

大規模噴火時の気象衛星 2 階差分画像を用いた輝度温度異常の検知

Detection of brightness temperature anomaly using second order differential images of the meteorological satellite "Himawari" on large eruption

久利美和¹, 桑山辰夫², 杉浦 理³

Miwa KURI¹, Tatsuo KUWAYAMA², and Satoshi SUGIURA³

(Received December 11, 2023; Accepted July 30, 2024)

1 はじめに

2022 年 1 月 15 日 13 時頃 (日本時間) に発生したフンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山の大規模噴火 (以下「トンガ諸島の噴火」) により, 日本では, 気圧変化 (気圧波) とその直後からの潮位変化が観測された. この潮位変化は津波の到達予想時刻より数時間早く観測されるなど, 一般的な地震による津波とは異なる性質を有していた.

1.1 津波予測技術に関する勉強会

2022 年 2 月から 3 月に津波・火山・海洋の専門家を交えて開催された「津波予測技術に関する勉強会」 (以下「勉強会」) において潮位変化がどのようなメカニズムで発生したと考えられるのかについての検討がなされ, 潮位変化は大規模噴火に伴う気圧波の伝播等によって生じたことが示された. このうち最も伝播速度が速い気圧波は約 310m/s の速度で伝わったラム波と考えられ, これに伴う潮位変化が日本では最初に発生したと考えられた. また, 伝播速度が約 200m/s の内部重力波も伝わった可能性があるものの, それがどの程度潮位変化に寄与したかは不明であった.

トンガ諸島の噴火後, 気象衛星ひまわり 8 号が 10 分毎に観測した画像のうち, 対流圏上~中層の水蒸気に感度のあるバンド 10 (7.3 μ m) の輝度温度画像を時間方向に 2 階差分したところ, 地球規模で同心円状に伝播する明瞭な気圧波を捉えた (図 1).

1.2 火山噴火等による潮位変化に関する情報のあり方検討会

気象庁では, 2022 年 5 月から 6 月にかけて, 津波・火山・防災情報の専門家やメディア, 関係省庁からなる「火山噴火等による潮位変化に関する情報のあり方検討会」 (以下「検討会」) を開催し, 7 月に報告書を公表した.

火山噴火等の気圧波により顕著な潮位変化 (津波) を発生させる現象は, 約 150 年で 2~3 回程度と発生頻度は低い (気象庁, 2022b). しかし, ひとたび発生すれば, 沿岸で人的被害等が生じる可能性もあり, これを防ぐために, 火山噴火等により潮位変化が発生した際に, 気象庁から必要な情報が適切に発表され, 被害を最小限に軽減することが期待された. 勉強会時点で明らかになったメカニズムに関する知見を活用し, 大規模な噴火が発生した際に, 速やかに

¹ 地震火山部地震津波監視課, Earthquake and Tsunami Observations Division, Seismology and Volcanology Department.

現所属: 文部科学省研究開発局地震火山防災研究課, Earthquake, Volcano and Disaster-Reduction Research Division, Research and Development Bureau, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology.

² 地震火山部地震火山技術・調査課, Earthquake and Volcanic Engineering Affairs Division, Seismology and Volcanology Department.

現所属: 地震火山部地震津波監視課, Earthquake and Tsunami Observations Division, Seismology and Volcanology Department.

³ 地震火山部火山監視課, Volcanic Observation Division, Seismology and Volcanology Department.

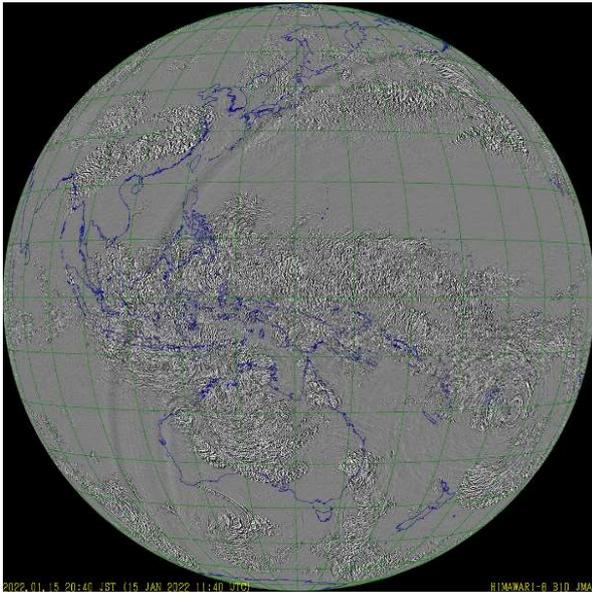


図 1 気象衛星「ひまわり」画像（フンガ・トンガフンガ・ハアパイ火山の噴火事例）。ひまわり 8 号が 10 分毎に観測したフルディスク画像（2200×2200 ピクセル）のうち、対流圏上中層の水蒸気に感度のあるバンド 10 の画像の輝度温度を時間方向に 2 階差分（輝度温度の時間的な変化を強調）して作成した画像（1100×1100 ピクセル）。時間変化を±2.0K の範囲で階調割当（正が白，負が黒）。（「津波予測技術に関する勉強会」報告書では「2 階微分」と記載しているが、本報告では「2 階差分」の表現に統一）（気象庁（2022a）より）

適切な情報を国民に提供することが重要と報告書にまとめられた。

国外の大規模噴火を覚知するためには、全世界の火山噴火に関する情報を速やかに収集する必要がある。現在利用可能な情報として航空路火山灰情報（VAA）がある。気象庁は東京 VAAC の運用を担っており、主に気象衛星ひまわりの情報を利用して責任領域内（図 2）の火山の噴火を監視し、VAA 等を発表している。他領域については、各 VAAC から入手する VAA の活用が可能である。

東京 VAAC では、現在、気象衛星ひまわり 9 号の赤外（バンド 13, 10.4 μm ）観測で得られる輝度温度と全球数値予報データの鉛直温度プロファイルと比較することにより噴煙頂の高度を推定する（例えば、新堀ほか、2013）。この手法は、噴煙を完全黒体と仮定し噴煙頂と周辺大気が温度平衡に至っていること

を前提としているため、実際の頂高度とは異なる可能性があり、また、上昇中の噴煙は頂部が温度平衡に達しておらず、噴煙頂高度を適切に推定していない可能性がある。また、対流圏界面付近で鉛直方向の大気温度が極小となるため、推定高度が飽和することにも留意が必要である。このような留意事項はあるものの、この情報に含まれる噴火発生時の時刻と噴煙高度に関する情報を活用することで、潮位変化を伴う可能性がある大規模噴火を覚知可能である。

過去に気圧波に起因する潮位変化が発生した 3 事例の推定噴煙高度は、1883 年クラカタウ：40km（ウィンチェスターほか、2004）、1956 年ベズィミアニ：35～40km（村山、1969）、2022 年トンガ諸島の噴火：約 55 km（Carry, 2022, NASA, 2022）であった。しかし、トンガ諸島の噴火時の VAA 第 1 報入電時点では、輝度温度からの推定による噴煙高度は約 16,000m（52,000feet）であったことなどを踏まえ、噴煙高度海拔約 15,000m（50,000feet）以上の火山噴火を検知した場合、気象庁は津波発生の可能性のある大規模噴火発生の情報提供を行うこととした（図 3【A】）。

検討会では、津波警報・注意報が潮位の観測値に基づいて発表される前に、情報の受け手が事前の対応の必要性をできるだけ検討できるように、日本へ至る経路上の気圧や潮位等の観測値をもとに日本への潮位変化の可能性が高まったかどうかについて情報提供することが望ましいとの指摘があったことから、気象庁では、気象衛星ひまわりによる解析において明瞭な同心円状の輝度温度の変化が伝播していることが解析された場合は、解析されない場合と比較して、気圧波に起因する潮位変化が発生する可能性が高まった旨、情報提供を行うこととした（図 3【B】）。

広範囲に広がる気圧波の迅速な検知には、輝度温度の 2 階差分画像は有効な手段である。ただし、気圧の直接観測ではなく、気圧変化に伴う輝度温度の時間的な変化を可視化したもので、輝度温度異常と気圧変化の量的な関係が明らかではないことから定量的な評価は困難である。また、処理画像には気圧波以外の雲の影響も見られ、検知には一定以上の技能を有する可能性が指摘された。

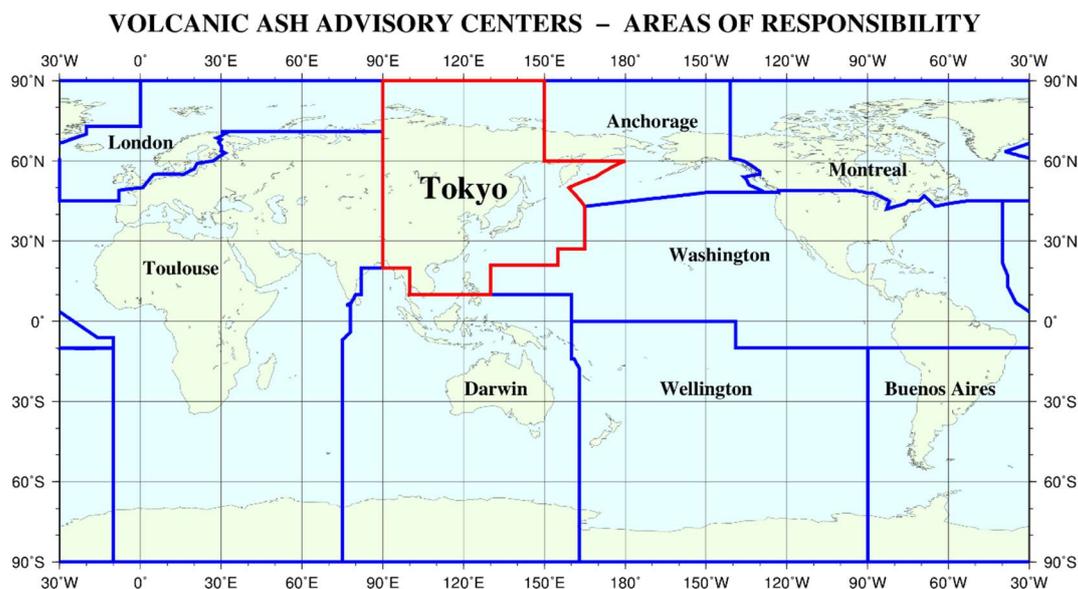


図 2 東京 VAAC の責任領域.

