

## 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—

Analysis of Large-scale Eruption Clouds with Meteorological Satellites:  
A Case Study of the Eruption at Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022

新堀敏基<sup>1</sup>, 林 昌宏<sup>2</sup>, 石元裕史<sup>3</sup>

Toshiki SHIMBORI<sup>1</sup>, Masahiro HAYASHI<sup>2</sup>, and Hiroshi ISHIMOTO<sup>3</sup>

(Received October 11, 2022; Accepted January 27, 2023)

**ABSTRACT:** A large-scale eruption cloud from the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai submarine volcano on 15 January 2022 was observed by Japan Meteorological Agency's Himawari-8 geostationary meteorological satellite. Visible imagery showed the start of a large-scale eruption between 03:57 and 04:07 UTC. The first cloud from the eruption exhibited directivity with features closely analogous to the blast cloud from the Mount St. Helens eruption of 18 May 1980. Subsequent umbrella-shaped cloud formed by the expansion of the first cloud had a cloud-top undercooling of approximately 16°C in infrared imagery. Analysis showed a faster expansion rate than general law, indicating that pressure may not have been balanced at the front of the umbrella cloud. The volcanic ash cloud that followed was transported westward by easterlies in the middle atmosphere. In such satellite analysis of large-scale eruption clouds, the issues of parallax error and immediate estimation for cloud height should be noted. Cloud position shift due to satellite parallax error was also seen with the Fukutoku-Oka-no-Ba eruption of 13 August 2021. This problem should be addressed in relation to potential large-scale future eruptions in Japan. For immediate estimation of cloud height in an undercooling state, a physics-based eruption source model is needed.

#### 1 はじめに

海域で発生する火山噴火は、陸域と比べて、外来水である海水の影響により規模が大きく変化しうるが、その観測方法は限られている。2020年代に入り、国内では2021年8月13日に福徳岡ノ場、国外では2022年1月15日にトンガのいずれも浅海底で規模の大きな爆発的噴火が発生し、静止気象衛星ひまわり8号(Himawari-8, Bessho et al., 2016)が重要な観測を果たした。いずれの噴火においても、発生した火山灰雲の影響を予測する航空路火山灰情報(VAA)は、Himawari-8の情報源に基づいて発表された。

2015年7月7日から正式運用を開始し2022年12月13日まで観測運用にあったHimawari-8は、観測デー

タが広く公開(オープンアクセス)されている。このため、ひまわりデータを用いた火山現象の衛星解析については、噴火に伴う噴煙(例えば, Smart, 2022; Carr et al., 2022; 山崎・塚田, 2022; Proud et al., 2022)のみならず、海面上に噴出した漂流軽石(軽石ラフト, 例えば, 池上, 2021; 及川, 2022)や大気中を伝搬する気圧波(例えば, Otsuka, 2022; 西田, 2022)など、すでに多くの学会報告や論文出版がされている。また防災上も津波予測技術に関する勉強会(2022)を踏まえ、火山現象に起因する潮位変化に関する情報発表では、国内外のVAAによる大規模噴火の検知とともに、ひまわりの赤外面像の時間変化(2階微分画像)による気圧波伝搬の解析が必要となっている(火山噴火等に

<sup>1</sup> 気象研究所火山研究部, Department of Volcanology Research, Meteorological Research Institute

<sup>2</sup> 気象研究所台風・災害気象研究部, Department of Typhoon and Severe Weather Research, Meteorological Research Institute  
現所属: 気象観測研究部, Department of Observation and Data Assimilation Research, Meteorological Research Institute

<sup>3</sup> 気象研究所気象観測研究部, Department of Observation and Data Assimilation Research, Meteorological Research Institute

よる潮位変化に関する情報のあり方検討会, 2022).

VAA や降灰予報を公表している気象庁においては、噴火発生時にその規模を即時把握する必要がある。しかしながら、大規模噴煙の気象衛星による観測結果を現業で利活用するには、いくつか課題があることが改めて分かった。本稿では、火山灰予測の観点から、トンガ海底火山噴火の事例の衛星解析を通して、大規模噴火を想定した現業上の課題をまとめておく。なお内容の一部は、速報的な解析結果(新堀・他, 2022a, 2022b, 2022c) を精査し直したものである。

## 2 気象衛星で観測された大規模噴煙

本章では、2.1 節で大規模噴煙を観測した Himawari-8 の概要について述べた後、2.2 節で 2022 年 1 月 15 日に発生したフンガ・トンガフンガ・ハアパイ (HTHH) 火山の噴火に伴う大規模噴煙、すなわち傘型噴煙(以下「かさぐも傘雲」とも呼ぶ)とそれに続く火山灰雲(以下「はいぐも灰雲」と呼ぶ)の解析結果について報告する。

### 2.1 大規模噴煙を観測したひまわり 8 号

(関連図表: Figs. A1-A3, Table 1)

#### (1) ひまわり 8 号の概要

Himawari-8 は、140.7°E の赤道上空約 35800 km を地球の自転と同じ速度で周回する静止気象衛星で、地球上の同じ範囲を連続して観測することが可能である。全球の撮像は、搭載されている可視赤外放射計(AHI)の走査鏡(観測ミラー)で西から東へ一方向観測しながら、北から南へ 23 回の走査(23 スワス)で行われる。1 回の全球(フルディスク)観測に要する時間は 10 分以内であり、ほぼ 10 分ごとにその画像を得ることができる(Bessho et al., 2016; 尾関・佐々木, 2016, 2018; 気象衛星センター, 2022)。

#### (2) 搭載センサーの特徴

Himawari-8 には 16 の波長帯(バンド)を観測するセンサーである AHI が搭載されている。それぞれのバンドおよび水平分解能を Table 1 に示す。ただし、各

