

福德岡ノ場 2021 年噴火起源軽石の漂着量とサイズの時間変化： 神奈川県天神島の例

柴田健一郎*・小長谷美沙*・新城竜一**

Temporal variation in amount and size of the drift pumice from the 2021 eruption of Fukutoku-Oka-no-Ba submarine volcano: an example from the Tenjin-jima, Kanagawa Prefecture, central Japan

SHIBATA Kenichiro*, KOHASE Misa* and SHINJO Ryuichi**

キーワード：漂着軽石，福德岡ノ場，2021年，天神島

Key words : drift pumice, Fukutoku-Oka-no-Ba submarine volcano, 2021, Tenjin-jima

福德岡ノ場 2021 年噴火で放出された軽石の運搬・漂着過程を明らかにするため、神奈川県横須賀市天神島の海岸において 2021 年 11 月 23 日から 2022 年 10 月 5 日まで漂着軽石を採集した。微小部蛍光 X 線分析の結果、福德岡ノ場起源の軽石が天神島に初めて漂着したのは 2021 年 12 月 5 日であることが明らかとなった。それ以降、軽石は継続的に採集され、漂着する軽石の量は時間経過に伴って増減を繰り返した。最も多くの軽石が採集されたのは 2022 年 7 月下旬から 8 月上旬であった。軽石の漂着は、黒潮分枝流の消長と風の変動に大きな影響を受けたと解釈される。また、軽石の漂着量と軽石の長軸の長さには正の相関が認められたため、大きな軽石は長く漂流する可能性が考えられる。天神島の事例は、噴火から約 1 年程度経過しても、軽石漂着のピークが現れる可能性があることを示している。

In order to reveal transport and drift processes of pumice clasts derived from the 2021 eruption of Fukutoku-Oka-no-Ba submarine volcano, drift pumice samples were collected on the beach of the Tenjin-jima, Yokosuka City, Kanagawa Prefecture, central Japan. The μ -XRF (micro-focus X-ray fluorescence) analyses of pumices confirmed that these pumices have composition identical to pumices from the Fukutoku-Oka-no-Ba, suggesting that an arrival date of the drift pumice at Tenjin-jima was December 5, 2021. After that, the pumice samples have been collected continuously. The amount of the samples indicates temporal increases and decreases repeatedly. The maximum amount of the drift pumice samples was collected from late July through early August, 2022. The amount of the drift pumice is interpreted to have been controlled by fluctuations of both the Kuroshio Branch Current and the wind conditions. In addition, the amount of the drift pumice samples shows a positive correlation with the length of the major axis of maximum pumice clast, which suggests that the larger pumice clasts travel longer term than the smaller clasts. The example from the Tenjin-jima implies that a peak of pumice drifts would appear in a year after an eruption.

* 横須賀市自然・人文博物館 〒238-0016 神奈川県横須賀市深田台 95

** 総合地球環境学研究所 〒603-8047 京都府京都市北区上賀茂本山 457番地 4

原稿受付 2022年10月10日 横須賀市博物館業績 773号

はじめに

2021年8月13日から8月15日に小笠原諸島南方の海底活火山である福徳岡ノ場で大規模な噴火が発生し、大量の軽石が放出された。軽石は黒潮反流によって10月中旬に南西諸島に漂着し(石橋, 2021; 丸谷, 2021; 長井, 2021; 平峰ほか, 2022; 草野ほか, 2022; 及川ほか, 2022; Yoshida *et al.*, 2022), 船舶の運航や養殖業などに大きな影響を与えた(及川ほか, 2022)。その後、軽石は黒潮に運搬されて本州太平洋岸にも漂着した(平峰ほか, 2022; 草野ほか, 2022; 奥野・鳥井, 2022; 山下ほか, 2022; Yoshida *et al.*, 2022)(第1図)。一方、福徳岡ノ場の1986年の噴火では、放出された軽石が1991年に相模湾岸に漂着したことが明らかとなっている(森ほか, 1992)。このような漂着軽石の記録は、軽石の運搬と漂着過程

を明らかにするために重要な検討材料となる。しかし、福徳岡ノ場2021年噴火起源の軽石について、特定の地点における軽石の漂着時期の記録は蓄積されてきているが、漂着軽石のサイズや漂着量の時間変化については具体的に調べられていない。

横須賀市自然・人文博物館では相模湾に面する付属天神島臨海自然教育園で、軽石の漂着が予想された2021年11月下旬より海岸で軽石の採集を開始した。継続した採集の結果、福徳岡ノ場2021年噴火起源の軽石の漂着量とサイズの時間変化が明らかとなった。本稿ではその調査結果を示すとともに、軽石の漂着過程について考察する。本稿の作成にあたり、柴田は原稿の執筆と研究全体の取りまとめを、小長谷は天神島での軽石の採集を、新城は軽石の分析を主に担当した。

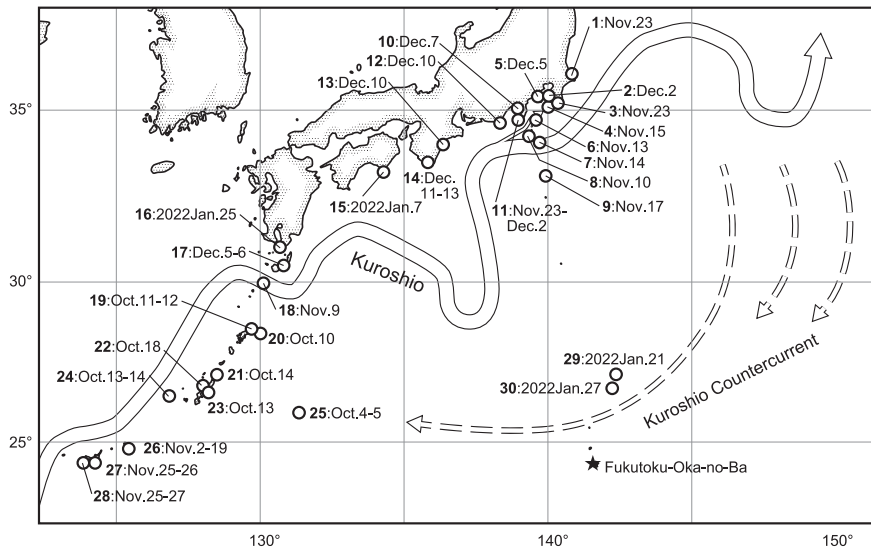


Fig. 1 Arrival dates of drift pumice derived from the 2021 eruption of Fukutoku-Oka-no-Ba submarine volcano. 1: Kashima / Kamisu, 2: Futtsu, 3: Katsuura, 4: South Boso Peninsula / Tateyama, 5: Tenjin-jima (study area), 6: Izu Oshima Island, 7: Miyake-jima Island, 8: Nii-jima / Shikine-jima islands, 9: Hachijo-jima Island, 10: Numazu, 11: South Izu Peninsula / Cape Irozaki, 12: Cape Omaezaki, 13: Owase, 14: Kushimoto, 15: Cape Muroto, 16: Osumi Peninsula, 17: Yakushima / Tanegashima islands, 18: Nakanoshima Island, 19: Amami Oshima Island, 20: Kikai-jima Island, 21: Yoron Island, 22: Okinawa Main Island west coast, 23: Okinawa Main Island east coast, 24: Kume-jima Island, 25: Kitadaito-jima / Minamidaito-jima islands, 26: Miyako-jima Island, 27: Ishigaki-jima Island, 28: Iriomote-jima Island, 29: Chichi-jima Island, 30: Haha-jima Island.