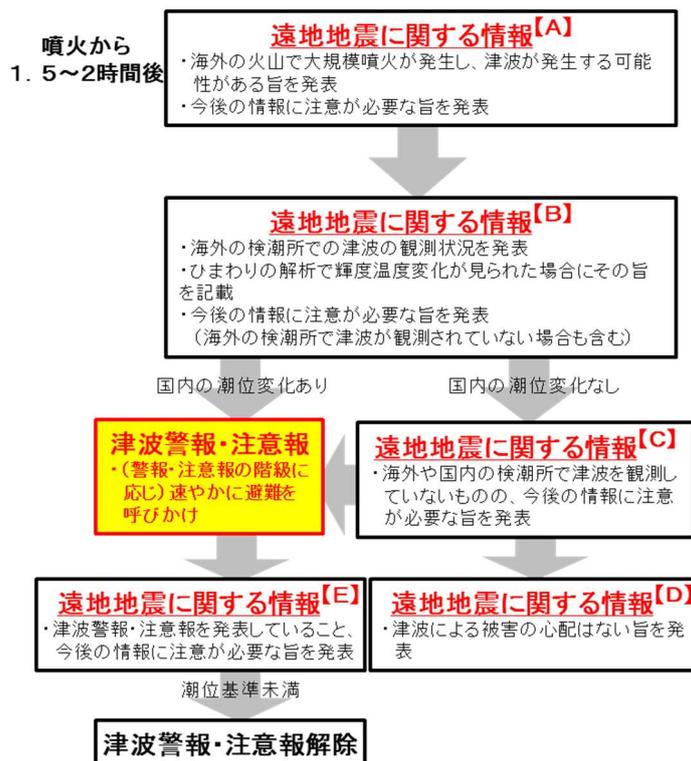


図 3 海外で大規模噴火が発生した際の情報発表の流れ (気象庁 (2022b) より).

1.3 輝度温度を活用した気圧波の検知

Otsuka (2022) は、ラム波の可視化のために、「水蒸気画像」と呼ばれる $6.2\mu\text{m}$ の波長帯における衛星画像（ひまわり 8 号、バンド 8）の差分を 2 回取ることによって、大気波動の中でも特に速い速度で伝わるラム波を強調した。

新堀ほか (2023) は、大規模噴火のプラスト雲の特徴に着目し、観測方法が限られる海域の火山噴火に対して、時空間分解能が上がったひまわりによる衛星解析は、噴火の検知や規模の推定に有効であることを報告した。

久利ほか (2023) は、同手法による大規模噴火での輝度温度異常の検知状況を調査し、バンドによる検知状況を比較し、輝度温度異常の多様な要因と多様な伝播・移動速度があることを報告した。本報文では事例を追加し、発生要因と伝播・移動速度について考察を加えた。

2 大規模噴火時の気象衛星ひまわりの 2 階差分画像による輝度温度変化の検知

本報文では、VAA で噴煙高度約 15,000m (50,000 feet) 以上の入電のあった 36 事例の噴火のうち（表 1）、気象衛星ひまわり 8 号の運用開始（2015 年 7 月 7 日）以降、ひまわり 8 号・9 号の観測領域内で、噴煙高度海拔約 15,000m (50,000feet) 以上の VAA の入電があった 25 事例（表 2）を対象にバンド 10 の 10 分毎の輝度温度画像の 2 階差分の画像（ 1100×1100 ピクセル）での輝度温度異常の検知状況を調査した。なお、2022 年 12 月 13 日以降は正式運用となったひまわり 9 号の画像を使用した。

結果、トンガ諸島の噴火のほかに、クラカタウ（南緯 6.1 度 東経 105.4 度、インドネシア、2018 年 12 月 22 日）、福德岡ノ場（北緯 24.3 度 東経 141.5 度、日本、2021 年 8 月 13 日）、ベズィミアニィ（北緯 56.0 度、東経 160.6 度、ロシア、2022 年 5 月 28 日）、シベルチ（北緯 56.7 度 東経 161.4 度、ロシア、2023 年

4 月 11 日）、ウラウン（南緯 5.0 度 東経 151.3 度、パプアニューギニア、2023 年 11 月 21 日）の 5 事例で明瞭な輝度温度異常を検知した。ただしこれらの検知は局地的（火山から距離約 2,000km 未満）で、継続時間も短く、トンガ諸島の噴火時のような地球を周回する規模ではなかった。その他の事例については、輝度温度異常の発生がなかったのか、雲の影響により検知できなかったかは不明である（表 2）。

バンドの違い等による輝度温度異常の検知状況に着目する。バンドの特性を図 4 に示す。バンド 10 は標準大気で 500~600hPa 付近に感度のピークがあり、水蒸気および二酸化硫黄に感度を持つ。バンド 8 は標準大気で 300~400hPa 付近に感度のピークがあり、水蒸気に感度を持つ。バンド 12 ($9.6\mu\text{m}$) は水蒸気の吸収の影響を受けにくく、成層圏に多く存在するオゾンの吸収を受ける。前述の 5 事例については、ひまわりの 10 分毎の 3 バンド（バンド 8、バンド 10、バンド 12）の全球または対象エリアの 2 階差分画像（ 1100×1100 ピクセル）を作成し、輝度温度異常の検知状況を比較した（図 5-1、図 5-2）。

トンガ諸島の噴火事例では 3 バンドすべてで明瞭な伝播を確認したが、とくに、成層圏に感度のあるバンド 12 が明瞭であった。噴煙高度が成層圏から中間圏（傘型領域で約 30 km、頂部では約 55km）に達しており、そのためと考えられる。

噴煙高度が対流圏界面付近に到達した福德岡ノ場、シベルチ、ベズィミアニィ、ウラウンの 4 事例で、バンド 8 とバンド 10 で明瞭またはやや不明瞭、バンド 12 ではやや不明瞭または不明瞭であった。

山体崩壊を起こしたクラカタウの事例は、バンド 10 が明瞭、バンド 8 がやや不明瞭、バンド 12 が不明瞭であった。

以上により、バンドによる輝度温度検知状況の差異は、気圧（高度）の感度に依存する可能性が示唆された。ただし、大気組成との関係は不明である。

表1 航空路火山灰情報 (VAA) での噴煙高度別の入電回数 (2015年7月～2023年12月).

噴煙高度 の観測値 [feet]	2015年 7月～	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	合計
≥50,000	1	0	2	5	11	4	3	5	5	36
≥45,000	2	1	2	10	11	7	4	6	6	49
≥40,000	3	2	11	12	15	8	16	8	12	87
≥35,000	7	9	19	17	21	11	25	12	19	140
≥30,000	10	16	31	25	27	14	27	21	49	220

表2 気象衛星ひまわり監視領域内の噴煙高度 50,000feet 以上の VAA 入電の対象事例一覧 (2015年7月～2023年12月).

No.	日本時間 (JST)			火山名	国, 地域等	情報源	噴煙高度 [feet]	輝度温度異常の検知
	年	月	日					
1	2015	7	31	MANAM	PAPUA NEW GUINEA	DARWIN	65,000	不明
2	2017	12	20	BEZYMANNY	RUSSIA	TOKYO ←KBGS	50,000	不明
3	2018	2	19	SINABUNG	INDONESIA	DARWIN	50,000 →55,000	不明
4	2018	4	6	SINABUNG	INDONESIA	DARWIN	50,000	不明
5	2018	5	11	MERAPI	INDONESIA	DARWIN	50,000	不明
6	2018	12	23	KRAKATAU	INDONESIA	DARWIN	55,000	無
7	2019	1	2	KRAKATAU	INDONESIA	DARWIN	50,000	無
8	2019	1	8	MANAM	PAPUA NEW GUINEA	DARWIN	50,000	不明
9	2019	1	25	MANAM	PAPUA NEW GUINEA	DARWIN	55,000	不明
10	2019	3	16	BEZYMANNY	RUSSIA	TOKYO ←KVERT	50,000	不明
11	2019	6	9	SINABUNG	INDONESIA	DARWIN	55,000	不明
12	2019	6	26	ULAWUN	PAPUA NEW GUINEA	DARWIN	55,000 →63,000	不明
13	2019	8	3	ULAWUN	PAPUA NEW GUINEA	DARWIN	63,000	不明
14	2020	1	12	TAAL	PHILIPPINES	TOKYO ←DARWIN	55,000	不明
15	2020	11	29	LEWOTOLO	INDONESIA	DARWIN	63,000	不明
16	2020	12	1	SEMERU	INDONESIA	DARWIN	50,000	不明
17	2021	8	13	福德岡ノ場	小笠原諸島	TOKYO: HIMAWARI-8	54,000	有