バンドの観測波長は中心波長とそのまわりの半値全幅である。また、水平分解能は衛星直下点(SSP)における値であり、観測地点が SSP から離れるほど 1 画素あたりの面積要素が大きくなるため分解能は低下する。

灰雲の観測には、可視画像(B03, 中心波長: 0.64  $\mu\text{m}$ )、赤外画像(B13, 10.4  $\mu\text{m}$ )、ひまわり 7 号(MTSAT-2)以前の赤外 2 (12.0  $\mu\text{m}$ ) に近い画像(B15, 12.4  $\mu\text{m}$ ) との輝度温度差を取った赤外差分画像(B13-B15)<sup>1</sup>、3.9  $\mu\text{m}$  帯画像(B07)のほか、火山ガス(SO<sub>2</sub>)に感度のある 7.3  $\mu\text{m}$  帯画像(B10)および 8.6  $\mu\text{m}$  帯画像(B11)が利用されている(例えば、土山, 2017; Ishii et al., 2018; 林・他, 2018; 気象衛星センター, 2022)。

### (3) 大規模噴煙に対する衛星画像の利用

噴煙・灰雲に対する可視画像、赤外画像、赤外差分画像<sup>2</sup>および 3.9  $\mu\text{m}$  帯画像の利用の仕方は、基本的に新堀・他(2013)のときと同様である。Himawari-8 になり時空間分解能が上がったため、雲頂輝度温度の細かな変化が観測できるようになった。これらの画像のほか、新しく作成されるようになった RGB 合成画像(志水・他, 2018)については、主に以下の (7), (4) の画像を利用している(その他の画像については、例えば、気象衛星センター(2022)を参照)。

いずれの衛星画像の利用においても、大規模噴煙では、位置および面積を推定するとき、視差による位置ズレに注意する。一般に衛星画像では、噴煙・灰雲の位置が SSP から遠くなるほど、また雲頂が高くなるほど、衛星天頂角が開く影響により衛星と反対方向への位置ズレが無視できなくなる(例えば、澤田, 2003a)。衛星視差による雲の位置ズレの補正については Appendix 1、雲域面積の補正率については Appendix 2 を参照されたい。

#### (7) RGB 合成画像 (True Color RGB)

True Color RGB は、3 バンドの可視画像から観測波長の長い順に B03 を赤、B02 (0.51  $\mu\text{m}$ ) を緑、B01 (0.47

<sup>1</sup> 以下、特に指定しない限り、Himawari-8 の赤外画像と輝度温度は B13、赤外差分画像と輝度温度差は B13-B15 を指す。

<sup>2</sup> 赤外差分画像では、火山灰(SiO<sub>2</sub>)と水蒸気で 11  $\mu\text{m}$  帯と 12  $\mu\text{m}$  帯の吸収係数が逆転する(輝度温度差が灰雲は負値、水雲・氷雲は正值になる)性質に基づいて、灰雲を検知する。ただし、噴煙・灰雲が大規模噴火などにより光学的に極端に厚い場合や海底噴火などにより大量の水蒸気を含む場合は見逃し、オーバーシュートなどにより非常に低い輝度温度の場合は誤検知することがある(例えば、鎌田, 2006; 林・他, 2018)。

$\mu\text{m}$ ) を青に割当てて作成された RGB 合成画像である (志水・他, 2018). 反射率の高いところを明るく (白く), 低いところを暗く (黒く) 表現する B03 モノクロ画像では, 灰雲はやや暗い灰色に見え, 水雲・氷雲との判別が難しい. True Color RGB では, 濃密な灰雲は茶褐色～灰褐色で見えるので, 水雲・氷雲と判別し易くなる. ただし, 可視画像を用いて作成されるため, 利用は日中に限られる.

なお気象庁では, 可視の 3 バンドに近赤外の 1 バンド (B04, 0.86  $\mu\text{m}$ ) と赤外の 1 バンド (B13) を使用してより肉眼で見るのに近い色調を再現したトゥルーカラー再現画像 (Murata et al., 2018) も運用されている.

#### (4) RGB 合成画像 (Ash RGB)

Ash RGB は, 灰雲の検知に有効な赤外差分画像 (B13-B15) を赤,  $\text{SO}_2$  の検知に有効な赤外差分画像 (B13-B11) を緑, 赤外画像 (B13) を青に割当てて作成された RGB 合成画像である (志水・他, 2018; 林・他, 2018). Ash RGB では, 灰雲が赤色系,  $\text{SO}_2$  が緑色系, 混合部分が黄色系で見えるので, 特に火山灰と  $\text{SO}_2$  の識別に有効である (例えば, Ishii et al., 2018; 林・他, 2018). 赤外画像を用いて作成されるため, 利用は夜間も可能である. ただし, 赤外差分画像による火山灰検知の適用限界 (脚注 2 参照) を超えた場合の見逃しや誤検知は残る.

なお B15 は赤外 2 より波長が長くなり水蒸気の吸収を受け易くなったため, 火山灰プロダクト (Hayashi and Ishimoto, 2018; Ishii et al., 2023) では, 波長は B13 に近いが水蒸気の影響を受けにくい B14 (11.2  $\mu\text{m}$ ) に変えた, B13-B14 が灰雲の検出に使われている.