第1図 福徳岡ノ場2021年噴火起源の軽石の漂着時期。1: 茨城県鹿島市/神栖市, 2: 千葉県富津市, 3: 千葉県勝浦市, 4: 房総半島南部/千葉県館山市, 5: 神奈川県横須賀市天神島(調査地), 6: 伊豆大島, 7: 三宅島, 8: 新島/式根島, 9: 八丈島, 10: 静岡県沼津市, 11: 伊豆半島南部/石廊崎, 12: 御前崎, 13: 三重県尾鷲市, 14: 和歌山県串本町, 15: 室戸岬, 16: 大隅半島, 17: 屋久島/種子島, 18: 中ノ島, 19: 奄美大島, 20: 喜界島, 21: 与論島, 22: 沖縄本島西岸, 23: 沖縄本島東岸, 24: 久米島, 25: 北大東島/南大東島, 26: 宮古島, 27: 石垣島, 28: 西表島, 29: 父島, 30: 母島。軽石の漂着時期は草野ほか(2022), Yoshida *et al.* (2022), 本研究のデータに基づく。黒潮の流路は2021年12月9日の海況で、海上保安庁(2021)に、黒潮反流は久保田(2022)に基づく。

福徳岡ノ場起源の軽石の特徴

福徳岡ノ場 2021 年噴火起源の軽石の形態的な特徴は、主に南西諸島に漂着した軽石に基づいて明らかとなっている。これらの軽石には多様性が見られ(丸谷, 2021), 色や表面の亀裂の有無, ガラス光沢の有無などによって *Yoshida et al. (2022)* は 6 種類, 山下ほか (2022) は 7 種類に分類した。一般に, 福徳岡ノ場 2021 年噴火起源の軽石の多くは灰色でよく円磨され, 単斜輝石や斜長石, 黒色ガラスなどからなる黒色の包有物 (black enclave) を斑点状に含むことで特徴づけられる (及川ほか, 2022; 山下ほか, 2022; *Yoshida et al., 2021*) (第 2 図)。福徳岡ノ場の軽石は従来から粗面岩質のアルカリ岩とされ(小坂, 1990), 福徳岡ノ場 2021 年噴火起源の軽石も大部分が全アルカリーシリカ図では粗面岩の領域にプロットされる (及川ほか, 2022; 山下ほか, 2022; *Yoshida et al., 2022*)。

方 法

天神島臨海自然教育園(神奈川県横須賀市佐島 3-7-3)の海岸において, 漂着した軽石を採集した。

天神島の海岸は岩礁, 砂浜, 礫浜からなり, 漂着物が多く採集される砂浜と礫浜で軽石を採集した(第 3 図)。採集期間は 2021 年 11 月 23 日から 2022 年 10 月 5 日までの 317 日間である。天神島臨海自然教育園の休園日は原則採集しなかったが, 教育園スタッフが休園日に出勤した際には採集した。調査日数は延べ 273 日間となる。採集は天神島臨海自然教育園のスタッフが 1 日 2 回の巡回中に採集した。2021 年 11 月から 2022 年 1 月中旬までは, 目視できる軽石のうち, 中礫以上のサイズの軽石をすべて採集した。外観的な特徴と後述の分析に基づき福徳岡ノ場起源の軽石が肉眼で識別できるようになってからは, 福徳岡ノ場起源と判断される中礫以上のサイズの軽石をすべて採集した。

採集した軽石のうち, 2021 年 12 月 3 日, 12 月 5 日, 12 月 7 日に採集されたサンプルについて, (株)堀場テクノサービス(京都市南区)に設置されている(株)堀場製作所製の微小部蛍光 X 線分析装置(XGT-9000)を用いて分析した。照射 X 線の直径は 0.1 mm で, 軽石 1 個につき白色部の任意の 3 点を半定量分析モードで分析し平均化した。なお, 2021 年 12 月 5 日に採集されたサンプルは, 調査地で初めて採集された明瞭な黒色の包有物を含む軽石である。

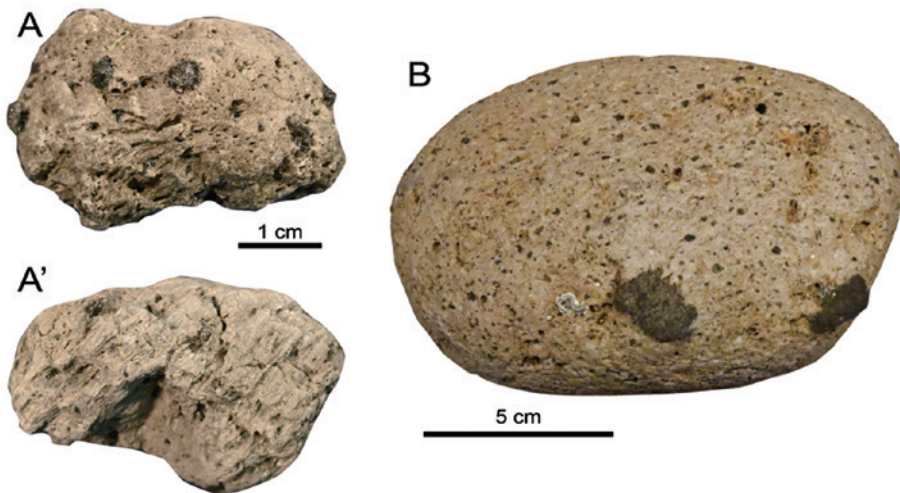


Fig. 2 Pumice clasts derived from Fukutoku-Oka-no-Ba submarine volcano drifted on the Tenjin-jima Island. A (front view) and A' (back view): Collected in 2021 Dec. 18. Sporadic black enclaves, composed of clinopyroxene, plagioclase, and black glasses, are distinguishing feature for Fukutoku-Oka-no-Ba pumices. B: Collected in 2022 Aug. 19. The maximum pumice clast collected in the Tenjin-jima Island.

第 2 図 天神島で採集された福徳岡ノ場起源の軽石。A, A': 2021 年 12 月 18 日採集。A は前面観, A' は背面観。前面には単斜輝石や斜長石, 黒色ガラスなどからなる黒色の包有物が認められる。背面には繊維状に引き延ばされた構造が見られる。B: 2022 年 8 月 19 日採集。天神島で採集された軽石で最大のもの。

福徳岡ノ場起源と判断される軽石は、水洗い後に乾燥させ、採集日毎に重量を計測した。また、漂着した軽石のサイズを検討するため、各採集日で最大の軽石の長軸の長さを計測した。

結 果

微小部蛍光 X 線分析に基づくと、2021 年 12 月 5 日と 12 月 7 日に採集された軽石サンプルは、シリカ (SiO_2) 量が 64.67–65.16 %、全アルカリ ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 量が 10.42–10.87 % の化学組成を示し(第 1 表)、全アルカリ-シリカ図(第 4 図)において福徳岡ノ場 1986 年および 2021 年噴火起源の軽石と類似した範囲にプロットされた。一方、12 月 3 日に採集された軽石サンプルはシリカ量が 75.96 %、全アルカリ量が 5.01 % を示し(第 1 表)、福徳岡ノ場起源の軽石とは異なる範囲にプロットされた(第 4 図)。以上から、2021 年 12 月 5 日と 12 月 7 日に採集された軽石サンプルは福徳岡ノ場起源、12 月 3 日に採集された軽石サンプルは他の火山の噴出物と判断される。

徳岡ノ場起源の軽石は 2021 年 12 月 5 日以降、継続的に採集され、漂着する軽石の量は増減を繰り返

した(第 2 表, 第 5 図)。2021 年 12 月は 7 日と 19 日をピークとする漂着があり、それぞれ 30.9 g と 32.9 g の軽石サンプルが採集された。2022 年 1 月から 2 月前半には漂着量が減少し、軽石が採集されない日も多かった。2 月後半に漂着量が増加し、2 月 18 日に 119.6 g の軽石サンプルが採集された。その後 3 月から 4 月中旬にかけて漂着量が減少したが、4 月下旬から漂着量が大きく増加した。4 月 27 日に 1500.1 g の軽石サンプルが採集され、5 月から 7 月前半にかけて 500 ~ 1100 g 程度のピークを持ちながら漂着量は増減した。7 月後半から 8 月前半は調査期間で最も軽石が漂着した時期で、7 月 20 日には 5389.8 g の軽石サンプルが採集された。8 月後半から 10 月初旬にかけての漂着量は、500 ~ 650 g のピークを持ちながら増減した。採集された最大の軽石の長軸の長さは 143.5 mm で、2022 年 8 月 19 日に採集された。天神島の採集場所(第 3 図)では、南側の浜で多くの軽石が採集された。各調査日に採集された軽石サンプルの乾燥重量と最大軽石の長軸の長さを両対数グラフにプロットすると、乾燥重量と長軸の長さには強い正の相関が認められた(第 6 図)。