表2 (つづき)

No.	日本時間 (JST)			火山名	国, 地域等	情報源	噴煙高度 [feet]	輝度温度異常の検知
	年	月	日					
18	2021	10	19	MANAM	PAPUA NEW GUINEA	DARWIN	50,000	不明
19	2022	1	13	HUNGA	TONGA	WELLINGTON	55,000	不明
				TONGA-HUNGA HA'APAI				
20	2022	1	15	HUNGA	TONGA	WELLINGTON	52,000	有
				TONGA-HUNGA HA'APAI				
21	2022	3	8	MANAM	PAPUA NEW GUINEA	DARWIN	50,000	無
22	2022	5	28	BEZYMIANNY	RUSSIA	TOKYO ←KVERT	50,000	有
23	2022	12	4	SEMERU	INDONESIA	DARWIN	50,000	無
24	2023	4	10	SHEVELUCH	RUSSIA	TOKYO: HIMAWARI-9	52,000	有
25	2023	11	20	ULAWUN	PAPUA NEW GUINEA	DARWIN	50,000	無
	2023	11	21	ULAWUN	PAPUA NEW GUINEA	DARWIN	60,000	有

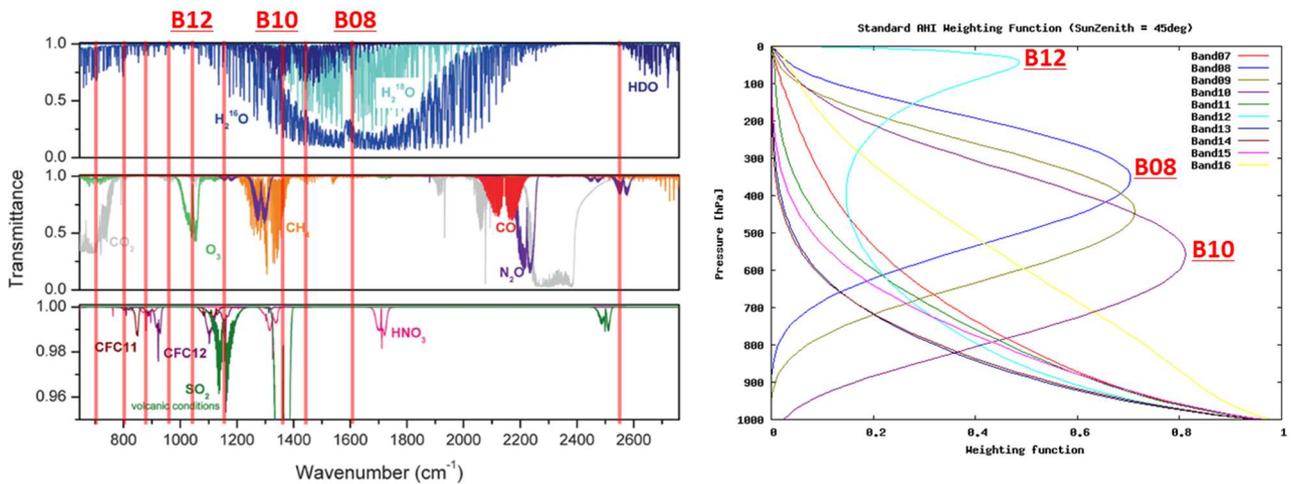


図 4 気象衛星ひまわり 8 号・9 号のバンドごとの画像特性。組成感度 (左図) と気圧感度 (右図) (気象庁気象衛星センターホームページより)。

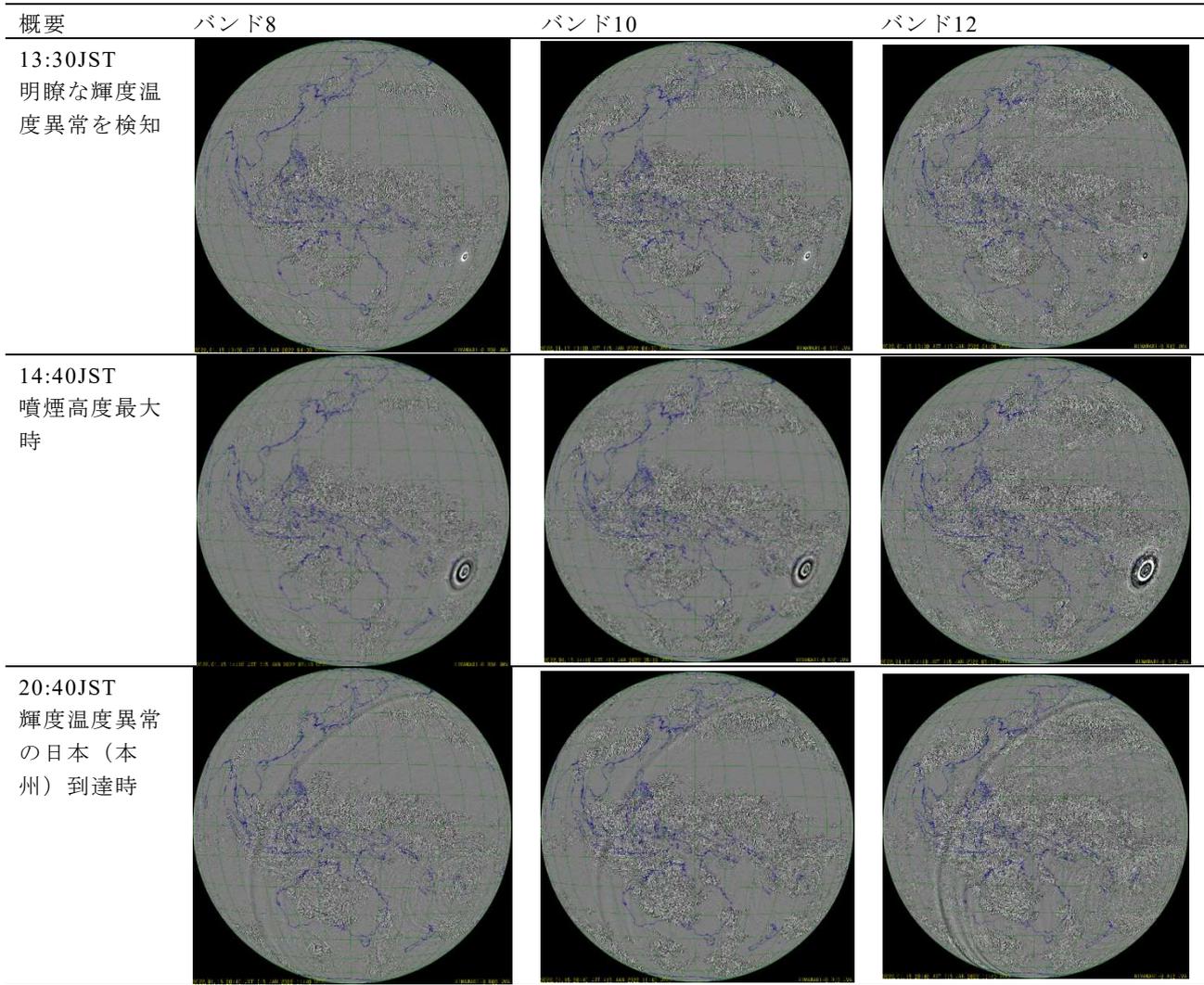


図 5-1 気象衛星ひまわり 8 号のバンド別輝度温度 2 階差分画像事例（フンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ，2022 年 1 月 15 日）。