## 2.2 2022 年トンガ海底火山の大規模噴煙の解析結果 (関連図表: Figs. 1-3, Table 2)

HTHH (20.536°S, 175.382°W, 標高: 114 m (噴火前)) は, 太平洋プレートがインド-オーストラリアプレートへ沈み込むトンガ-ケルマディック海溝の西側前線に位置する海底火山である. 東側のフンガ・トンガ島と西側のフンガ・ハアパイ島の間に形成されていた火砕丘は, 南側に広がる水深 150 m 程度の浅海カルデラの外輪にあたる (Cronin et al., 2017). 2022 年の海底

噴火は Himawari-8 で検知され, VAA の第一報はウェリントン VAAC から 1 月 15 日 04:39 UTC に発表された. その後, VAA の続報は西に隣接するダーウィン VAAC から 22 日 23:40 UTC まで継続し, 灰雲の雲頂高度は 50000~63000 ft (約 15~19 km)<sup>3</sup> で通報された (Table 2). この噴火に伴う一連の噴煙・灰雲について, Himawari-8 のフルディスク観測の赤外画像の一部を噴火発生前 (Fig. 1), 傘雲形成期 (Fig. 2), 灰雲輸送期 (Fig. 3) に分けて示す. ただし, 各画像名に示す時刻は, フルディスク観測の終了時刻ではなく, HTHH 付近 (スワス 16) の走査時刻である. また全ての画像は経緯度座標に投影されており, 衛星視差による位置ズレ補正 (Appendix 1) は適用されていない.

以下では, 各期間ごとに衛星解析の結果について述べる.

### 2.2.1 1 月 15 日 03:57~04:07 UTC の噴火検知 (関連図表: Figs. 4-6)

Himawari-8 では, 1 月 15 日 04:07 UTC に HTHH 火山の爆発的噴火を検知した. Fig. 4 に示す可視画像では, 噴火に伴い海底火山の海面上を東へ広がる, 最初の雲 (次項) の起源が観測された. Fig. 5 に示す赤外画像でも, 該当するごく一部分でまわりより低い最低輝度温度  $-2.4^\circ\text{C}$  が観測された. 輝度温度が著しく低くないことから, この時点では衛星画像に位置ズレが生じるほど, 雲頂高度は高くないと考えられる. また赤外差分画像では輝度温度差が負値となる部分は検出されなかったが, これは海底噴火の直後で大量に含まれていた水蒸気の影響が考えられる. 撮像時間間隔から Himawari-8 により推定できる噴火発生時刻は, 03:57~04:07 UTC の間である (Figs. 4 and 5).

気象庁全球サイクル解析 (GA) による噴火発生時の大気場を Fig. 6 に示す. 気象庁移流拡散モデル (JMA-ATM, 新堀・石井, 2021) の大気プロファイル出力のモジュールを用いて, 00, 06 UTC の GA の対流圏~下部成層圏 (10 hPa まで) と上部成層圏~中間圏 (0.01 hPa まで) の気圧面格子点値 (GPV) を, 時刻 04 UTC に HTHH 上空に時空間内挿して出力した気温, 相対湿度および風である. GA の空気密度から算出した浮力振動数 (プラント・バイサラ振動数) も合わせて示した. GA の気温と風の高度 30 km 以下の鉛直プロファ

<sup>3</sup> 本稿で示す高度は, 特に指定しない限り, 海拔 (asl) で表す.

イルの妥当性は、HTHH 火山の最寄りのゾンデサイトであるフィジーのナンディ国際空港 (NFFN, HTHH 火山を起点とする方位角 N69°W, 距離 815 km) において 00 UTC のゾンデ観測との比較により確認している。

Fig. 6 の気温と風の分布から、噴火発生時の火山上空の対流圏界面は最低気温-80.6°C, 高度 17 km 付近, 成層圏界面は気温-9.4°C, 高度 43 km 付近にあり, 夏半球の緯度 20 度帯の特徴である対流圏の偏西風と成層圏の偏東風の違いが明瞭である。対流圏内は, 下層北西よりから上層南西よりの風に回転しており, 東方向に広がった最初の雲がこの風の影響を受けた可能性は否定できない。

## 2.2.2 1月15日 04:07~04:17 UTC の最初の雲

(関連図表: Figs. 6-10 and A1, Table 1)

続く 04:17 UTC までの 10 分間に観測された最初の雲は, Fig. 7 に示す Himawari-8 の画像からは衛星視差を考慮しても指向性<sup>4</sup>があるように見える。赤外面像(雲頂強調画像, Fig. 7 右)による最低輝度温度は火山の東南東方向上空で-86.8°Cが観測された。大気場の最低気温 (Fig. 6 左) より 6°C以上低下しており, この時点で断熱膨張による噴煙頂部の過冷却 (undercooling, Woods and Self, 1992; Sparks et al., 1997) が生じていたと考えられる。すなわち, この雲は大きな上昇を伴っており, また Himawari-8 の SSP から遠く衛星天頂角が大きいことから, ここで 2.1 節 (3) で注意した衛星視差による雲の位置ズレを確認する。

Himawari-8 (HTHH 火山を起点とする SSP の方位角 N70°W, 距離 5291 km, 海面上での衛星天頂角 54.7°) と同時に観測された, 137.2°W の赤道上空にある米国の静止気象衛星 GOES-17 (N66°E, 4736 km, 49.2°) から見た画像を Fig. 8 に示す。西北西上空にある Himawari-8 から見た画像 (Fig. 7) では火山の東南東方向に位置ズレしているのに対し, 東北東上空にある GOES-17 (Fig. 8) からは西南西方向に位置ズレしていることが分かる。ただし最初の雲が突出してくる向きは, GOES-17 がほぼ真っ直ぐに見えるのに対して, Himawari-8 は相当斜めに伸びている。これは衛星天頂角にやや開きはあるが, 最初の雲が Himawari-8 の視線方向に傾いて上昇したからのように見える。そして