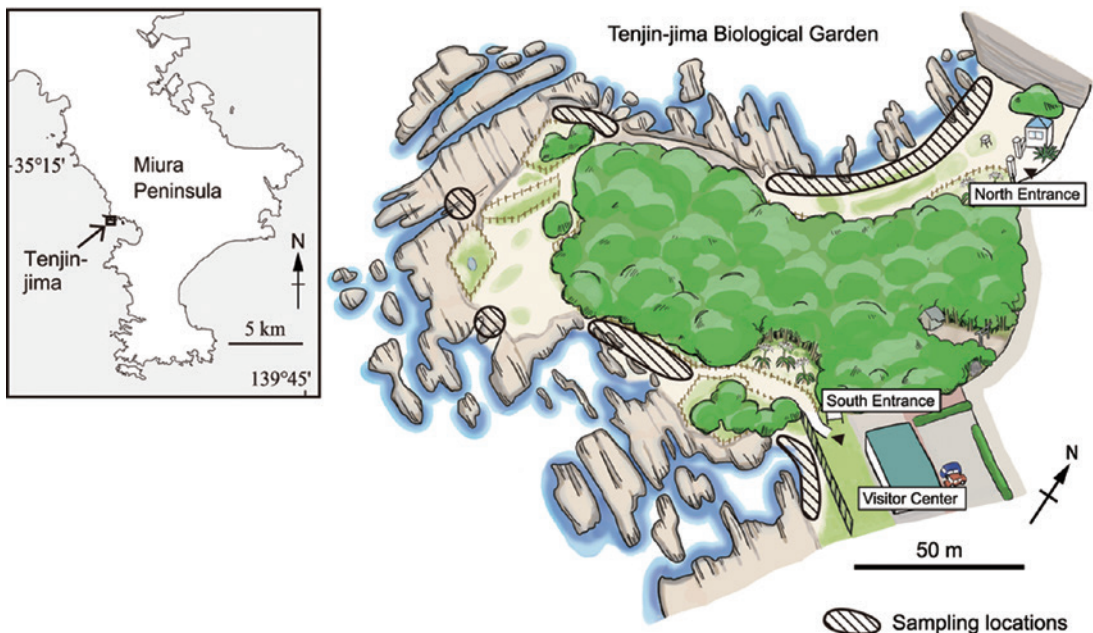


Fig. 3 Sampling locations of drift pumice samples in the Tenjin-jima Biological Garden.

第 3 図 天神島臨海自然教育園での軽石採集場所。地図は眞覚さくら氏作成。

考 察

微小部蛍光 X 線分析に基づき、天神島で 2021 年 12 月 5 日と 12 月 7 日に採集された軽石サンプルは福徳岡ノ場起源、12 月 3 日に採集された軽石サンプルは他の火山の噴出物と判断されることから(第 4 図)、天神島に福徳岡ノ場 2021 年噴火起源の軽石が初めて漂着したのは 2021 年 12 月 4 日または 12 月 5 日と考えられる。ここでは客観的なデータが得られた 12 月 5 日を漂着日とする。天神島の周辺では、伊豆大島には 2021 年 11 月 13 日、房総半島南部／千葉県館山市には 11 月 15 日、伊豆半島南部には 11 月 23 日、千葉県富津市には 12 月 2 日に福徳岡ノ場起源の軽石が漂着し始めたことが明らかとなっている(草野ほか, 2022; Yoshida *et al.*, 2022)(第 1 図)。天神島での漂着時期が伊豆大島、伊豆半島南部のそれより遅いことは、軽石が相模灘の南縁から相模湾内に軽石が運搬された時間の経過を反映していると考えられる。同様に、富津と房総半島南部／千葉県

Table 1 Whole-rock compositions of drift pumice samples on the Tenjin-jima Island. A: Collected in 2021 Dec. 3. B: Collected in 2021 Dec. 5. C: Collected in 2021 Dec. 7.

第 1 表 天神島で採集された軽石の全岩化学組成. A: 2021 年 12 月 3 日採集, B: 2021 年 12 月 5 日採集, C: 2021 年 12 月 7 日採集.

	A	B	C
SiO ₂ wt.%	75.69	65.16	64.67
TiO ₂	0.53	0.72	0.75
Al ₂ O ₃	11.74	14.25	14.30
FeO	3.31	4.78	5.12
MnO	0.11	0.19	0.20
MgO	0.61	0.93	0.96
CaO	2.84	2.64	2.65
Na ₂ O	3.55	4.32	4.25
K ₂ O	1.46	6.55	6.71
P ₂ O ₅	0.07	0.19	0.17
Total	99.90	99.73	99.78

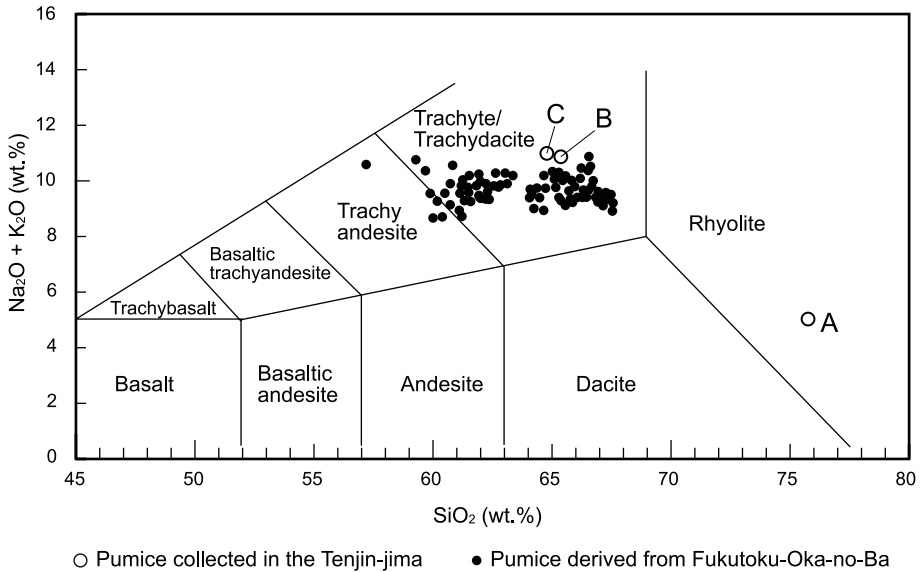


Fig. 4 Total alkalis versus SiO₂ diagram indicating compositions of pumice samples collected in the Tenjin-jima Island (white circles, A–C). A: Collected in 2021 Dec. 3. B: Collected in 2021 Dec. 5. C: Collected in 2021 Dec. 7. Black circles indicate compositions of pumice samples derived from Fukutoku-Oka-no-Ba submarine volcano. Classification of igneous rocks is on the basis of Le Maitre (2002).

第 4 図 天神島で採集された軽石の組成(白丸, A ~ C)を示す全アルカリ-シリカ図. A: 2021 年 12 月 3 日採集, B: 2021 年 12 月 5 日採集, C: 2021 年 12 月 7 日採集. B と C は福徳岡ノ場起源と判断される. 黒丸はこれまでの研究で示されている福徳岡ノ場起源の軽石のデータ(脇水, 1920; 吉田ほか, 1987; 加藤, 1988; 小坂ほか, 1990; 中野・川辺, 1992; 及川ほか, 2022; 山下ほか, 2022; Yoshida *et al.*, 2022)を示す. 岩石の分類は Le Maitre (2002)に基づく.