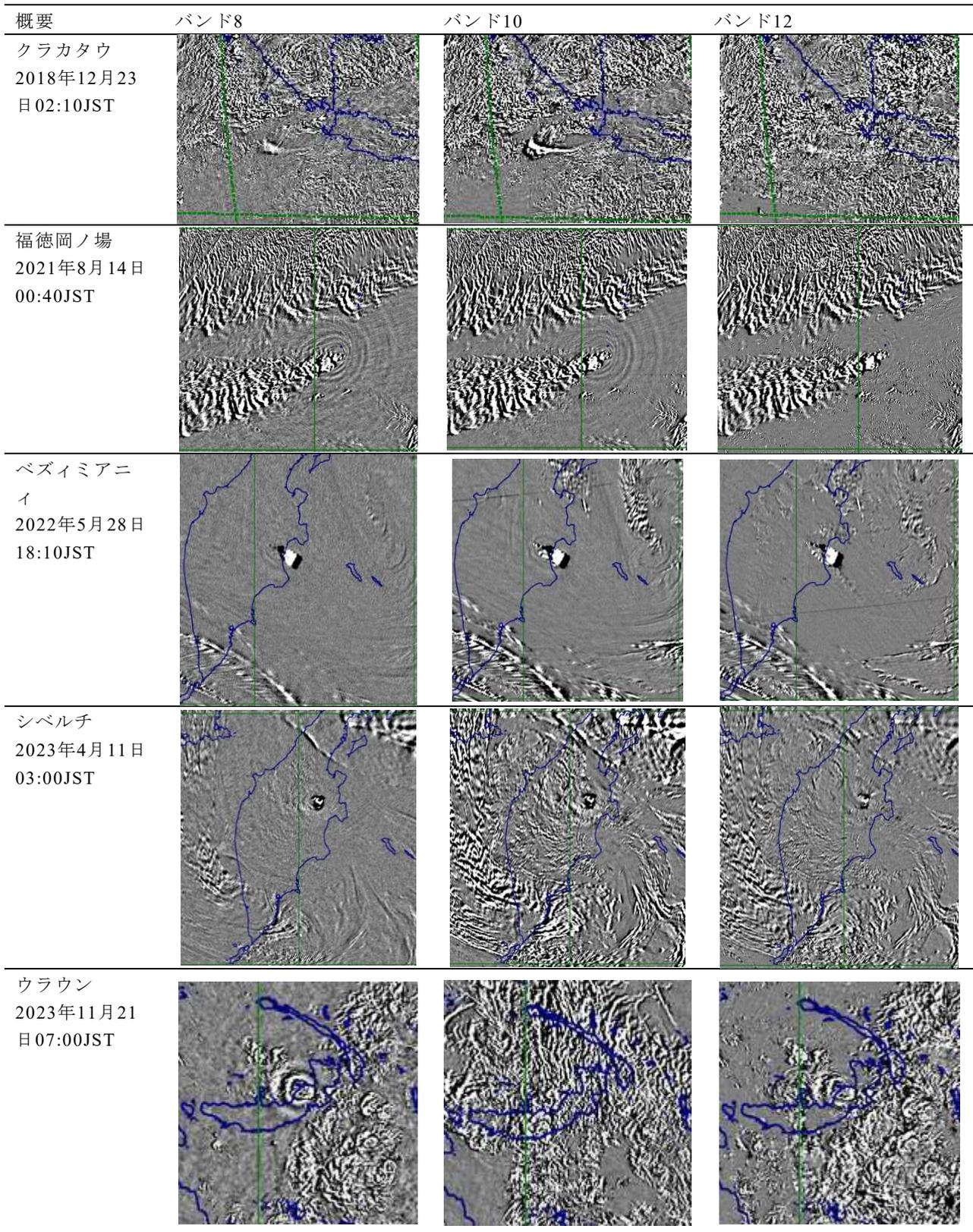


図 5-2 気象衛星ひまわり 8 号・9 号のバンド別の 10 分毎の輝度温度 2 階差分画像事例 (各火山).

3 福徳岡ノ場噴火の噴火推移と輝度温度異常・潮位変化

福徳岡ノ場から約 320km 離れた父島の「父島二見」検潮所において、2021 年 8 月 13 日から 15 日にかけて、消長を繰り返しながら継続する微弱な潮位変化（福徳岡ノ場の噴火に伴うとみられる津波）を観測した。周期が 70 秒程度で、振幅がうなりのように数時間程でゆっくりと変化していた（図 6）。

想定波源を福徳岡ノ場付近（半径 30 秒（約 0.93km））、浅水波（長波： \sqrt{gH} ）による伝播を想定すると、水深 H が約 2,000m として、父島二見への到達までは約 40 分（ $\approx 130\text{m/s}$ ）である（図 7）。父島二見観測点での潮位変化の正確な到達時刻は不明ながら、07 時 40 分頃には到達しており、噴火発生から到達までの時間は約 100 分以内程度である。深水波（短波： $\sqrt{g\lambda/2\pi}$ ）であれば、波長 $\lambda \approx 2H$ で、浅水波（長波）の 2~3 倍程度の時間が見込まれ、観測された潮位変化は深水波であった可能性が高い。父島二見の 10 分ごとの観測値では、噴火に対応する気圧変化は不明であった（図 6）。

Maeno et al. (2022) は父島の空振観測結果にもとづき、噴火開始時刻を 8 月 13 日の 05 時 55 分頃と報告し、噴煙幅と空振の相関が良く、持続的／間欠的噴煙の特徴から、噴火を大きく 4 ステージで識別した。

柳澤 (2021) は、気象庁観測データに基づき、福徳岡ノ場の北約 50km に位置する硫黄島の気象庁地震観測点（千鳥，硫黄島東山）において、13 日 05 時台より低周波震動が連続的に記録されるようになり、

その振幅は、噴煙の最上部が円形に広がった 13 日 14 時過ぎ、間欠的な噴煙が発生したタイミング、再び連続的な噴煙が発生している状況で高まっていたことを報告した。

福徳岡ノ場上空域の輝度温度にもとづく噴煙高度の急上昇は 13 日 06 時頃で、地震動の振幅は噴煙上昇に先駆けて徐々に増大しており、噴火継続中の地震動振幅増大時に噴煙高度も上昇していた（図 8）。

噴煙最盛期の 13 日 15 時頃には、風上では同心円状の輝度温度異常の伝播を、風下の噴煙の拡大部で輝度温度異常の移動を検知した（図 9）。

輝度温度異常の時間推移に着目すると、13 日 07 時頃（噴火発生直後）からだけではなく、13 日 13 時頃（噴煙最盛期）からや、21 時頃（断続的な噴火への移行期）からなど、繰り返し輝度温度異常が検知された（図 10）。輝度温度異常の風下の移動速度は約 40~50m/s で、周囲の雲の動きとも整合的であった。風上では対流雲の動きとは異なる同心円状の輝度温度異常の伝播を検知し、伝播速度は約 50~70m/s であった。ラム波の伝播速度よりは有意に遅く、内部重力波の可能性が高い。伝播距離は 14 日 00 時 40 分頃に約 350km で、輝度温度異常の強度の強弱はあるものの、7 回の伝播を確認できた（図 5-2）。同心円状の輝度温度異常のタイミングは、13 日 21 時から 14 日 00 時 40 分までの地震動および噴煙高度の増大（図 8）、Maeno et al. (2022) の空振の発生タイミングと整合的である。

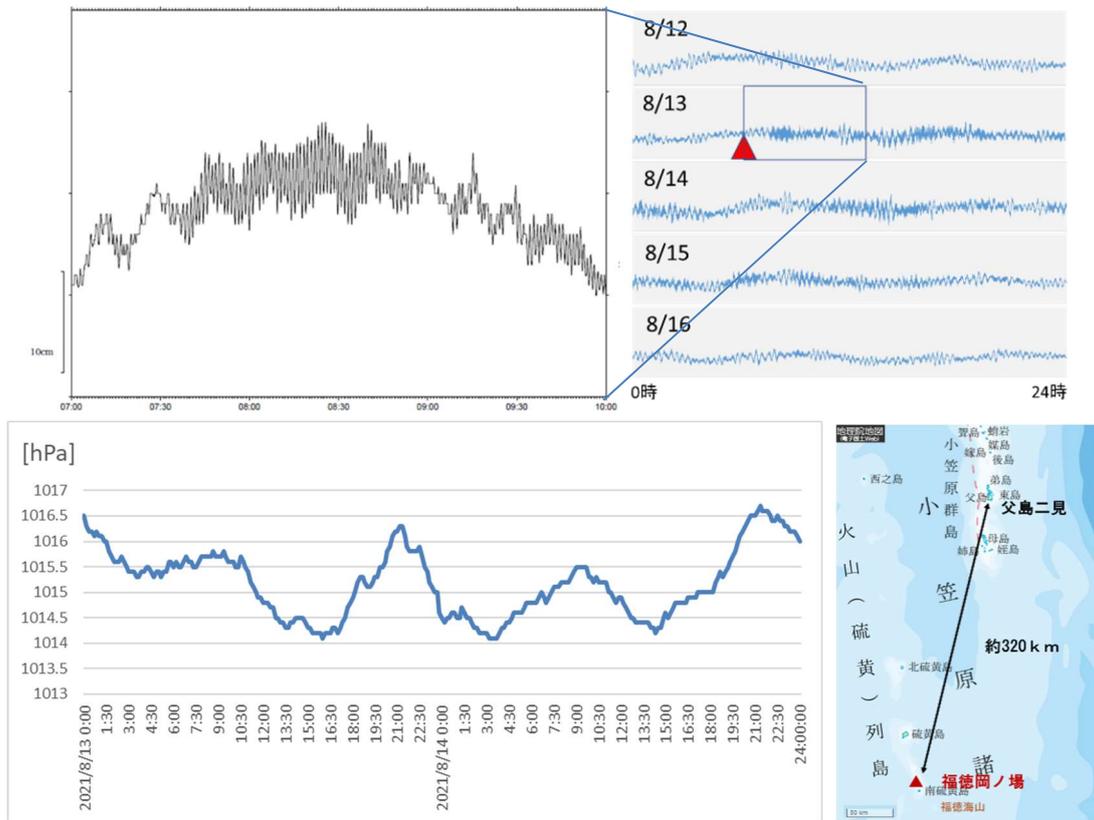


図 6 福徳岡ノ場噴火時（2021 年 8 月 13～15 日）の父島二見の潮位変化（上図）と気圧変化（下図）。（気象庁地震火山部火山監視・警報センター（2021）より）