GOES-17 では見られない雲の西側面が Himawari-8 では見えている。そこで, 同波長帯の赤外面像で輝度温度-40°C以下のうち, 両衛星いずれからも見えた雲頂部分を計測し (Fig. 9 の各黒線), 高度 20 km 以上を仮定して位置ズレ補正を行った (補正の方法は Appendix 1 参照)。その結果, Fig. 9 に白線で示すように, 雲頂部分の広がりには火山の直上ではなくその東側上空に修正され, この輪郭部分の高度はおおよそ 21~22 km と推測された。この内部の最低輝度温度の記録位置における雲頂高度は, 約 32 km 西北西に位置ズレ補正した地点 (HTHH 火山の約 19 km 南東) で, おおよそ 23 km と推測された。ただし, 赤外面像の水平分解能 (Table 1 参照, GOES-17 も同じ) により, 高度には±2 km 程度の誤差 (Carr et al., 2022) がある。また対流圏界面を越えた過冷却状態で, 最低輝度温度の記録位置における局所的な雲頂高度が, 雲域全体の最高到達高度と一致するとは限らないことも注意を要する。

位置ズレ補正前後の雲頂部分 (Fig. 9) を比較すると, 各衛星画像ともその形状 (面積) は大きく変化していないように見え, また Himawari-8 と GOES-17 の両衛星画像を比較しても同様である。そこで, HTHH 上空において, 雲域面積が雲頂高度とともに位置ズレによって補正される割合 (Fig. 10) を確認する (補正率の計算は Appendix 2 参照)。この図から, HTHH 上空で高度 20 km 付近の雲域面積は, Himawari-8 の場合 1% 程度の縮小に留まり, 衛星天頂角の開きが小さい GOES-17 の方はさらに小さい。したがって, この事例では雲域面積の位置ズレによる補正量は無視できる大きさである。

可視画像 (Figs. 7 and 8 の各左図) には, いずれも噴煙の雲影が写っているが, 本事例は直下視による観測と見なせず, 噴煙高度が分からないと位置ズレ補正した雲直下点 (SCP, Fig. A1) が特定できないため, 「雲影による高度推定」(例えば, Holasek and Self, 1995; 福井, 2017) だけでは, 位置と高度を精度よく同時推定することは難しい (Carr et al. (2022) および Proud et al. (2022) では高度のみ推定されている)。

なお, 米国地質調査所 (USGS) によると, 04:14:45 UTC に, HTHH 南側のカルデラ付近 (20.546°S, 175.390°W) の深さ 0 km で表面波マグニチュード 5.8

<sup>4</sup> この最初の雲の下に海面をほう流れが存在したか否かは, Himawari-8 の画像 (Fig. 7) では雲頂部分の雲域に隠れており, GOES-17 の画像 (Fig. 8) と見比べても不明である。仮に海面をほう流れが存在した場合の考察は, 新堀・他 (2022b) を参照。

の地震が発生した。この約2分後(04:16:53~04:17:09 UTC)に衛星観測された最初の雲(Fig. 7)と、1980年5月18日セント・ヘレンズ火山噴火で観測された爆風による雲の類似性については、3.2節で後述する。

### 2.2.3 1月15日04:17~05:57 UTCの傘型噴煙

(関連図表: Figs. 6, 7, 9-13, Table 2)

Himawari-8では、04:27 UTCまでの可視および赤外画像(Fig. 11)で傘型噴煙の形成開始が確認された。傘雲上面の雲頂強調画像(Fig. 11右)による輝度温度は、この時刻に噴火期間中で最低となる $-96.9^{\circ}\text{C}$ が観測された。大気場の最低気温(Fig. 6左)よりさらに $16^{\circ}\text{C}$ 以上低下しており、前時刻(Fig. 7)から過冷却が継続していると考えられる。噴煙が過冷却状態にある場合、大気場と熱平衡状態にないため、気温の鉛直プロファイルを参照した「輝度温度による高度推定」は適用できない。ただし本事例に関しては、Himawari-8と同時に別の角度からGOES-17や128.2°Eの赤道上空にある韓国の静止気象衛星千里眼2号(GK-2A, HTHH火山を起点とするSSPの方位角 $N77^{\circ}\text{W}$ , 距離6542 km, 海面上での衛星天頂角 $66.8^{\circ}$ )などでも観測されたことから、複数の静止気象衛星によるステレオ高度推定(例えば, Merucci et al., 2016)が適用できる。Carr et al. (2022)や山崎・塚田(2022)のHimawari-8とGOES-17のステレオ高度推定によれば、傘雲の周縁部は高度20~21 kmと26~27 km, 平坦部は38~40 km, そしてオーバーシュートした突出部の最高到達高度は $55\pm 2$  kmと解析されている<sup>5</sup>。周縁部は成層圏下層, 平坦部は成層圏上層に広がるとともに、突出部は中間圏(Fig. 6)に達しており、この時間帯に観測された到達高度と輝度温度はそれぞれ噴火期間中の最大値と最小値を記録した。

その後、傘型噴煙は04:47 UTCにかけて急速に成長した(Fig. 11)。04:27~04:37 UTCの衛星画像では傘雲上面に、最低輝度温度の観測点付近から円形に広がる波動が見られる。同様の現象は、夏半球の北緯15度帯で発生した1991年6月15日ピナツボ火山噴火の事例などでも観測されている(例えば, Tokuno, 1991; 田中・他, 1991)。突出部の形成(~04:27 UTC)と崩壊(04:37 UTC~)を伴っていることから、先行した気圧波とは