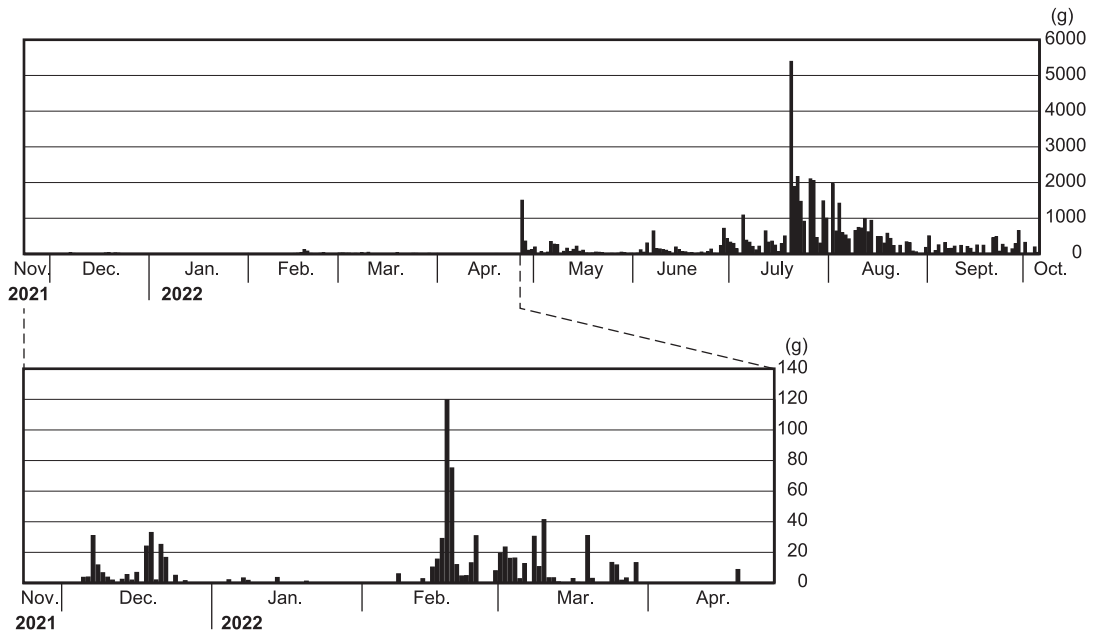


Fig. 5 Temporal variation in dried weight of drift pumice samples derived from the 2021 eruption of Fukutoku-Oka-no-Ba submarine volcano.

第5図 漂着した福徳岡ノ場 2021年噴火起源軽石の乾燥重量 W の時間変化。

館山市の漂着時期の違いもまた、房総半島館山沖から東京湾内への軽石の運搬の時間経過を表していると考えられる。

調査期間である2021年11月から2022年10月は、黒潮流路が大蛇行していた時期である(海上保安庁, 2021, 2022)。黒潮流路が典型的な大蛇行流路を示す場合、一般的に黒潮分枝流(岩田, 1986)と呼ばれる暖水が大島西水道から相模湾内に流入し、湾内には反時計回りの循環流が形成されることが明らかとなっている(岩田, 1986; Kawabe and Yoneno, 1987; 日向ほか, 2004)。しかし、蛇行する黒潮流路の変動に伴い、黒潮分枝流の相模湾への流入の程度は日々変化する。軽石の運搬と漂着過程を明らかにするため、調査期間中の漂着した軽石の乾燥重量と軽石の長軸の長さの最大値に加えて、黒潮分枝流の相模湾への流入の有無と1日の最多風向、平均風速、潮汐の指標として月の満ち欠けをまとめた(第2表)。黒潮分枝流の有無は海上保安庁発行の海洋速報(海上保安庁, 2021, 2022)の海流図から判断し、最多風向と平均風速は気象庁ホームページ、「過去の気象データ・ダウンロード」(<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, 2022年10月5日閲覧)の「三浦

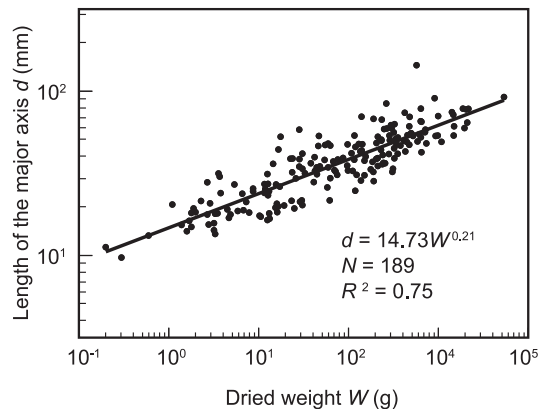


Fig. 6 Relationship between dried weight of drift pumice samples (W) and the length of the major axis of maximum pumice clast (d). N : Number of data, R^2 : coefficient of determination.

第6図 漂着した軽石の乾燥重量 W と最大の軽石の長軸の長さ d の関係。 N : データの数, R^2 : 決定係数。

のデータを、月の満ち欠けは気象庁ホームページ、潮汐表(<https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/index.php>, 2022年10月5日閲覧)の「油壺」のデータを使用した。2021年12月5日に初めて天

Table 2 Data of pumice samples derived from Fukutoku-Oka-no-Ba submarine volcano. *W*: Dried weight of pumice samples, *d*: length of the major axis of maximum pumice clast, KBC: presence (P), absence (A), and missing data (-) of the Kuroshio Branch Current towards the Sagami Bay, *MWS*: mean wind speed, *WD*: most common wind direction, and *MP*: moon's phase, new moon (NM), first quarter (FQ), full moon (FM), and LQ (last quarter). C indicates that the Tenjin-jima Biological Garden was closed.

第 2 表 福徳岡ノ場起源の軽石サンプルのデータ。 *W*: 軽石の乾燥重量, *d*: 長軸の長さの最大値, KBC: 相模湾に流入する黒潮分枝流の有 (P), 無 (A) と欠測データ (-), *MWS*: 平均風速, *WD*: 最多風向, *MP*: 月の満ち欠け, 朔 (NM), 上弦 (FQ), 望 (FM), 下弦 (LQ)。 C は天神島臨海自然教育園の休園日を示す。 KBC は海洋速報 (海上保安庁, 2021, 2022), *MWS*, *WD* は気象庁ホームページ, 過去の気象データ・ダウンロード (<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, 2022 年 10 月 5 日閲覧) の「三浦」, *MP* は気象庁ホームページ, 潮汐表 (<https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/index.php>, 2022 年 10 月 5 日閲覧) の「油壺」に基づく。