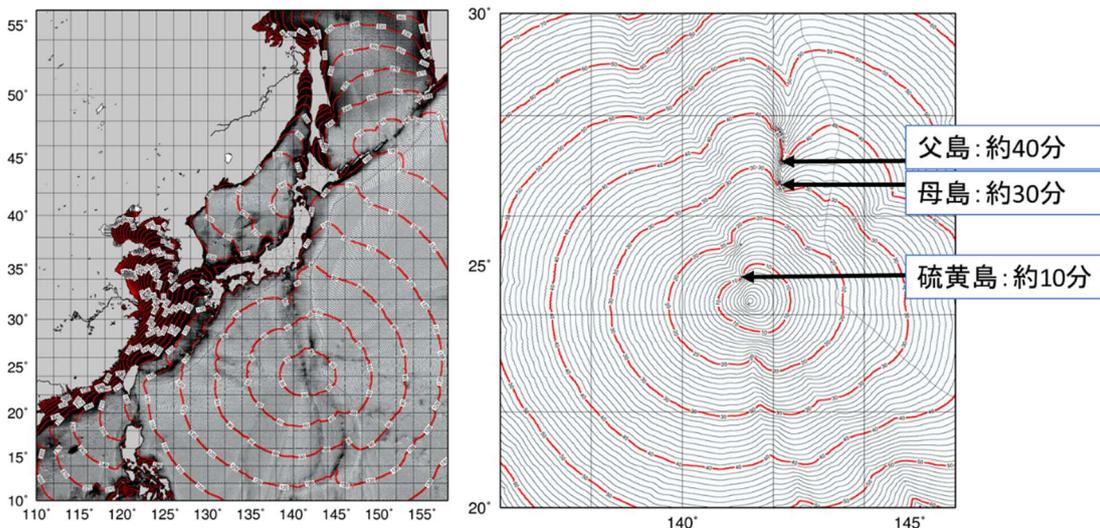


図 7 福徳岡ノ場を波源とする津波の伝播図（左図：広域，右図：拡大域）。
 等高線（左図）：赤（60分）毎に描画。等高線（右図）：赤（10分），黒（1分）毎に描画。
 想定波源：福徳岡ノ場付近（北緯 24.285 度，東経 141.481 度），半径 30 秒（約 0.93km）程度
 海底地形データ：1 分格子

大規模噴火時の気象衛星 2 階差分画像を用いた輝度温度異常の検知

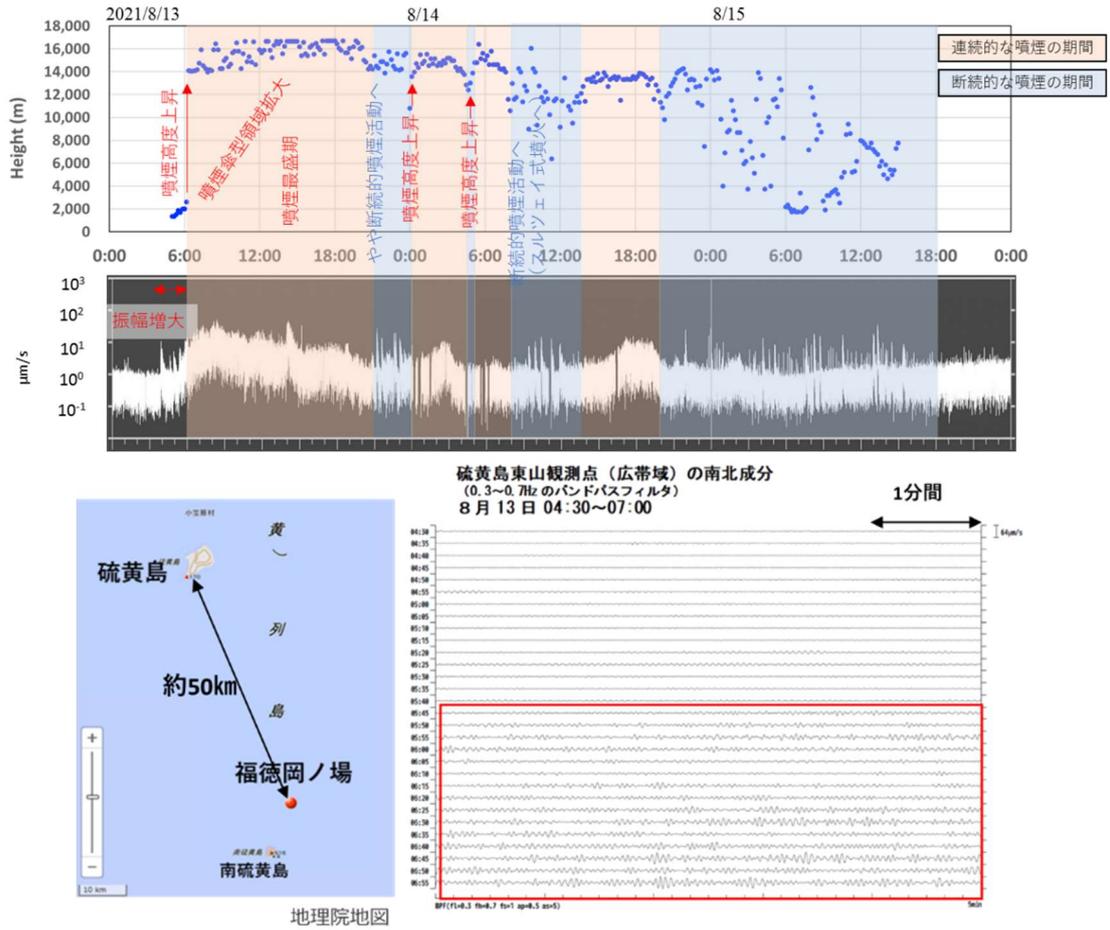


図 8 福徳岡ノ場の噴煙高度（輝度温度）の時系列（上段），硫黄島東山観測点の平均振幅の時系列（中段），硫黄島東山観測点の噴火開始頃の波形（下段）。

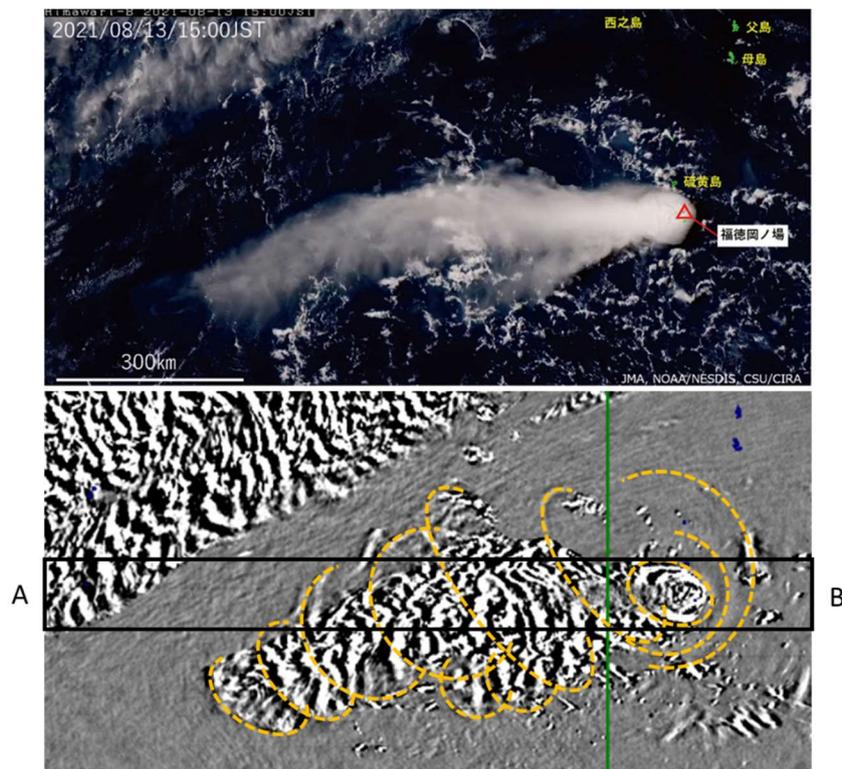


図 9 福徳岡ノ場の噴煙域のひまわり 8 号の衛星可視画像（上段）とバンド 10 の輝度温度の 2 階差分画像（下段）。
（2021 年 8 月 13 日 15 : 00 JST）風上では輝度温度異常の同心円状の伝播，風下では輝度温度異常の移動を観測。