別に、大気重力波の伝搬に伴う振動現象と見られる。参考として、04:37 UTCの雲頂強調画像(Fig. 11右中)で、輝度温度の振幅 $-50\pm 20^{\circ}\text{C}$ 付近に相当する波長は約30 kmある。仮に内部重力波(例えば, 小倉, 1978)で励起された場合、Fig. 6下に示した中層大気(成層圏~中間圏)における浮力振動数は0.02 rad/s前後であるから、水平伝搬速度の上限は100 m/s程度になる。このときの傘雲の拡大速度(後出のFig. 13右)はこれを上回らない。そして04:47 UTCになると、逆に噴火期間中で最大値となる輝度温度 $+2.0^{\circ}\text{C}$ が傘雲の中心付近で観測された(Fig. 11右下)。この部分は、ステレオ高度推定(Carr et al., 2022; 山崎・塚田, 2022; Proud et al., 2022)によれば、再び高度50 km以上の突出部の再形成に対応していた。これらの推定結果からも分かるように、VAAの第一報で通報された高度52000 ft(約16 km, Table 2)は灰雲の輸送高度であって最高高度ではない。

傘型噴煙の運動を確認するために、04:17~05:57 UTC間の傘雲の大きさの時間変化を調べる。傘雲の平坦部は厚さがあると見られるため、輝度温度差は大部分で負値ではないが外部と比べて小さな値となり、Fig. 12に例を示すように、赤外差分画像ではその境界の輪郭が明瞭に検出できた。この平坦部の境界は、赤外画像では輝度温度約 $-40^{\circ}\text{C}$ に相当する。そこでHimawari-8の赤外差分画像で輪郭を手動計測し、その内部のピクセル数から求めた面積から、円相当半径 $r$ に換算した結果をFig. 13左に示す。ただし横軸の経過時間 $t$ の始点は、衛星画像で噴火が検知された撮像時間(2.2.1項)の中間時刻にあたる04:02 UTCを仮に取っている。傘型噴煙の力学(非圧縮かつ非粘性重力流の傘型噴煙モデル, 例えば, Woods and Kienle, 1994; Sparks et al., 1997; 小屋口, 2008)によれば、一般に噴煙の体積が

$$V(t) \sim t^{\alpha} \quad (1)$$

で表されるとき、半径は

$$r(t) \sim t^{(\alpha+1)/3} \quad (2)$$

で時間変化する。したがって例えば、定常的噴火( $\alpha =$

<sup>5</sup> この他、GK-2Aの可視画像で側面から見た高度推定(Horváth et al., 2021a, 2021b; Carr et al., 2022)およびHimawari-8, GK-2AとGOES-17の三機によるステレオ高度推定(Proud et al., 2022)では、いずれも最高到達高度は57 kmと推定されている。

1) の場合,

$$r(t) \sim \begin{cases} t^{2/3} & \text{(噴火継続中)} & (3a) \\ t^{1/3} & \text{(噴火終了後)} & (3b) \end{cases}$$

となる. Fig. 13 左の画像解析にベキ乗則を当てはめた結果と比較すると, HTHH 噴火に伴う傘型域への注入は 04:47~04:57 UTC の間までに終わり, それ以降は (3b) 式の  $1/3$  乗則に従っていたことが分かる. この時間帯に傘型域への注入率が変化したことは, Fig. 13 右に示した動径速度  $v$  で無次元化した長さスケールの時間変化からも明らかである. これに対し, 傘型域への注入が続いていると考えられる 04:47 UTC 以前は, 定常的噴火の場合の (3a) 式の拡大則よりも速く, 半径は  $t^2$  で変化していた. これは, (1), (2) 式から, 傘型噴煙の拡大期間の体積は  $t^5$  で変化していたことを意味する. ただし,  $t$  のベキ指数は始点をどの時刻に取るかに依存する. 始点を, 噴火開始時刻ではなく, 傘型噴煙の形成開始時刻 (傘雲が密度中立高度を水平方向へ広がり始める時刻) に取れば拡大率は小さくなる. また (2) 式の導出で仮定された, 傘型噴煙の先端で大気圧 (動圧) とのつり合いが成り立っていない状態ではこの限りでなく, (3a) 式を超える拡大率に従った可能性がある. 傘型噴煙の力学に基づく解析をさらに進めるには, 気象衛星以外の観測データも用いた精査が必要である. いずれにしても, 傘型域への注入継続時間は 40~60 分より短かったと推測される.

なお 2.2 節のはじめに述べたとおり, Fig. 12 の衛星画像に視差による位置ズレ補正は適用されていない. このことが傘型噴煙の画像解析に大きな影響を与えないことを確認するために, Himawari-8 と同様に, GOES-17 の画像<sup>6</sup>を解析した参考値も Fig. 13 に重ねて示した. 位置ズレを補正していないにも関わらず, 両衛星画像の解析結果に大きな差異はない. これは前項 (Fig. 10) で確認したように, HTHH 上空での雲域面積の位置ズレ補正は, 高度 40 km 付近でも Himawari-8 の場合 2%程度の縮小に留まることによる. Fig. 13 左で 04:17 UTC の Himawari-8 が比較的大きいのは, GOES-17 では見えない最初の雲の側面の影響もあると見られる (Fig. 9). これらのことから, 両衛星画像

による雲域面積の差異の原因は, 衛星視差の直接の影響よりも, 計測誤差のほか, 両衛星の撮像時刻, 観測波長, 視差により混入する側面積の違いなど, 他の誤差要因の方が大きいと考えられる.

#### 2.2.4 1月15日 05:57 UTC 以降の火山灰雲

(関連図表: Figs. 2, 3, 6, 14 and 15, Table 2)

前項で述べたとおり, 傘型域への注入が終了したと見られる 05 UTC 台以降, 傘型噴煙の一部は灰雲となって東西方向へ輸送を開始した (Figs. 2 and 3).