Date	<i>W</i> (g)	<i>d</i> (mm)	KBC	<i>MWS</i> (m/s)	<i>WD</i>	<i>MP</i>	Date	<i>W</i> (g)	<i>d</i> (mm)	KBC	<i>MWS</i> (m/s)	<i>WD</i>	<i>MP</i>	
2021/11/23	0		P	4.2	WSW		2022/1/1	C		-	1.9	E		
2021/11/24	0		P	6.7	WSW		2022/1/2	C		-	2.8	NE		
2021/11/25	0		P	5	WSW		2022/1/3	C		A	2.8	NNE	NM	
2021/11/26	0		-	3.7	W		2022/1/4		2	18.3	A	4.7	NNE	
2021/11/27	0		-	4	NNE	LQ	2022/1/5		0		P	4.3	NNE	
2021/11/28	0		P	3.4	NNE		2022/1/6		0		P	3.4	NNE	
2021/11/29	C		P	2.3	ENE		2022/1/7		3.2	15.7	-	2.9	NNE	
2021/11/30	0		P	3.2	E		2022/1/8		1.6	14	-	3.1	NNE	
2021/12/1	0		P	7.5	WSW		2022/1/9		0		-	3.1	WSW	
2021/12/2	0		P	2.4	NE		2022/1/10		0		P	4.6	NNE	FQ
2021/12/3	0		-	3.6	SW		2022/1/11	C			P	3.5	NNE	
2021/12/4	0		-	3.5	WSW	NM	2022/1/12		0		P	3.1	NE	
2021/12/5	3.6	31.5	P	4.2	NE		2022/1/13		0		P	5.3	WSW	
2021/12/6	C	3.8	23.9	P	3.8	NNE	2022/1/14		3.5	18	-	3.1	N	
2021/12/7	30.9	41.6	A	5.9	NNE		2022/1/15		0		-	2.3	NNE	
2021/12/8	11.7	27.1	P	8.1	N		2022/1/16		0		A	2.9	ENE	
2021/12/9	6.6	23.7	P	5.6	NNE		2022/1/17	C			A	1.9	E	
2021/12/10	3.7	30.1	-	2.7	N		2022/1/18		0		P	3.5	NNE	FM
2021/12/11	1.8	14.9	-	1.6	SSW	FQ	2022/1/19		0		P	3.1	NNE	
2021/12/12	0		-	4.7	SW		2022/1/20		1.1	20.4	P	3.1	N	
2021/12/13	C	2.3	21.4	-	3.2	NNE	2022/1/21		0		-	5.1	NNE	
2021/12/14	5.4	27	-	2.5	NE		2022/1/22		0		-	2.4	NNE	
2021/12/15	1.8	18.1	-	1.6	ENE		2022/1/23		0		P	2.2	NNE	
2021/12/16	6.8	18.8	A	3.1	E		2022/1/24	C			P	4	NE	
2021/12/17	0.2	11.2	-	5.7	WSW		2022/1/25		0		P	2.4	NE	LQ
2021/12/18	24	38.8	-	3.4	N		2022/1/26		0		P	3.1	NNE	
2021/12/19	32.9	31.6	A	3.3	WSW	FM	2022/1/27		0		P	3.5	NNE	
2021/12/20	C	1.9	19.3	A	1.9	E	2022/1/28		0		-	3.1	NNE	
2021/12/21	25.1	19.3	A	1.8	SSW		2022/1/29		0		-	2.7	ENE	
2021/12/22	16.6	19.8	P	3.3	NE		2022/1/30		0		P	3.9	NNE	
2021/12/23	0		P	3.1	NNE		2022/1/31	C			P	4.1	NNE	
2021/12/24	4.9	17.7	-	2.2	WNW		2022/2/1		0		P	3.8	WSW	NM
2021/12/25	0		-	3	ENE		2022/2/2		0		P	2.5	NE	
2021/12/26	1.4	15.3	A	3.5	NNE		2022/2/3		0		P	2	ENE	
2021/12/27	C		A	3.4	SW	LQ	2022/2/4		0		-	2.7	NE	
2021/12/28	0		-	2.8	NE		2022/2/5		0		-	3.5	NNE	
2021/12/29	C		-	3.4	SW		2022/2/6		0		P	2.2	NNE	
2021/12/30	C		-	7.3	WSW		2022/2/7	C			P	2.6	NNE	
2021/12/31	C		-	3.2	NNE		2022/2/8		5.9	18.6	P	2.9	NNE	FQ

Table 2 (continued) 第2表(続き)

Date	<i>W</i> (g)	<i>d</i> (mm)	KBC	<i>MWS</i> (m/s)	WD	MP	Date	<i>W</i> (g)	<i>d</i> (mm)	KBC	<i>MWS</i> (m/s)	WD	MP
2022/2/9	0		P	3.8	NNE		2022/3/29	13.2	18	A	3.2	NNE	
2022/2/10	0		-	5.5	N		2022/3/30	0		A	3.2	S	
2022/2/11	0		-	5.2	NNE		2022/3/31	0		A	4	SW	
2022/2/12	0		-	2.5	NE		2022/4/1	0		-	5.5	NE	NM
2022/2/13	2.7	27.8	P	3.5	NE		2022/4/2	0		-	3.2	ENE	
2022/2/14	C		P	5.2	NNE		2022/4/3	0		A	3.8	NNE	
2022/2/15	10.3	17.4	P	3.6	SW		2022/4/4	C		A	6.8	N	
2022/2/16	15.5	19.5	P	4.4	WSW		2022/4/5	0		A	5	NNE	
2022/2/17	29	21.2	P	4	N	FM	2022/4/6	0		A	3.9	SW	
2022/2/18	119.6	24.7	-	3.9	NE		2022/4/7	0		A	3.6	NNE	
2022/2/19	75.1	30.9	-	2.1	NNE		2022/4/8	0		-	3.1	S	
2022/2/20	11.9	25.3	P	3.4	N		2022/4/9	0		-	5.1	SSW	FQ
2022/2/21	C	4.5	19	P	3	NE	2022/4/10	0		A	2.6	SSW	
2022/2/22	4.7	16.9	-	3	NE		2022/4/11	C		A	4.2	SSW	
2022/2/23	13.1	24.5	P	3.1	NE		2022/4/12	0		A	4.2	SSW	
2022/2/24	30.8	20.2	P	3.1	NNE	LQ	2022/4/13	0		A	3.6	SW	
2022/2/25	0		-	2.1	ENE		2022/4/14	0		A	5	NE	
2022/2/26	0		-	3.8	WSW		2022/4/15	0		-	5.1	NE	
2022/2/27	0		P	6.1	SW		2022/4/16	0		-	4.2	NNE	
2022/2/28	C	7.9	18.2	P	2.6	ESE	2022/4/17	0		A	2.1	NNE	FM
2022/3/1	19.3	20.1	P	3.8	SW		2022/4/18	C		A	3	NNE	
2022/3/2	23.4	21.5	P	3.3	NNE		2022/4/19	8.7	25.5	A	2.9	ENE	
2022/3/3	16	20.6	P	3.7	NNE	NM	2022/4/20	0		A	3.6	NNE	
2022/3/4	16.2	18.3	-	2.7	NE		2022/4/21	0		P	2	NNE	
2022/3/5	2.7	17.7	-	5.6	SW		2022/4/22	0		-	3.8	SSW	
2022/3/6	12.6	16.4	P	3.1	NNE		2022/4/23	0		-	2.1	SW	LM
2022/3/7	C		P	1.9	ESE		2022/4/24	0		P	3.2	NNE	
2022/3/8	30.4	21.6	P	3.8	NNE		2022/4/25	C		P	2	WSW	
2022/3/9	10.6	17.2	P	3.5	NNE		2022/4/26	0		P	5.1	SSW	
2022/3/10	41.3	27.9	P	2.3	NNE	FQ	2022/4/27	1500	61	P	6.5	SSW	
2022/3/11	3.3	17.9	-	4	SW		2022/4/28	355.9	52.1	-	4.7	NE	
2022/3/12	3.3	13.5	-	2.1	ESE		2022/4/29	97.3	35.1	-	4.7	NNE	
2022/3/13	0.6	13.2	P	4	SW		2022/4/30	116.3	38.2	-	4.6	NE	
2022/3/14	C		P	5.5	SSW		2022/5/1	190.6	67.6	P	3	E	NM
2022/3/15	0		P	2.8	NE		2022/5/2	C		-	3.7	NE	
2022/3/16	2.8	15.4	P	2.9	NNE		2022/5/3	59.5	34.3	-	2.8	S	
2022/3/17	0.3	9.7	P	2.7	NE		2022/5/4	17.6	52.7	-	4.8	SSW	
2022/3/18	0		-	6.2	NNE	FM	2022/5/5	46.3	46.3	A	2.9	SSW	
2022/3/19	30.9	33.6	-	3.1	E		2022/5/6	343.8	47.2	-	2.4	S	
2022/3/20	2.9	20.7	-	2.8	NE		2022/5/7	268.9	59.1	-	2.5	NNE	
2022/3/21	0		A	3.5	NE		2022/5/8	256.8	36.3	A	2.7	NE	
2022/3/22	C		A	5.3	NNE		2022/5/9	C		A	3.9	NNE	FQ
2022/3/23	0		A	4.4	NNE		2022/5/10	68	37.2	A	4.1	NNE	
2022/3/24	13.3	16.7	A	2.7	NE		2022/5/11	155.5	39.9	A	2	NNE	
2022/3/25	11.7	24	-	2.5	S	LQ	2022/5/12	62	21.6	A	1.9	S	
2022/3/26	1.7	16.2	-	5.3	SSW		2022/5/13	123.7	30.9	-	2.7	NNE	
2022/3/27	3.2	14.2	A	3.3	NNE		2022/5/14	212.2	39	-	4.3	SSW	
2022/3/28	C		A	3.5	NE		2022/5/15	70.2	33	A	3.5	NNE	