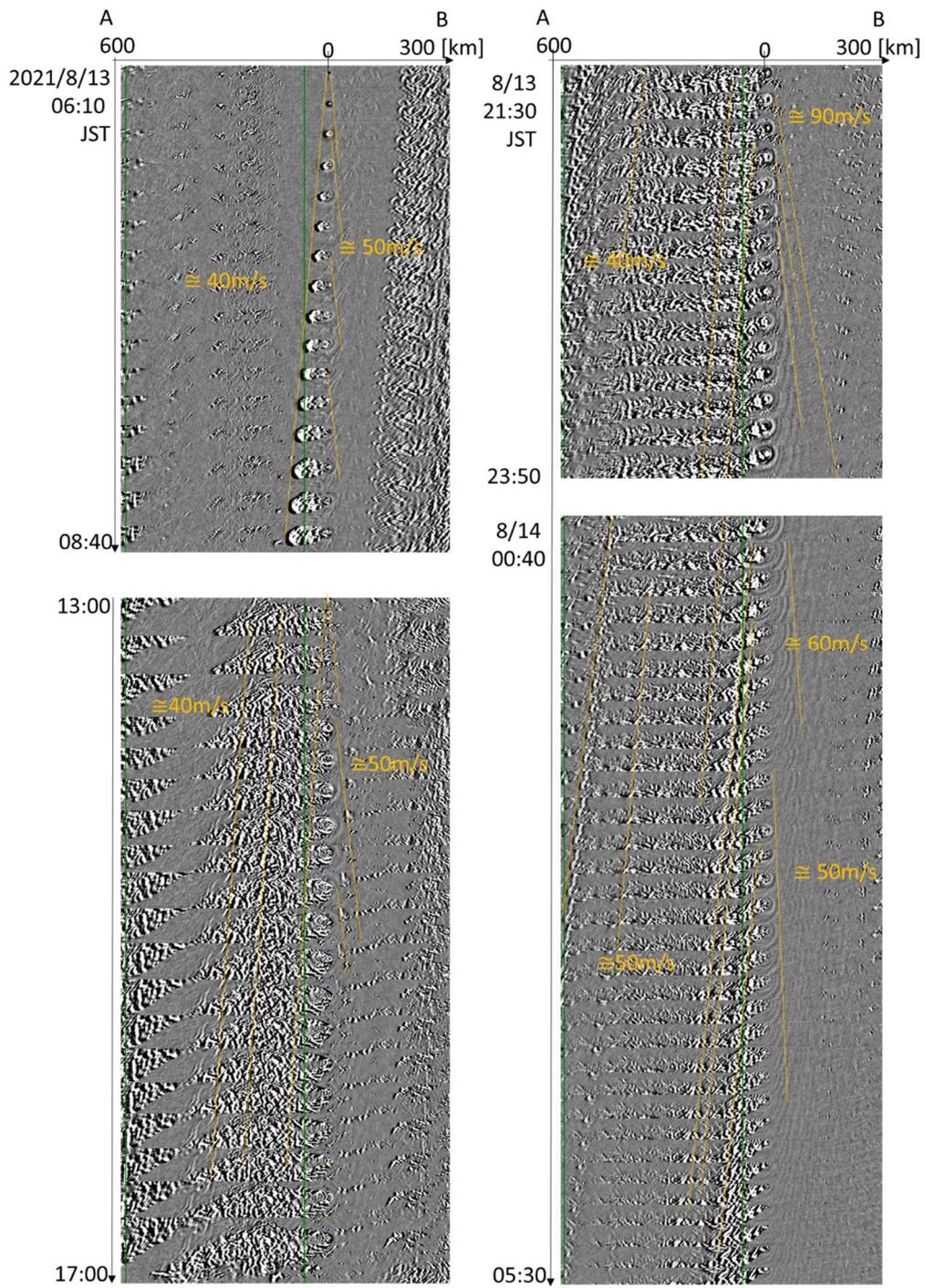


図 10 福徳岡ノ場噴火での輝度温度異常の伝播・移動の平均速度 (40~70m/s).
A-B 断面図 (図 9) を 10 分毎の時系列で表示.

4 火山現象による輝度温度異常の発生と伝播・移動

各火山の輝度温度異常の時系列を図 11 に示す。また、輝度温度 2 階差分画像による輝度温度異常検知状況の一覧を表 3 に示す。

比較のため、可視画像で明瞭な噴煙が観測された 2020 年 1 月 12 日のタールの事例、また、大規模噴火に至っていない桜島と諏訪之瀬島の事例についても輝度温度変化の 2 階差分画像を作成した。

タールでは、日本時間で 2020 年 1 月 12 日 15 時頃から噴火が発生し、VAA によると噴煙は最大で高度 55,000feet (17km) に達した。ひまわり可視画像でも噴煙が確認されたが、輝度温度異常については、噴煙部に輝度温度の平滑な部分を認めるものの、雲もあり明瞭な異常の検知はなかった。

4.1 気圧波による同心円状の輝度温度異常の伝播

トンガ諸島の噴火の他に同心円状の輝度温度異常の伝播が確認されたのは、2021 年福徳岡ノ場、2023 年シベルチ、2023 年ウラウンの 3 事例であった。輝度温度異常の同心円状の伝播は、周辺の気象による雲とは異なった動きであり、噴火による大気波を検知している可能性が高い。伝播速度からラム波ではなく内部重力波であることが示唆された。

福徳岡ノ場では前述の通り噴火発生直後、噴煙の傘型領域拡大～最盛期、断続的な噴火移行期に輝度温度異常を検知した。風上側で同心円状の輝度温度異常の伝播を検知し、もっとも顕著な輝度温度異常は噴火発生から約 15 時間後の 21 時頃に発生しており、伝播距離は最大で約 350 km、伝播速度は最大で約 70m/s であった。

シベルチでは日本時間で 2023 年 4 月 10 日 22 時 10 分頃に高度約 52,000feet (約 16km) の噴煙を検知した。可視画像では山体は雲に覆われており、噴煙の上部のみを検知した。輝度温度 2 階差分画像には雲の影響があるものの、噴煙検知直後から輝度温度異常の同心円状の伝播を検知し、11 日 00 時頃にいったん消散したが、噴火開始から約 5 時間後の 03 時頃により顕著な輝度温度異常の発生があり、同心円状の伝播を検知した。伝播距離はそれぞれ約 350, 400 km で、伝播速度はいずれも約 40 m/s であった。

ウラウンでは、日本時間で 2023 年 11 月 20 日 15 時半ころに噴煙高度 50,000feet (約 15km)、21 日 03 時頃に噴煙高度 60,000feet (約 18km) を検知したが、

いずれの時間帯も輝度温度異常の検知はなかった。03 時からの噴煙が継続する中 (噴煙高度 54,000feet (17 km))、噴火開始から 15 時間後の 21 日 06 時頃に同心円状の輝度温度異常の発生を検知した。輝度温度異常の伝播距離は約 85 km で、伝播速度は約 35 m/s であった。

諏訪之瀬島では 2020 年 12 月 24 日から 25 日にかけて空振を伴う噴火が多発した。噴煙高度は 700~800 m であった。23 時 49 分の噴火では、諏訪之瀬島内で南に約 3.5 km の榊戸原観測点で 69.9Pa (0.7Pa) の空振を観測した (福岡管区気象台地域火山監視・警報センター・鹿児島地方気象台, 2020)。また、これらの空振波形は桜島周辺や霧島周辺の空振計でも検知し、音速での伝搬が確認された。しかしながら、一連の噴火で輝度温度異常の検知はなかった。

4.2 噴煙域の拡大に伴う特定方向への輝度温度異常の移動

噴煙域の拡大に伴う特定方向への輝度温度異常の移動が確認されたのは、福徳岡ノ場、ベズィミアニの 2 事例である。

福徳岡ノ場では前述の通り噴火発生直後、噴煙の傘型領域拡大～最盛期と断続的な噴火移行期に輝度温度異常を検知し、特に噴火最盛期には風下での噴煙域の拡大に対応した輝度温度異常の移動を確認した。

ベズィミアニは日本時間で 2022 年 5 月 28 日 17 時 10 分頃、約 50,000feet (約 15km) の噴煙を検知した。輝度温度異常域が風下に移動する現象が確認され、衛星可視画像の噴煙拡大域と対応しており、移動距離は約 860 km、移動速度は約 40 m/s であった。

桜島では 2023 年 10 月 24 日 03 時 46 分に空振を伴わない噴火が発生し、04 時 30 分頃まで噴火が継続し、噴煙は最大で火口縁上 3,400m に到達した。火山灰の流行は東で、降灰予報 (詳細) において、24 日 10 時までに鹿児島県鹿児島市と垂水市ではやや多量の降灰、宮崎県宮崎市までの降灰到達が予想され、現地調査でも降灰が確認された (福岡管区気象台地域火山監視・警報センター・鹿児島地方気象台, 2023)。輝度温度異常の移動と噴煙の拡大域は整合的であった。輝度温度異常は、04 時 30 分頃桜島上空で確認でき、06 時 10 分に日南市付近までの移動、その後海上で消散した。輝度温度異常の移動距離は約 80 km、移

動速度は約 20m/s であった。降灰によると考えられる輝度温度異常は大規模噴火に至らずとも検知される可能性がある。

4.3 山体崩壊による特定方向への輝度温度異常の移動

Smithsonian Institution ホームページに掲載されている PVMBG (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi) の報告によると、クラカタウでは、2018 年 12 月 22 日 13 時 50 分に噴火が始まり、16 時 29 分頃から火山灰主体の噴煙があがり 19 時 39 分まで継続、噴煙高度は 0.3-1.5 km であった。20 時 23 分から 20 時 59 分にかけて火山岩塊と火山灰の放出が現地の遠望観測で確認された。23 時 03 分にも PVMBG は噴火を報告しており、23 時 05 分の現地遠望観測写真では、山体は噴煙に覆われていた。PVMBG によれば、津波を引き起こしたと考えられる山体崩壊に至った噴火は、日本時間で 23 時 03 分と 23 時 05 分に発生したと考えられており、最初の津波は日本時間の 23 時 27-28 分に沿岸に到達し、高さは 15m であった。前野 (2019) の結果に基づき概算すると、湾内沿岸

部での津波の速度は 35m/s (水深 100~150m 程度) であった。

山体崩壊直後から輝度温度異常を検知した。輝度温度異常は特定方向に移動しながら弧状の形状となった。スンダ海峡の湾内での輝度温度異常の移動速度は十分な時間分解能がないが、23 日 13 時 20 分頃までに距離約 1,700km の伝播を検知しており、平均速度は約 35m/s であり、湾内の津波速度と同等であった。潮位変化が輝度温度異常を励起するメカニズムは不明ながら、弧状の輝度温度異常の移動は周辺の雲の動きとは異なっており、形状も潮位変化の移動を示唆する。輝度温度異常として潮位変化を検知していると仮定すると、スンダ海峡の外では水深が深くなるが、加速はなく、湾内の津波 (浅水波) が湾外で深水波へと移行したことを示唆する。