Himawari-8 の赤外面像で解析された, 15 日の傘雲および灰雲全体の最低輝度温度の時間変化を Fig. 14 に実線で示す. この最低輝度温度は, 同一地点上空ではなく時間とともに出現位置が変化するが, 全体を通して一意に値が決まっている. 噴火が発生する 04 UTC 以前の HTHH 付近の背景場の輝度温度 (Fig. 14 の点線) は 0~10°C であったのに対し, 噴火発生に伴う過冷却 (2.2.2 項) により, 100°C 近く急低下した. そして, 傘型噴煙の形成に伴い最低輝度温度は振動しながら (2.2.3 項), 07 UTC 頃までに対流圏界面付近の気温 (Fig. 14 の鎖線) に漸近した. この対流圏界面付近で熱平衡状態にあると考えられる灰雲の輝度温度の低い部分は, Himawari-8 の赤外面像では傘雲の東部から見え始め, 15 UTC にかけて灰雲全体に一樣に広がっていった (Fig. 3 の明るい (白い) 部分). この間, 08:27~08:37 UTC に傘型域へ再注入したと考えられる最低輝度温度の一時的な低下が傘雲の中心部分で確認された. Ash RGB では, 該当部分に輝度温度差が負値となる“火山灰”に相当する領域 (Fig. 15 右の赤い部分) が見えているが, 2.1 節 (3) で述べたようにオーバーシュートの状態に適用するには限界がある. 15 UTC 以降の最低輝度温度の上昇は, 対応する灰雲がおおむね西進していることから, 成層圏の偏東風 (Fig. 6) により輸送されており, 対流圏界面付近の灰雲の消散に伴う成層圏内の雲域高度の変化に対応していると考えられる.

他方, 傘雲および灰雲領域の最高輝度温度は, 周縁部ほど背景場の温度に近づくので特定することは難しいため, 雲域内の極大値の時間変化を Fig. 14 に破線で示した. 06 UTC までは傘雲の中心付近, それから

<sup>6</sup> Himawari-8 の可視画像 (B03), 赤外面像 (B13), 赤外差分画像 (B13-B15) に対応する GOES-17 の観測波長はそれぞれ 0.64  $\mu\text{m}$ , 10.3  $\mu\text{m}$ , 10.3-12.3  $\mu\text{m}$  である.

08 UTC までは灰雲の南西～西領域、その後は西進する灰雲の中央付近に極大値があり、最低輝度温度との差が 10°C を切った 16 UTC まで追跡した。極大輝度温度の傘型噴煙の形成に伴う振動や傘型域への再注入に伴う一時的な上昇は、最低輝度温度の変化 (Fig. 14 の実線) と対応している。この一時的な変化を除けば、06 UTC 以降、約 4°C/h の減率で低下した極大輝度温度もまた成層圏内にある灰雲の雲頂高度の変化に対応していると考えられる。熱平衡状態を仮定して、気温の鉛直プロファイル (Fig. 6) から雲頂高度の変化を推測したところ、約 1.6 km/h (=0.44 m/s) の下降に相当する。これは、一般に灰雲を構成する粒径 10~100  $\mu\text{m}$  の火山灰が、対流圏内より速く落下する成層圏内での終端速度の値 (例えば、新堀・石井, 2021) と整合的である。Fig. 14 には 16 UTC 以降、4°C/h の温度減率で外挿した値を点線で示した。この時系列からは、17~18 UTC に輝度温度の最小値と極大値の差がなくなり、以降の最低輝度温度は灰雲の雲頂高度に対応するようになったことが示唆される。

16 日以降も灰雲は西進を続け、最終的に Himawari-8 では 22 日 17:20 UTC に検知されなくなった (Table 2)。

### 3 過去の大規模噴火の事例との比較

2022 年 HTHH 噴火で発生した現象は、過去に 1991 年ピナツボ (例えば、Holasek et al., 1996; Newhall and Punongbayan, 1996; 澤田, 2003b), 1980 年セント・ヘレンズ (例えば、Lipman and Mullineaux, 1981; 澤田・他, 1982; Sparks et al., 1986; Holasek and Self, 1995), 1956 年ベズィミアニ (例えば、Gorshkov, 1959; 村山, 1969; Okada, 1983), 1883 年クラカタウ (例えば、和田, 1886; Latter, 1981) などの火山噴火の事例で、部分的に類似した現象が観測されている。この章では、大規模な海底噴火が発生した 2021 年福徳岡ノ場 (FOB) と大規模な爆風 (ブラスト) が発生した 1980 年セント・ヘレンズ (MSH) の各事例との比較を簡単に述べる。

#### 3.1 2021 年福徳岡ノ場の海底噴火との比較

(関連図表 : Figs. 15-17, Table 3)

福徳岡ノ場 (24.285°N, 141.481°E, 標高 (水深) : -29 m) は、小笠原諸島の南端近くに位置する硫黄島の南南東 55 km にある海底火山である。2021 年の海底噴火は、2022 年の HTHH 噴火と同様、Himawari-8 で検知

され、VAA の第一報は東京 VAAC から 8 月 13 日 00:27 UTC に発表された。その後、VAA の続報は 15 日 17:50 UTC まで継続し、灰雲の雲頂高度は 40000~54000 ft (約 12~16 km) で通報された (Table 3)。13 日 06 UTC の気象庁メソ解析 (MA) によると、火山上空の対流圏界面は最低気温 -74.2°C、高度 17 km 付近にあり、対流圏上層から成層圏下層は東風が卓越していた (Fig. 16)。

2021 年の噴火活動は、柳澤 (2021), 及川・他 (2021), Maeno et al. (2022) などで報告されており、最盛期の 13 日 04:20~10:50 UTC (13:20~19:50 JST) には傘型噴煙が観測された。この間、輝度温度が最も低下した 05:32 UTC (14:32 JST) の Himawari-8 の画像を Fig. 17 に示す。この時間帯の最低輝度温度は、対流圏界面付近の最低気温よりさらに 4°C 程度低い、-78.3°C であり、2022 年 HTHH 噴火と同様、過冷却が発生している。しかし、Fig. 15 と Fig. 17 の Ash RGB を見比べると、光学的に厚い傘型噴煙 (茶褐色の部分) の大きさは 2022 年 HTHH 噴火の方が約 10 倍大きく、風で輸送された先で SO<sub>2</sub> が占める部分 (緑色の部分) は福徳岡ノ場噴火の方が広いという違いが見られる。