Table 2 (continued) 第2表 (続き)

Date	<i>W</i> (g)	<i>d</i> (mm)	KBC	<i>MWS</i> (m/s)	WD	MP	Date	<i>W</i> (g)	<i>d</i> (mm)	KBC	<i>MWS</i> (m/s)	WD	MP
2022/5/16	C 99.1	32.8	A	2.9	NNE	FM	2022/7/2	289.7	50.1	-	5.2	SSW	
2022/5/17	22.7	38.7	A	1.5	NE		2022/7/3	140.5	69.7	P	3.7	SW	
2022/5/18	17.3	26.2	A	1.9	S		2022/7/4	C		P	3.9	SW	
2022/5/19	23.7	32	A	3	SSW		2022/7/5	1085	49.1	P	4.1	SSW	
2022/5/20	47	53.3	-	2.8	S		2022/7/6	379.7	46.6	P	5	NNE	
2022/5/21	42.2	39.6	-	2.4	SSE		2022/7/7	323.7	44.8	P	4.4	NNE	FQ
2022/5/22	28.4	58.2	P	3.7	NNE		2022/7/8	206	48.3	-	2.9	NNE	
2022/5/23	C		P	3.4	NNE	LQ	2022/7/9	108.4	41.8	-	3.1	SSW	
2022/5/24	0		P	3.2	S		2022/7/10	212.7	52.7	P	3.8	S	
2022/5/25	12.8	23.2	P	3.2	S		2022/7/11	C		P	2.4	S	
2022/5/26	0		P	3.3	SSE		2022/7/12	641.7	78	P	2.4	S	
2022/5/27	14.6	36	-	4.6	SSE		2022/7/13	326.1	62.8	P	1.6	E	
2022/5/28	44.5	34.3	-	2.3	S		2022/7/14	353.9	41.5	P	2.2	NE	FM
2022/5/29	28.4	34.7	P	2.9	S		2022/7/15	241.6	40.8	-	2.2	ESE	
2022/5/30	C		P	3	ENE	NM	2022/7/16	58.3	25.9	-	2.2	S	
2022/5/31	12.6	31.2	P	3	NNE		2022/7/17	286.4	53.6	-	3.7	SSW	
2022/6/1	7.3	21.1	P	2.6	NE		2022/7/18	499.3	55.3	P	3.6	SSW	
2022/6/2	15.7	27	P	3.9	S		2022/7/19	C		P	5.4	SW	
2022/6/3	112	32.6	-	3.4	SSW		2022/7/20	5390	91.9	P	2	WSW	LQ
2022/6/4	44.8	31.1	-	3.4	SSE		2022/7/21	1884	78	P	2.9	SSE	
2022/6/5	302.9	59.3	P	3.5	SSW		2022/7/22	2164	77.8	-	4.9	SSW	
2022/6/6	C		P	4.4	ENE		2022/7/23	1469	71.8	-	4.8	SSW	
2022/6/7	640.4	52.2	P	4.1	NE	FQ	2022/7/24	910.5	90.4	P	4.5	SSW	
2022/6/8	141.3	43.5	P	3.5	NE		2022/7/25	C		P	4.1	S	
2022/6/9	136	42.8	P	2.4	NE		2022/7/26	2099	64.3	P	4.3	S	
2022/6/10	120.2	45.7	-	2.7	E		2022/7/27	2051	77.3	P	4.6	SSW	
2022/6/11	98.1	47.3	-	2.3	SE		2022/7/28	455.9	53.9	P	4	SSW	
2022/6/12	63	46.6	P	3.1	NNE		2022/7/29	298.7	61.9	-	4.2	SSW	NM
2022/6/13	C		P	3.5	E		2022/7/30	1482	53.6	-	4.8	SSW	
2022/6/14	190	32.2	P	3.7	NNE	FM	2022/7/31	997.8	70.3	P	4.1	SSW	
2022/6/15	117.1	53.6	P	2.9	NNE		2022/8/1	C		P	3.6	SSW	
2022/6/16	63.1	29.5	P	2.8	SW		2022/8/2	1962	59.4	P	3.2	SSW	
2022/6/17	55.2	46.9	-	3.5	SSW		2022/8/3	637.8	65.4	P	2.2	SW	
2022/6/18	26.1	29.4	-	2.8	SSW		2022/8/4	1417	74.4	P	3.1	NE	
2022/6/19	28.6	38.5	P	3.9	SSW		2022/8/5	588.7	49.3	-	3.5	NE	FQ
2022/6/20	C		P	4.1	SSW		2022/8/6	525.1	53.3	-	2.5	NE	
2022/6/21	16.7	44.1	P	2.6	SSW	LQ	2022/8/7	418	49.7	P	2.4	SSW	
2022/6/22	48.2	34.8	A	2.7	NNE		2022/8/8	C		P	5	SSW	
2022/6/23	8.7	24.5	A	2.3	SSE		2022/8/9	649.7	65	P	6.7	SSW	
2022/6/24	59.7	47.8	-	6.6	SSW		2022/8/10	737.8	48	-	5.8	SSW	
2022/6/25	130.6	47.6	-	7.5	SW		2022/8/11	720.6	58.1	P	4.7	SSW	
2022/6/26	12.8	27.2	P	6	SSW		2022/8/12	988.5	53.6	-	4.9	SSW	FM
2022/6/27	C		P	3.5	SSW		2022/8/13	615.8	54.4	-	5.2	SSE	
2022/6/28	232.6	49.9	P	4.1	SW		2022/8/14	935.9	53.2	A	5.7	SW	
2022/6/29	713.1	56.1	P	5	SW	NM	2022/8/15	C		A	3.3	SW	
2022/6/30	424.3	73.7	P	2.9	SW		2022/8/16	480.2	69.6	A	6.8	SW	
2022/7/1	325.3	38.9	-	4.2	SSW		2022/8/17	477.4	47.1	A	2.3	WSW	

Table 2 (continued) 第2表(続き)