ダーウィン VAAC によると、翌朝 23 日 09 時 25 分に高度 55,000feet (約 17km) の噴煙の報告があり、その時間帯の衛星可視画像では噴煙が確認されているが、火口付近での輝度温度異常の新たな検知はなかった。

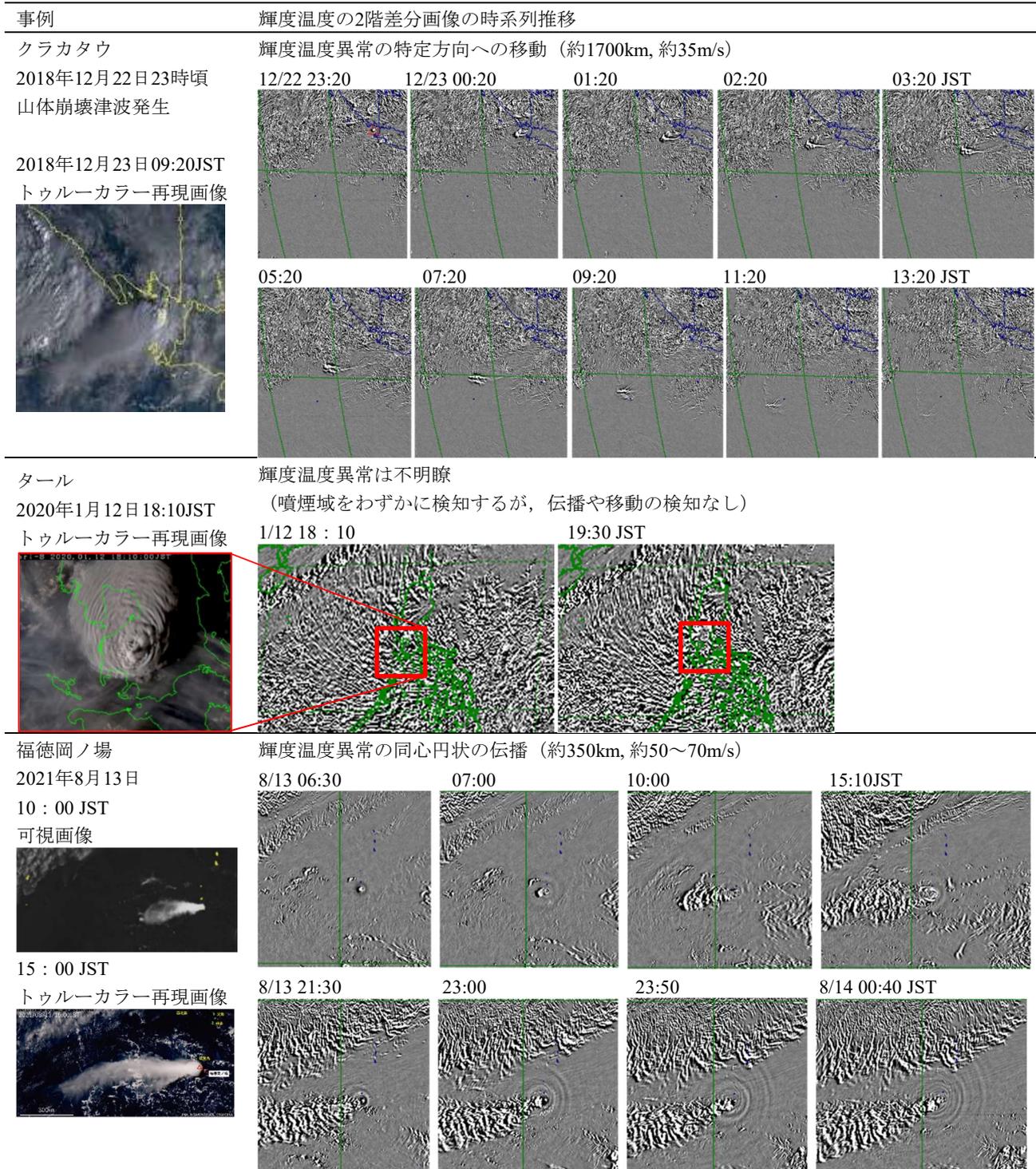


図 11 気象衛星ひまわり 8 号・9 号のバンド 10 の輝度温度 2 階差分画像の時系列 (各火山)

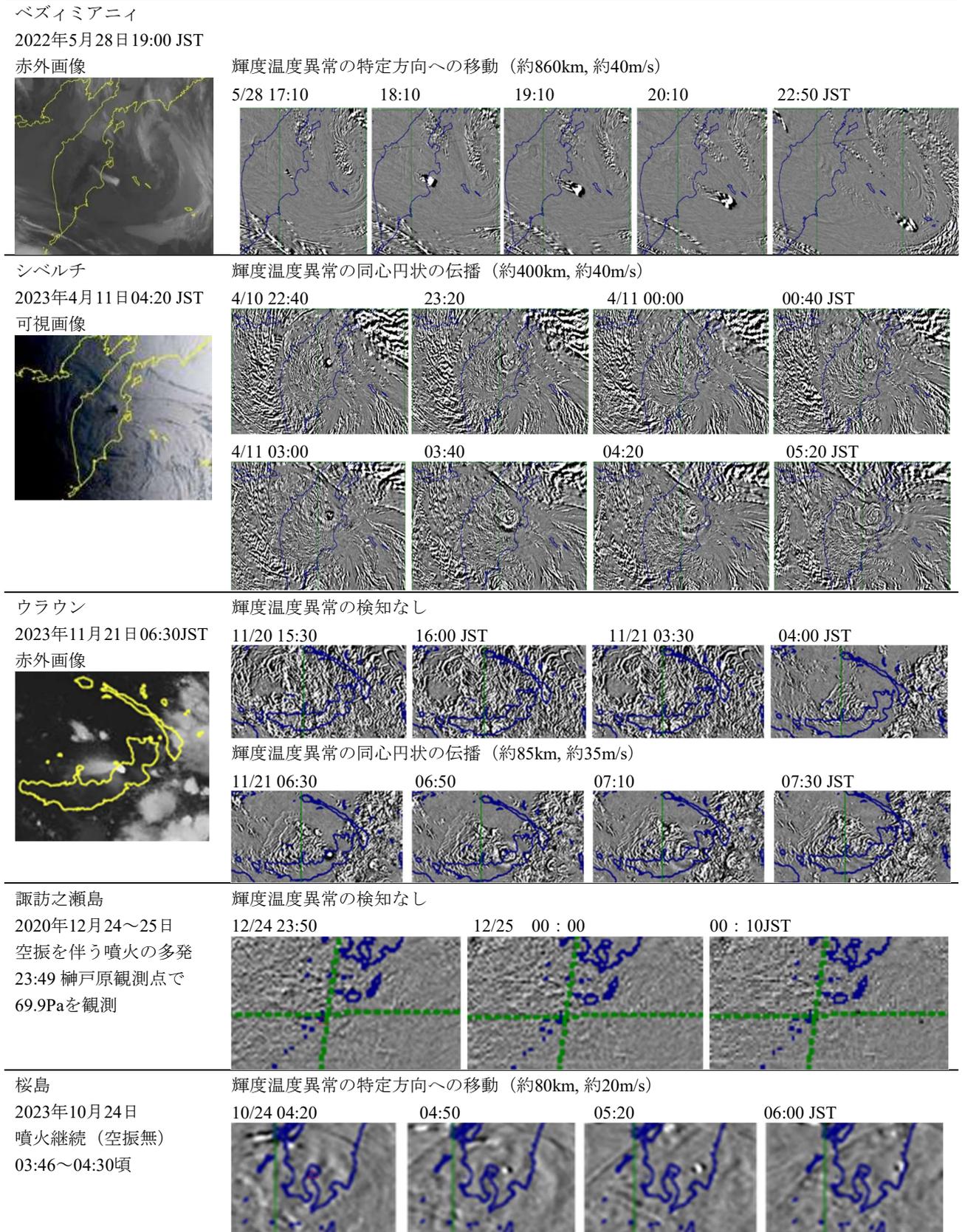


図 11 つづき

表 3 気象衛星ひまわり 8号・9号の輝度温度 2 階差分画像による輝度温度異常検知状況一覧

火山名	日付 (日本時間)	現象	噴煙高度	気圧差	バンド毎の検知			輝度温度異常の伝播・移動				参照
					8	10	12	範囲	形状	速度[m/s]	特記事項	
フンガ・ト ンガーフン ガ・ハアバ イ (トン ガ)	2022年 1月15日	マグマ水蒸 気噴火	(衛星画像視 差) 頂部約55km 傘型領域約35km	≒27hPa: ヌクアロ ファ 2hPa:父島	明瞭	明瞭	明瞭	全球的	同心円	≒310 ≒200~ 280	ラム波 内部重力波	図1, 5-1
クラカタウ (インドネ シア)	2018年 12月22日	山体崩壊	(遠望目視) 約1.5km	不明	やや不 明瞭	明瞭	不明瞭	局地的 約1700km	特定方向	≒35	潮位変化	図5-2,11
	12月23日	プリニー式 噴火	(輝度温度) 約17km	不明	無	無	無					
タール (フ イリピン)	2020年 1月12日	水蒸気噴火	(輝度温度) 約17km	不明		不明瞭						図11
福岡ノ場 (日本)	2021年 8月13日	マグマ水蒸 気噴火	(輝度温度) 約16km	不明	明瞭	明瞭	やや不 明瞭	約350km 約600km	同心円 特定方向	≒50~70 ≒40~50	内部重力波 噴煙拡大域	図5-2,8,9, 10,11
ベズィミア ニ (ロシ ア)	2022年 5月28日	プリニー式 噴火	(輝度温度) 約15km	不明	明瞭	明瞭	不明瞭	局地的 約860km	特定方向	≒40	噴煙拡大域	図5-2,11
シベルチ (ロシア)	2023年 4月10日	プリニー式 噴火	(輝度温度) 約16km	不明	明瞭	明瞭	不明瞭	局地的 約400km	同心円	≒40	内部重力波	図5-2,11
ウラウン (パプアニ ューギニ ア)	2023年 11月20日	プリニー式 噴火	(輝度温度) 約15km	不明	無	無	無					図5-2,11
	11月21日	プリニー式 噴火	(輝度温度) 約18km	不明	明瞭	やや不明 瞭	やや不 明瞭	局地的 約85km	同心円	≒35	内部重力波	
諏訪之瀬島 (日本)	2020年 12月24日	噴火 (空振有)	(遠望カメラ) 約700~800m	0.7 hPa:榊 戸原	無	無	無					図11
桜島 (日 本)	2023年 10月24日	噴火 (空振無)	(遠望カメラ) 約3400m	無	不明瞭	やや不明 瞭	不明瞭	局地的 約80km	特定方向	≒20	噴煙拡大域	図11

