, 11, 12には代表的な漂流軽石の移動解析日(8月17日, 9月7日, 10月7日)の日本近海の海流解析図(気象庁, 2023a)であるが、それぞれ漂流軽石分布域において、西方向, 北方向, 西方向への海流を示している。表5の漂流移動方向, 海流方向, 風速と、図10, 12内の赤印範囲内の海流方向の比較より、漂流軽石は西方向への海流と風向に強く影響されて移動したことが分かる。9月上旬から9月末までの北方向ほかへの複雑な移動についても、図11内の赤印範囲内で北への海流が示され、その影響を受けたことが考えられた。

また、図13に示す気象庁公開の「過去の台風資料」(気象庁, 2023c)によれば、9月下旬の漂流軽石の移動域(赤印内)のやや東を台風16号が通過していた。この台風は漂流軽石の分布海域近傍を通過した9月30日9時時点では大型で非常に強かった(中心気圧935hPa, 最大風速45m/s, 暴風域半径280km)ことから、複雑な漂流軽石の移動には、海流と共に影響を及ぼしたことが推察された。

6.2 漂流軽石抽出とその追跡方法の課題

本研究では、時系列の光学センサデータを解析して漂流軽石の分布と移動状況の詳細把握を目指して、まず中高分解能衛星搭載センサ(OLI)データにより、海上の漂流軽石の抽出手法を検討、開発を行った。続いて、広域にわたり同一地域を高頻度で繰り返し観測可能なSGLIによる時系列データを解析し、実際に漂流軽石分布の抽出と移動状況の追跡を行い、その推移を詳しく示した。しかし、光学センサデータは、雲被覆状況の影響を強く受けており、特に、10月のデータは雲被覆が多く、解析に適した良好なデータの入手が必ずしも十分ではなかった。そのため、漂流軽石の移動の詳細検出に影響が少なからず認められた。また、今回の解析シーンの中には海面で反射された太陽直達光であるサングリッタの影響で抽出に影響が出たものもあった。今後は、より正確な自動抽出解析手法の開発や、光学センサデータとは異なるマイクロ波の合成開口レーダ(SAR)データによる抽出の可能性についての検討も必要と考えられた。

7. まとめ

本研究では、これまで十分には行われていなかった福岡ノ場から沖縄本島付近に至る海域における漂流軽石

表5 漂流軽石位置計測時の漂流移動方向と海流方向、北大東および父島における風向の比較 (気象庁, 2023a, 2023b)

番号	月日	軽石漂流方向	海流方向	風向	
				北大東	父島
福徳岡ノ場	8/13	—	NNW	S	SE
①	8/17	WNW	NNW	SSE	SE
②	8/20	WNW	WSW	SE	SE
③	8/21	WNW	W	ESE	ENE
④	8/24	W	W	SSE	ENE
⑤	8/27	WSW	WSW	E	N
⑥	8/28	WSW	W	E	N
⑦	9/1	WSW	WSW	ESE	SSE
⑧	9/4	NW	NW	SE	SW
⑨	9/7	NNW	N	ENE	NNW
⑩	9/8	NNW	N	ESE	SE
⑪	9/12	NNW	NEN	SE	ENE
⑫	9/15	N	NEN	SW	SSW
⑬	9/20	ENE	NE	NNE	SSW
⑭	9/23	NW	NW	NE	SE
⑮	9/26	WNW	NW	ENE	ENE
⑯	9/27	S	NE	NE	ENE
⑰	10/1	S	SW	WNW	SSW
⑱	10/7	WNW	W	E	ENE
⑲	10/15	WNW	W	ENE	ENE
⑳	10/26	SW	WNW	NNE	NNE

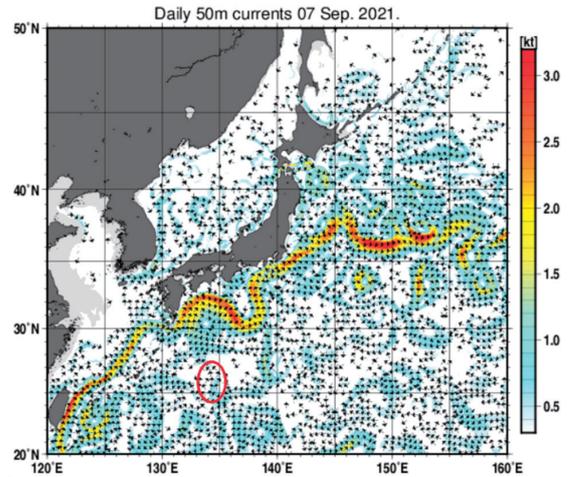


図11 9月7日の日本近海の日別海流解析図 [(気象庁, 2023a) に加筆]