Date	W (g)	d (mm)	KBC	MWS (m/s)	WD	MP	Date	W (g)	d (mm)	KBC	MWS (m/s)	WD	MP
2022/8/18	298.8	60.3	A	4.5	SSW		2022/9/12	C		P	5.2	NNE	
2022/8/19	573.9	143.5	-	2.4	SSE	LQ	2022/9/13	204.4	38.6	P	2.8	NE	
2022/8/20	429.7	42.8	-	1.8	NE		2022/9/14	151.4	30.7	A	3.5	NE	
2022/8/21	231	43.8	A	2.3	NNE		2022/9/15	42.5	32.6	A	3.1	NE	
2022/8/22	C		A	3.3	NNE		2022/9/16	245.9	36.5	-	2.7	ENE	
2022/8/23	235.6	66.9	P	3.1	SSW		2022/9/17	0		-	2	NNE	
2022/8/24	0		P	2.9	ENE		2022/9/18	239.1	35.8	-	3.5	SSE	LQ
2022/8/25	335.3	50.9	P	2.3	NNE		2022/9/19	0		A	5.6	S	
2022/8/26	309.1	32.2	-	2.3	S		2022/9/20	C		A	5.9	S	
2022/8/27	76.1	38.3	-	3.5	SSW	NM	2022/9/21	448.6	48.9	A	5.3	NE	
2022/8/28	54.5	38.1	P	3.9	NE		2022/9/22	477	60.9	-	5.1	NNE	
2022/8/29	C		P	4.2	NNE		2022/9/23	72.2	32.4	-	3.6	NNE	
2022/8/30	0		P	2.7	NNE		2022/9/24	264.3	83.8	-	3.8	S	
2022/8/31	177.9	33.4	P	3.2	SSW		2022/9/25	186.1	37	P	4.1	NNE	
2022/9/1	502.6	55	P	4.7	SSW		2022/9/26	C		P	1.9	NE	NM
2022/9/2	0		-	3.3	NE		2022/9/27	138.3	28.5	P	3.3	NE	
2022/9/3	87.4	39.1	-	3.1	NE		2022/9/28	282	41.4	P	3.5	NNE	
2022/9/4	250.5	58.7	P	2.7	NE	FQ	2022/9/29	649.9	42.4	P	1.3	E	
2022/9/5	C		P	2.5	E		2022/9/30	0		-	3	NNE	
2022/9/6	313.4	33.6	P	3.5	S		2022/10/1	319.5	55.9	-	3.8	N	
2022/9/7	143.4	47.5	P	2	S		2022/10/2	0		A	2.8	NNE	
2022/9/8	151.5	37.6	P	4.4	NNE		2022/10/3	C		A	2	NE	FQ
2022/9/9	213.3	35	-	3.4	NNE		2022/10/4	191.5	28.3	A	5.2	SW	
2022/9/10	0		-	4.8	NNE	FM	2022/10/5	38.2	36.3	A	4.8	NE	
2022/9/11	233.7	50.6	P	5.7	NNE								

神島で福徳岡ノ場起源の軽石が採集されて以降、漂着した軽石の乾燥重量は、時間経過に伴って増減を繰り返した(第5図, 第2表)。このような軽石の漂着量の変動は、黒潮分枝流の消長と風の変動に大きな影響を受けたと考えられる。例えば、2022年1月初旬から2月中旬は少量の軽石が採集されるのみで、採集されない日も多かった。この時期は黒潮分枝流が相模湾に流入していたが、北北東の風が卓越して観測された(第7図A)。北北東の風によって天神島への漂着が抑制された可能性が考えられる。2022年4月初旬から下旬もほとんど軽石が漂着しなかったが、この時期には南南西の風が観測される日があったものの、黒潮流路が関東地方の南方沖へ離れ、黒潮分枝流の相模湾への明瞭な流入が認められない時期であった(第7図B)。黒潮分枝流の減衰により、相模湾内に運搬される軽石の量が減少したものと考えられる。一方、調査期間の中で最も多くの軽石が漂着したのは2022年7月下旬から8月上旬である。この時期は黒潮分枝流が相模湾内に流入するのに加

え、強い南南西の風が卓越して観測された(第7図C)。黒潮分枝流と南南西の風により、多量の軽石が天神島に漂着したものと考えられる。天神島では南側の浜で多くの軽石が採集されたことも、南南西の風が軽石の漂着に大きな影響を与えたことを示している。2022年8月下旬から10月初旬は0~650g程度の軽石が漂着した。この時期は黒潮分枝流の消長と、北東や南西の風など風向きの変動が見られた。黒潮の流路と風に応じて軽石が漂着したと考えられる。また、天神島においては、南~南西の風と軽石の漂着には1日~4日程度の時間差があると考えられる。448.6gの軽石が採集された2022年9月21日は北東の風が観測されたが(第7図D)、9月18日~9月20日には南南東~南の風が観測された(第2表)。同様に、初めて軽石が漂着した2021年12月5日の4日前には強い西南西の風が、1500.1gの軽石サンプルが採集された2022年4月27日とその前日には強い南南西の風が、最も多くの軽石が採集された2022年7月下旬~8月上旬では、その期間だけ

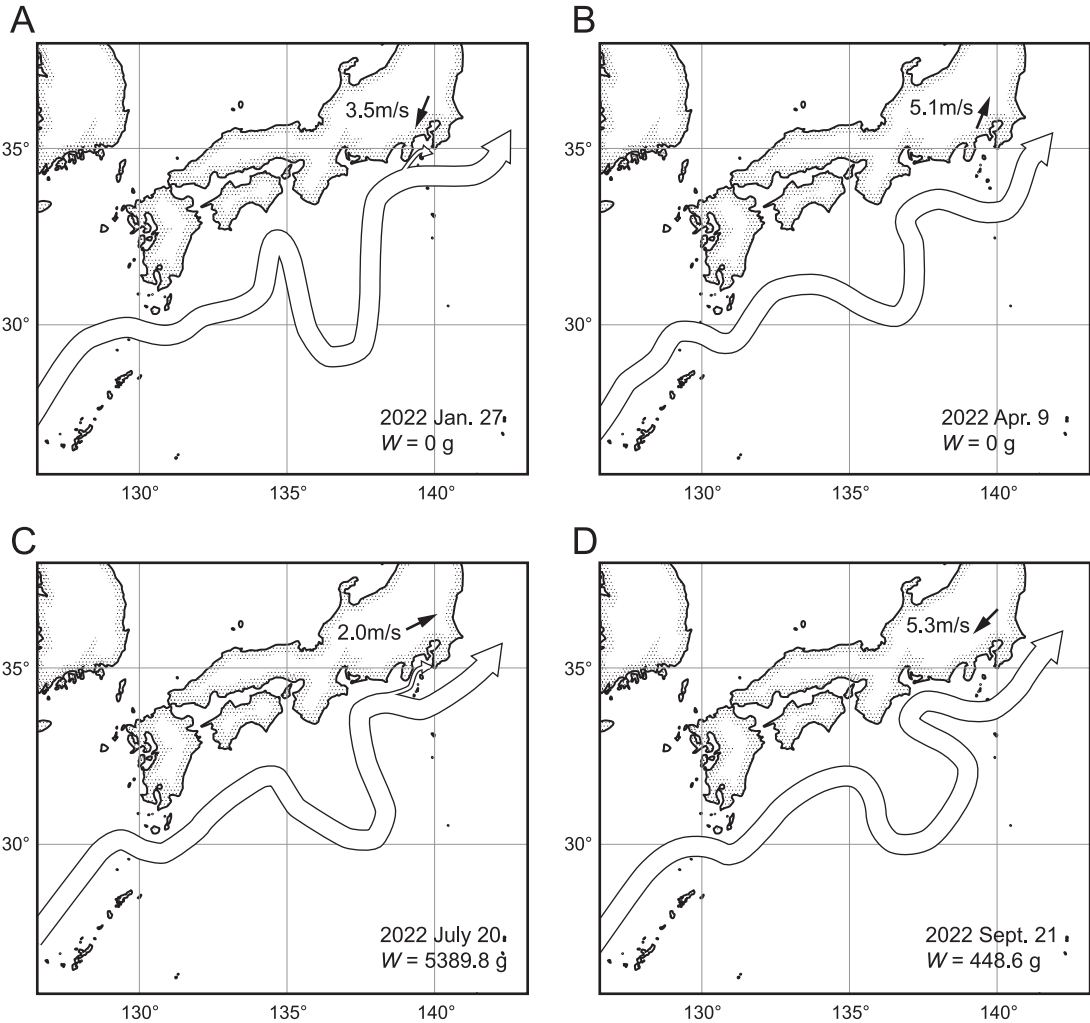


Fig. 7 Relationship between the Kuroshio Current, Kuroshio Branch Current, the most common wind direction, mean wind speed, and dried weight of pumice samples drifted on the Tenjin-jima Island. A: 2022 Jan. 27. B: 2022 Apr. 9. C: 2022 July 20. D: 2022 Sept. 21. White arrows indicate the Kuroshio Current and Kuroshio Branch Current. Black arrows indicate the most common wind direction with mean wind speed.