5 噴火継続中の輝度温度異常の発生・伝播

気圧波由来と考えられる同心円状の輝度温度異常の伝播が確認されたのは、2022 年トンガ諸島の噴火の他に、2021 年福徳岡ノ場、2023 年シベルチ、2023 年ウラウンの 3 事例であり、福徳岡ノ場、シベルチでは複数回の輝度温度異常の発生と伝播を検知した。福徳岡ノ場は噴火発生から約 15 時間後に、シベルチでは約 5 時間後に最も顕著な輝度温度異常の発生を検知した。ウラウンでは 2 度の VAA 発表（噴煙高度 50,000 と 60,000feet）があったが、いずれの発表時にも輝度温度異常の発生の検知はなく、2 度目の発表の 3 時間後に輝度温度異常の発生を検知し、同心円状の伝播を確認した。以上により、輝度温度異常の発生と伝播は、必ずしも噴火開始直後に発生するものではなく、かつ、繰り返し発生する可能性があることが示された。火山噴火を由来とする気圧波の変化の検知についてまとめた澤田（2003）によると、1991 年ピナツボ噴火のように、強い噴火活動が単発でなく断続すると、長周期と短周期の波が混在した気圧波が断続して発生する可能性を指摘しており、本調査結果とも整合的である。

山体崩壊や溶岩ドームの崩落がマグマの貫入によって引き起こされる場合、崩壊や崩落に伴うマグマの急激な減圧発泡により爆発が誘発されることがある。1888 年磐梯山や 1980 年セントヘレンズをはじめ、地質学的な知見などから多数の報告事例がある。2018 年クラカタウの事例も同様であり、この場合、山体崩壊による津波発生は噴煙高度上昇前である。

6 まとめ

大規模噴火発生時（噴煙高度 50,000 feet 以上）の気象衛星ひまわり 8 号・9 号による輝度温度画像の 2 階差分による輝度温度異常の検知状況を調査した。

噴煙が成層圏から中間圏に至ったトンガ諸島の噴火ではバンド 12 の輝度温度異常が最も明瞭であったが、その他噴煙高度 50,000 feet 前後の噴火時の輝度温度異常を明瞭にとらえていたのはバンド 8、潮位の変化までをとらえた可能性があるのはバンド 10 であった。大気（火山ガス）組成との関連は不明ながら、噴煙高度による感度の違いが寄与することが示された。

輝度温度異常の同心円状の伝播はトンガ諸島の噴火では爆発的な噴火に伴うラム波や内部重力波など

の気圧波であると報告されたが、その他噴煙高度 50,000feet 前後の噴火では、伝播速度は音速よりも有意に遅く、最大でも 70m/s で、ラム波ではなく、内部重力波であることが示唆された。このような現象は、噴火発生時のみならず、噴火継続中にも発生した。

大規模噴火に至らない場合でも、噴煙拡大域が輝度温度異常として検知され、その場合は同心円状の伝播ではなく、特定方向（風下）への輝度温度異常の局地的な移動が観測される事例があった。

山体崩壊による潮位変化に伴う輝度温度異常の発生も検知した。山体崩壊前は必ずしも噴煙高度は高くなく、山体崩壊による津波発生を噴煙高度の監視で事前に検知することは困難ながら、衛星画像による輝度温度異常の検知が潮位変化をとらえられる可能性も示唆した。

謝辞

本調査にあたり、輝度温度差分画像の作成方法について、気象衛星センターの皆様にご助言いただいた。「津波予測技術に関する勉強会」および「火山噴火等による潮位変化に関する情報のあり方検討会」の関係者の方々には、各報告書内容について解説いただいた。また、本稿は匿名の査読者により大きく改善した。

記して感謝の意を表する。

文献

ウィンチェスター、サイモン；柴田裕之 訳 (2004)：クラカタウの大噴火—世界の歴史を動かした火山，早川書房，466pp. ISBN 4-15-208543-6

気象庁 (2022a)：津波予測技術に関する勉強会「フンガ・トンガーフンガ・ハアパイ火山の噴火により発生した潮位変化に関する報告書」，
https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/study-panel/tsunami/tonga-houkokusho/houkoku_honbun.pdf, (参照2023-12-01).

気象庁 (2022b)：火山噴火等による潮位変化に関する情報のあり方検討会（報告書），
https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/study-panel/tonga-kentoukai/houkoku/houkoku_honbun.pdf, (参照 2023-12-01).

気象庁気象衛星センター：画像特性（バンド 8 からバンド 10, <https://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/prod/>

- band_b08tob10.html, (参照 2023-12-01).
- 気象庁気象衛星センター：画像特性（バンド 12），
https://www.data.jma.go.jp/mscweb/ja/prod/band_b12.html.
- 気象庁地震火山部火山監視・警報センター（2021）：福徳岡ノ場の火山活動解説資料（令和 3 年 9 月）
https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/tokyo/21m09/331_21m09.pdf, (参照 2023-12-01).
- 久利美和・桑山辰夫・山田基史・福満修一郎（2023）：気象衛星「ひまわり」の 2 階差分画像を用いた大規模噴火時の気圧波検知の事例，日本地球惑星連合大会予稿，SVC33-05.
- 澤田可洋（2003）：80 型気圧計で観測された 1991 年 6 月 15 日ピナツボ噴火の気圧波－全気象官署における気圧計の記録－，測候時報，**70**，189-216.
- 新堀敏基・桜井利幸・田原基行・福井敬一（2013）：気象レーダー・衛星による火山噴煙観測－2011 年霧島山（新燃岳）噴火の事例－，験震時報，**77**，139-214，
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/kenshin/vol77p139.pdf>, (参照 2023-12-27).
- 新堀敏基，林 昌宏，石元裕史（2023）：気象衛星による大規模噴煙解析－2022 年 1 月 15 日トンガ海底火山噴火の事例－，験震時報，**87**：2，
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/kenshin/vol87_2.pdf, (参照 2023-12-27).
- 福岡管区気象台地域火山監視・警報センター・鹿児島地方気象台（2020）：諏訪之瀬島の火山活動解説資料（令和 2 年 12 月），
https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/20m12/511_20m12.pdf, (参照 2023-12-01).
- 福岡管区気象台地域火山監視・警報センター・鹿児島地方気象台（2023）：桜島の火山活動解説資料（令和 5 年 10 月），
https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/23m10/506_23m10.pdf, (参照 2023-12-01).
- 前野 深（2019）：2018 年インドネシア・クラカタウ火山噴火・津波，<https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/VRC/krakatau/>, (参照 2023-12-01).
- 村山信彦（1969）：1956 年 3 月 30 日のベズイミヤン火山大爆発による気圧振動の伝搬と火山灰の移動，験震時報，**33**，1-11.
- 柳澤宏彰（2021）：2021 年 8 月 13 日に発生した福徳岡ノ場の噴火，日本火山学会講演予稿集，119，
https://doi.org/10.18940/vsj.2021.0_119, (参照 2023-12-01).
- Carr, J. L., Á. Horváth, D. L. Wu, M. D. Friberg (2022): Stereo plume height and motion retrievals for the record-setting Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption of 15 January 2022, *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2022GL098131,
<https://doi.org/10.1029/2022GL098131>, (参照 2023-12-01).
- Maeno, F., T. Kaneko, M. Ichihara, Y. J. Suzuki, A. Yasuda, K. Nishida, and T. Ohminato (2022): Seawater-magma interactions sustained the high column during the 2021 phreatomagmatic eruption of Fukutoku-Okanobu, *Commun. Earth Environ.*, **3**, 260,
<https://doi.org/10.1038/s43247-022-00594-4>, (参照 2023-12-01).
- NASA (2022): Tonga Volcano Plume Reached the Mesosphere,
<https://earthobservatory.nasa.gov/images/149474/tonga-volcano-plume-reached-the-mesosphere>, (参照 2023-12-01).
- Otsuka, S. (2022): Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8, *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2022GL098324,
<https://doi.org/10.1029/2022GL098324>, (参照 2023-12-01).
- Smithsonian Institution : Krakatau - Global Volcanism Program, <https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN201810-262000>, (参照 2023-12-01).

(編集担当 山里 平)