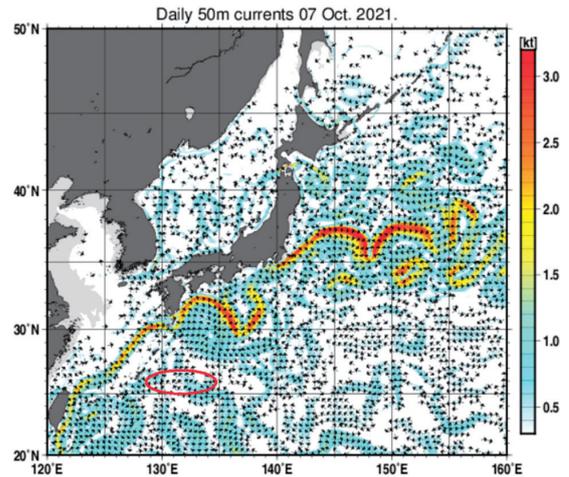


図12 10月7日の日本近海の日別海流解析図 [(気象庁, 2023a) に加筆]

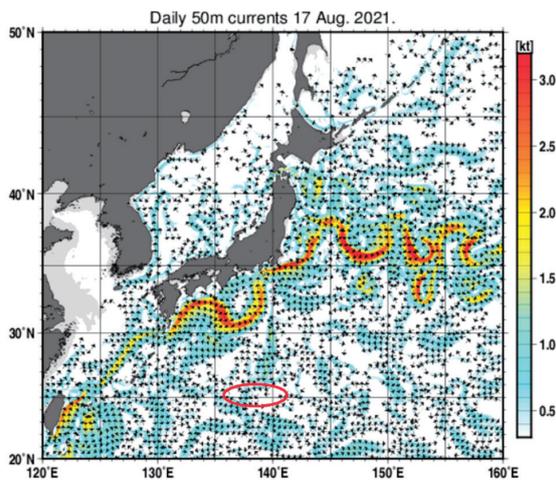


図10 8月17日の日本近海の日別海流解析図 [(気象庁, 2023a) に加筆]

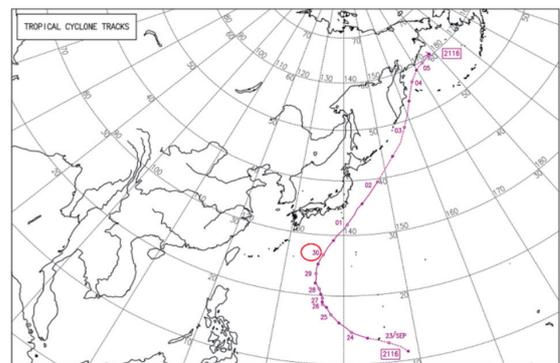


図13 2021年の台風16号の9月23日から10月6日までの台風経路図 [(気象庁, 2023c) に加筆]

の分布と移動状況について、人工衛星光学センサデータを用いたその抽出と追跡手法の開発、そしてその手法を適用して、時系列に漂流軽石の漂流移動状況の把握と分析を詳細に行うことを目指した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 中高空間分解能の人工衛星LANDSAT-8/OLI・TIRSデータを用いて、海上の漂流軽石の抽出手法の検討を行った結果、可視光線域から短波長赤外線域までのマルチバンドの反射データの特性に基づき、マルチレベルスライス法による解析で漂流軽石の抽出が可能であることが示された。
- (2) 漂流軽石の良好な抽出が確かめられたマルチレベルスライス法を、観測頻度の高いGCOM-C/SGLIの時系列マルチチャンネルデータに適用し、福徳岡ノ場から沖縄諸島に至る海域における漂流軽石の抽出と移動の追跡を詳しく行うことができた。

- (3) 漂流軽石は福徳岡ノ場から沖縄本島付近まで平均約1.15km/hで、当初、西方に向かって漂流移動し、10月中旬に沖縄本島付近に到達したことが分かったが、途中海域において、一時的に北へ向かうなどの複雑な漂流移動状況を示していたことが分かった。
- (4) 漂流軽石は、公開された海流や風向のデータから、それらの影響を強く受けて移動したことが示され、漂流移動する海域付近の台風通過の影響も推察された。

謝辞

本研究では、遠藤邦彦日本大学名誉教授から火山学の観点からの多くのご意見をいただいた。また、衛星データの解析、特に光学センサデータと合成開口レーダデータの解析に関するコメントを国立研究開発法人水産研究教育機構の高崎健二博士より、さらに移動ベクトル描画方法について日本大学生産工学部の杉村俊郎特任教授にご協力をいただいた。ここに合わせて感謝を表します。