第 7 図 黒潮の流路・分枝，最多風向，平均風速，天神島に漂着した軽石の乾燥重量の関係。A: 2022 年 1 月 27 日。B: 2022 年 4 月 9 日。C: 2022 年 7 月 20 日。D: 2022 年 9 月 21 日。白矢印は黒潮の流路と分枝，黒矢印は「三浦」の最多風向，数字は平均風速を示す。黒潮の流路は海上保安庁 (2022)，最多風向と平均風速は気象庁ホームページ，過去の気象データ・ダウンロード (<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, 2022 年 10 月 5 日閲覧) の「三浦」に基づく。

でなく 6 月中旬から継続して南～南西の風が卓越して観測されている (第 2 表)。大量の軽石が漂着した南西諸島での観察事例からも，同様に海流と風が海岸への軽石の漂着に大きな影響を与えたと解釈されている (石村ほか, 2022)。一方，軽石の漂着に対して潮汐の影響は限定的と考えられる。干満の差が大きくなる大潮，すなわち朔月や望月の数日後に軽石

が漂着することはあったが，必ずしも多く軽石が漂着する傾向は認められなかった (第 2 表)。一般的に，高潮位によって汀線が高い位置に漂着した軽石はその場所に留まり，低い位置に漂着した軽石は漂流と漂着を繰り返すと考えられている (石村ほか, 2022)。したがって，大潮の時期に軽石が標高の高い位置に漂着して留まり続けるため，大潮の時期には多くの

軽石が漂着するように感じられると考えられる。しかし、本調査では目視できる軽石をすべて採集したため、潮位の変化と軽石の漂着量との相関は明瞭に認められなかった可能性が考えられる。

海岸ごとの軽石の長軸の長さの平均と漂着量は、漂流中に軽石の破砕と摩耗が進むこと、軽石が海底に沈むこと、拡散することから、全体的に噴火からの時間経過に伴って減少すると考えられてきた(平峰ほか, 2022; 石村ほか, 2022)。しかし、天神島での観察結果は、軽石の漂着量と軽石の長軸の長さが時間経過に伴って必ずしも減少せず、軽石の乾燥重量と長軸の長さには正の相関が認められた(第5図, 第6図)。これは、大きな軽石は長く漂流しやすいことを反映している可能性が考えられる。すなわち、小さな軽石は漂流中に海水が内部まで浸透しやすく、重くなって沈む確率が高いと考えられる。また、天神島や南西諸島(丸谷, 2021; 石村ほか, 2022)では海綿類や蔓脚類などが付着した軽石も採集されている。これらの生物が大小の軽石に付着した場合、表面積の小さな軽石のほうが比重が大きくなる割合が高く、より沈みやすいと考えられる。このようにして漂流を続ける軽石群が、海流と風の条件に応じて漂着するものと解釈できる。天神島での事例は、噴火から約1年程度経過しても、漂着のピークが訪れる可能性があることを示している。

結 論

- ・神奈川県横須賀市天神島では、福徳岡ノ場2021年噴火起源の軽石が2021年12月5日に初めて漂着した。
- ・漂着軽石の乾燥重量は、時間経過に伴って増減を繰り返した。軽石の運搬・漂着過程は、黒潮の流路と風の変動に大きな影響を受けたと考えられる。
- ・軽石の乾燥重量と長軸の長さには正の相関が認められた。大きな軽石は長期間漂流しやすい可能性が考えられる。
- ・天神島での事例は、噴火から約1年程度、軽石漂着のピークが訪れる可能性があることを示している。

謝 辞

漂着軽石の採集では天神島臨海自然教育園スタッ

フに、軽石の化学分析では(株)堀場テクノサーブの中野ひとみ氏にご協力いただきました。厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 日向博文・宮野 仁・高尾敏幸 2004. 風に制御された相模湾への黒潮系暖水流入. 国土技術政策総合研究所報告(17): 1-28+i-iii.
- 平峰玲緒奈・石村大輔・青木かおり・鈴木毅彦・早田 勉・渡辺 樹・山田素子・市原季彦・山田圭太郎 2022. 福徳岡ノ場2021年噴火による軽石の漂着時期・漂着量・粒径分布. 日本地球惑星科学連合2022年大会発表要旨, SVC31-18.
- 石橋 隆 2021. 沖縄に大量漂着する小笠原「福徳岡ノ場」海底火山由来の軽石(2021年). 地学研究, **67**(1): 57-61.
- 石村大輔・平峰玲緒奈・青木かおり 2022. 福徳岡ノ場2021年噴火による軽石を追いかけて—軽石の漂着状況とその特徴—. 月刊地理, **67**(7): 10-11, 23-32.
- 岩田静男 1986. 相模湾の海況の短期変動に関する研究. 神奈川県水産試験場論文集第3集: 1-66.
- 海上保安庁 2021. 海洋速報, (219)-(223). <https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/2021/backno21.html>
- 海上保安庁 2022. 海洋速報, (1)-(186). <https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/2022/backno22.html>
- 加藤祐三 1988. 福徳岡の場から琉球列島に漂着した灰色軽石. 火山, **33**: 21-30.
- Kawabe M. and Yoneno M. 1987. Water and flow variations in Sagami Bay under the influence of the Kuroshio path. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, **43**: 283-294.
- 小坂丈予・松田鉦二・平林順一・土出昌一 1990. 南方諸島海域の海底火山活動に伴って噴出した岩石の化学成分. 火山第2集, **35**: 57-61.
- 久保田好美 2022. 黒潮～世界最大規模の海流には日本に何をもらす?～. ミルシル, **15**(1): 3. 国立科学博物館.
- 草野有紀・及川輝樹・川邊禎久・池上郁彦・Christopher Conway・岩橋くるみ・山崎 雅・古川竜太・森田澄人・清家弘司・横井久美 2022. 地質標本館緊急展示: 福徳岡ノ場火山2021年噴火と

- その漂流軽石. 地質調査総合センター研究資料集, (730): 1-10.
- Le Maitre R. W. (ed.) 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks, 2nd ed.* xvi + 236 pp. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne.
- 丸谷 由 2021. 軽石のふしぎ 福徳岡の場からの漂着を通して軽石の不思議と面白さを知る図鑑. 32 ページ. ネコのわくわく自然教室 (国際自然大学校沖縄校).
- 森 慎一・山下浩之・五島政一 1992. 相模湾沿岸に漂着した小笠原・福徳岡の場海底火山起源の軽石. 自然と文化, (15): 1-14. 平塚市博物館.
- 長井雅史 2021. 福徳岡ノ場火山 2021 年 8 月の噴火と漂着軽石. 防災科研ニュース, (215): 14-15.
- 中野 俊・川辺禎久 1992. 1991 年, 琉球列島西表島に漂着した軽石. 火山, 37: 95-98.
- 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. GSI 地質ニュース, 11(3): 65-72.
- 奥野 充・鳥井真之 2022. 福徳岡ノ場起源の漂着軽石: 沖縄本島と石垣島を例として. 国際火山噴火史情報研究集会講演要旨集, 2021(2): 77-81.
- 山下浩之・新井田秀一・西澤文勝 2022. 硫黄列島の地形・地質概要. 神奈川博調査研報 (自然), (17): 1-10.
- Yoshida K., Tamura Y., Sato T., Hanyu T., Usui Y., Chang Q. and Ono S. 2022. Variety of the drift pumice clasts from the 2021 Fukutoku-Oka-no-Ba eruption, Japan. *Island Arc*, 31(1): e12441. <https://doi.org/10.1111/iar.12441>.
- 吉田武義・藤原秀一・石井輝秋・青木謙一郎 1987. 伊豆・小笠原弧, 福徳岡の場海底火山の地球化学的研究. 東北大学核理研研究報告, (20): 202-215.
- 脇水鉄五郎 1920. 大正三年噴出新硫黄島の消失の経路. 東洋学芸雑誌, (37): 257-268.