福徳岡ノ場と Himawari-8 の SSP の経度差は 1° に満たないが、その衛星画像にもまた視差の影響による位置ズレが生じていた。このときの噴煙高度は及川 (2022) によると 16~19 km と計測されており、この高度が最低輝度温度の記録位置における雲頂高度に対応すると仮定すると、位置ズレ補正後の SCP は約 9~10 km 南になる (Fig. 17 右下の矢印)。この SCP は福徳岡ノ場の約 7 km 西南西に位置し、MA (Fig. 16) による高度 16~19 km 付近の東北東~東寄りの風と整合している。

#### 3.2 1980 年セント・ヘレンズ火山の噴火との比較

(関連図表 : Figs. 7, 17 and 18, Table 4)

この節では、2022 年 HTHH と 1980 年 MSH の火山噴火において、気象衛星で観測された最初の雲の類似性について見る。MSH (46.20°N, 122.18°W, 標高 : 2950 m (噴火前), 2549 m (噴火後)) は米国ワシントン州、カスケード山脈にある火山で、1980 年 5 月 18 日に火山北壁が山体崩壊して、ブラストが発生した。当時は 135°W の赤道上空にあった GOES-3 により噴火発生から 18 分後に撮像された、ブラスト雲 (blast cloud, Lipman and Mullineaux, 1981; Woods and Wohletz, 1991) の可視画像を Fig. 18 に引用する。その後、強い噴煙を

伴う噴火活動は約 9 時間継続し、MSH の東北東～南東方向へ大気輸送される灰雲が衛星画像で解析され (Holasek and Self, 1995), 雲底下の地域では凝集を伴う降灰が確認された (Carey and Sigurdsson, 1982; Durant et al., 2009). MSH 噴火に伴う降灰の再飛散 (例えば, Hobbs et al., 1983) は現在も気象衛星などで観測されており, 最近では 2018 年 10 月 14 日に再飛散の VAA がワシントン VAAC から発表されている.

噴火発生からいずれも十数分後に観測された最初の雲について, 比較した結果を Table 4 に示す. 外洋での潮位変化を除けば, 地震の規模, 雲の水平移動速度, 噴煙高度, 遠地での大気重力波 (内部重力波) の振幅など類似点が多い. 各気象衛星の SSP と火山の距離 (海面上での衛星天頂角) もほぼ同じであることを踏まえて, Fig. 7 と Fig. 18 の可視画像を比較すると, 最初の雲には 2022 年 HTHH 噴火は火山の東南東, 1980 年 MSH 噴火は北北東方向に指向性があり, 雲の広がりも似ている. ただし, MSH の雲の色調は比較的暗い (黒い) のに対し, HTHH の雲は明るい (白い). 福徳岡ノ場の雲 (Fig. 17 左上) も白かったことから, この色の違いは, 陸の噴火と海の噴火の違いを反映しているかも知れない. いずれにしても 2.2.2 項で見た 2022 年 HTHH 噴火の最初の雲は, プラスト雲の特徴を有している. 今後, HTHH 噴火の力学を解明する上で, 海底での山体崩壊の有無が一つの焦点になると考えられる.

#### 4 まとめと課題

2022 年 HTHH 噴火に伴い, 気象衛星 Himawari-8 で観測された大規模噴煙を解析した. 特に噴火直後に撮像された最初の雲 (2.2.2 項) は, 1980 年 MSH 噴火の事例との比較 (3.2 節) から, プラスト雲の特徴が見られた. 観測方法が限られる海域の火山噴火に対して, 時空間分解能の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が明らかになった.

他方, 大規模噴煙の衛星解析には, 降灰予報や VAA などの予報業務上, 留意しなければならない課題があることも改めて認識された. 一つは, 衛星視差の影響による位置ズレである. この課題は 2.1 節 (3) で述べたとおり以前から知られており, 2.2.2, 2.2.3 項では衛星天頂角が開く画像領域や雲頂高度の高い大規模噴煙になると顕在化することを見た. 国内でも 1986 年

伊豆大島噴火の事例 (澤田, 2003a) や 2021 年福徳岡ノ場噴火の事例 (3.1 節) で, 衛星画像の噴煙には北側への位置ズレが生じていた. 特に大規模噴火や海底噴火の場合, 噴火位置を見誤る危険性があるので, 注意が必要である. 一般に現業上の即時推定において, 衛星画像から傘型噴煙の輝度温度や面積・半径のようなスカラー量の画像解析を行う場合, 衛星天頂角が極度に開いていない限り, 位置ズレは無視できる. しかし雲域の位置座標や移動速度のようなベクトル量の画像解析を行う場合, 位置ズレは無視できない. 位置ズレを補正することは, 衛星画像による噴火・噴煙の実況監視だけでなく, 火山灰予測の検証の観点からも重要である.