引用文献

- 伊東聖永, 作野裕司 (2022) : GCOM-C SGLI データを利用した福徳岡ノ場由来漂流軽石検出法の検討, (一社) 日本リモートセンシング学会 第73回学術講演会論文集, pp.151-152.
- 及川輝樹, 石塚 治, 鈴木克明, 草野有紀, 岩橋くるみ, 池上郁彦, Christopher Conway, 山崎誠子, 東宮昭彦 (2022), 福徳岡ノ場火山 2021 年噴火と軽石の漂流, GSJ 地質ニュース Vol. 11 No. 3, pp.65-72.
- 及川輝樹, 池上郁彦, 渡部将太 (2023) : 多量の漂流軽石を発生させる噴火 - 南西諸島における軽石の漂着記録とその供給火山の活動から, 火山68 (3), pp.171-187.
- 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (2019) : GCOM-C プロダクト利用の手引き (入門編), GCOM-C_Products_Users_Guide_entrylevel_jp.pdf (jaxa.jp), (閲覧日: 2023.5.1).
- 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (2021) : 沖縄本島に接近・漂着している軽石の衛星観測情報, <https://earth.jaxa.jp/ja/earthview/2021/10/29/6510/index.html>, (閲覧日: 2023.9.5).
- 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (2022) : 衛星「しきさい」(GCOM-C) 等による軽石観測情報, <https://earth.jaxa.jp/karuishi/>, (閲覧日: 2023.8.1).
- 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (2023a) : 地球観測衛星しきさい (GCOM-C), https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/index_j.html, (閲覧日: 2023.9.5).
- 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (2023b) : 地球観測衛星データ提供システム (G-Portal), <https://gportal.jaxa.jp/gpr/>, (閲覧日: 2023年9月5日).
- 沖縄県 (2023) : 沖縄県への軽石大量漂着・漂流について, <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/kankyo/seibi/ka-ruishihyoutyaku.html>, 更新日2023年3月14日.
- 海上保安庁 (2023) : 漂流軽石に係る確認状況について, <https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/topics/post-864.html>, (閲覧日: 2023年9月7日).
- 海上保安庁海洋情報部 (2023) : 海域火山データベース, <https://www1.kaiho.mlit.go.jp/kaiikiDB/kaiyo24-2.html>, 更新日2023年6月26日, (閲覧日: 2023年9月7日).
- 国立研究開発法人海洋研究開発機構 (2021) : 福徳岡ノ場の噴火と海流による影響について (最新シミュレーション), https://www.Jamstec.go.jp/j/jamstec_news/20211116/, (閲覧日: 2023年9月7日).
- 国立研究開発法人海洋研究開発機構 (2022) : 福徳岡ノ場の爆発的な噴火の原因を明らかに: 多様な漂着軽石からの解説 (プレスリリース), https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20220210/, (閲覧日: 2023年9月7日).
- 金田真一, 千葉達朗 (2022) : 福徳岡ノ場海底火山噴火に伴う浮遊軽石の調査, 写真測量とリモートセンシング, 61 (4), pp.188-189.
- 気象庁 (2021) : 福徳岡ノ場の火山活動解説資料 (令和3年3月), pp.1-5, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/tokyo/21m10/331_21m10.pdf
- 気象庁 (2023a) : 各種データ・資料 日別海流, https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/db/kaikyo/daily/current_HQ.html, (閲覧日: 2023.8.1).
- 気象庁 (2023b) : 各種データ・資料 過去の地域平均気象データ 検索, <https://www.data.jma.go.jp/cpd/cgi-bin/view/index.php>, (閲覧日: 2023.8.1).
- 気象庁 (2023c) : 各種データ・資料 台風経路図 令和3年 (2021年), https://www.data.jma.go.jp/yoho/typhoon/route_map/bstv2021.html, (閲覧日: 2023.8.1).
- 田村芳彦, 吉田健太, アイオナマッキントッシュ, 常青, 佐藤智紀, 羽生毅, 小野重明 (2021) : 福徳岡ノ場から2021年8月に噴火した軽石 (速報), 日本火山学会講演予稿集, 2021巻, p.122.
- 産業技術総合研究所地質総合センター (2021) : 福徳岡ノ場火山2021年, <https://www.gsj.jp/hazards/volcano/fuku>

- tokuokanoba/2021/index.html, 更新日2021年12月28日, (閲覧日:2023年9月8日).
- 特定非営利活動法人首都圏地盤解析ネットワーク (GaNT) (2023): 福徳岡ノ場から海底噴火, <https://www.npogant.com/地盤なう/火山/福徳岡ノ場噴火/>, (閲覧日:2023年9月8日).
- 日本リモートセンシング学会編 (2011): 基礎からわかるリモートセンシング, 理工図書株, pp.241-242.
- Kenta Yoshida, Yoshihiko Tamura, Tomoki Sato, Takeshi Hanyu, Yoichi Usui, Qing Chang, Shigeaki Ono (2022): Variety of the drift pumice clasts from the 2021 Fukutoku-Oka-no-Ba eruption, Japan, Island Arc, pp.1-17.
- U.S. Geological Survey (2019): Landsat 8 Data Users Handbook, [LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook-v5.0.pdf](https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8).
- U.S. Geological Survey (2023a): Landsat 8, <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>. (accessed August 30, 2023).
- U.S. Geological Survey (2023b): EarthExplorer, <https://earthexplorer.usgs.gov/>. (accessed: August 15, 2023).