もう一つの課題は, 噴煙高度の推定である. 衛星視差による位置ズレを補正するには, 噴煙高度の情報が必要である. そして, 噴火・噴煙を実況監視し, 火山灰予測の初期値を作成するには, 噴煙高度の解析が必要である. 従来推定方法には, 新堀・他 (2013) で述べたように, 「輝度温度による高度推定」, 「移動による高度推定」そして「雲影による高度推定」がある. しかし, 本稿 (2.2.2, 2.2.3 項) で述べたように, 大規模噴煙の場合, 過冷却状態では赤外面像の「輝度温度による高度推定」はできず, 大気重力波が励起されている状態では高層観測や数値予報 GPV の大気風を参照した「移動による高度推定」もできず, また日中であっても位置ズレが生じている状態では可視画像の「雲影による高度推定」も難しい. これらに代わる方法として, 「視差による高度推定」と「モデルによる高度推定」が挙げられる. 衛星の視差は, 位置ズレの影響がある反面, 二機以上で観測できればステレオ高度推定が可能になることが, HTHH 噴火の事例でも示された (Carr et al., 2022; 山崎・塚田, 2022; Proud et al., 2022). 「視差による高度推定」は, 単機衛星やほぼ同じ静止経度にある待機衛星との組合せでは無理があるが, 例えば GK-2A などの海外衛星も活用できれば, 夜間は赤外面像で推定できるため, 現業利用も考えられるかも知れない. これに対し, 「モデルによる高度推定」は現在, 最も有用な方法と考えられる. 火山灰予測の初期値を作成するために開発されている 1 次元噴煙モデル (Ishii et al., 2022) は, 即時実行が可能であり, 噴煙の力学が考慮されているため, 例えば過冷却状態にあっても最低輝度温度から噴煙高度の推測が可能になる. 衛星解析との併用の観点からも 1 次元噴



煙モデルの現業化が必要である。

2022 年 HTHH 噴火の衝撃は、海底から超高層大気まで、全球に及んでいる。Himawari-8 では本稿で解析した噴煙・灰雲のほか、雲の形成に先行して伝搬した気圧波（ラム波）も水蒸気画像（B08, 6.2  $\mu\text{m}$ , Otsuka, 2022）や 7.3  $\mu\text{m}$  帯画像（2.1 節 (2), 津波予測技術に関する勉強会, 2022）の 2 階微分画像により解析されている。気圧波は潮位変化を増幅させる可能性があるため（例えば, Kubota et al., 2022; 泉宮, 2022）, 2022 年 7 月 27 日から情報発表には、ひまわりの解析結果も活用されている（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, 2022）。今次の噴火で取得された種々の観測データや 3 次元噴煙モデル（鈴木, 2022）の数値シミュレーションなどにより、HTHH 噴火の力学を解明することは将来、浅海底でさらに大規模な爆発的噴火が発生したとき引き起こされうる災害の想定にも繋がる。火山災害を軽減する情報発表に資するため、今後とも継続して、衛星解析の研究を進めてゆくことが肝要である。

## 謝辞

執筆に際しては、気象研究所火山研究部の吉田康宏前部長、第一研究室の入山 宙研究官、第二研究室の石井憲介主任研究官、福井敬一客員研究員および九州大学の中島健介博士から有益な議論を戴いた。気象衛星画像の解析には気象衛星センターで作成された「SATAID」を使用した。さらに査読者である気象研究所元所長の竹内義明氏（現：気象衛星センター）、東京 VAAC 前調査官の林 勇太氏（現：企画課）および編集委員会の菅野智之氏、山里 平氏、長谷川嘉臣氏からのご指摘により、本稿は改善された。記して感謝の意を表する。

## Appendix 1 衛星視差による雲の位置ズレの補正

静止気象衛星により雲を観測する場合、衛星直下点（SSP）にない雲は斜め上空から観測される。このため、地表面上に投影される衛星画像の雲の位置は、雲直下点（SCP）からズレを生じる。この衛星天頂角 $\theta$ が開く影響による雲の位置ズレは、SSP からの距離が遠いほど、また雲頂が高いほど大きくなる（原田, 1979; 鴨志田, 1980）。ここでは Fig. A1 に示すように、測地緯度 $\varphi_S (= 0^\circ)$ 、経度 $\lambda_S (= 140.7^\circ\text{E})$ 、高度 $H_S (= 35800 \text{ km})$ にある静止気象衛星 S（ひまわり）から、雲頂高度 $H$ の雲 C が衛星画像上の

緯度 $\varphi_P$ 、経度 $\lambda_P$ の投影点 P で観測されたとき、真の位置 SCP における緯度 $\varphi$ 、経度 $\lambda$ を次の手順で求める。

求めたい雲 C の直交座標は、回転楕円体の極座標で

$$\begin{aligned} X &= [G_1(\varphi) + H] \cos \varphi \cos \lambda \\ Y &= [G_1(\varphi) + H] \cos \varphi \sin \lambda \\ Z &= [G_2(\varphi) + H] \sin \varphi \end{aligned} \quad (\text{A1})$$

と表示される。ただし $G_1, G_2$ は、赤道半径 $R_{\text{eq}}$ 、極半径 $R_p$ 、

離心率 $e \equiv \sqrt{R_{\text{eq}}^2 - R_p^2} / R_{\text{eq}}$ として、

$$\begin{aligned} G_1(\varphi) &= \frac{R_{\text{eq}}^2}{\sqrt{R_{\text{eq}}^2 \cos^2 \varphi + R_p^2 \sin^2 \varphi}} = \frac{R_{\text{eq}}}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \\ G_2(\varphi) &= \frac{(1 - e^2) R_{\text{eq}}}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} = \left( \frac{R_p}{R_{\text{eq}}} \right)^2 G_1(\varphi) \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

で与えられる（原田, 1979）。

同様に、静止気象衛星 S の直交座標は、

$$\begin{aligned} X_S &= [G_1(\varphi_S) + H_S] \cos \varphi_S \cos \lambda_S \\ Y_S &= [G_1(\varphi_S) + H_S] \cos \varphi_S \sin \lambda_S \\ Z_S &= [G_2(\varphi_S) + H_S] \sin \varphi_S \end{aligned} \quad (\text{A3})$$

衛星画像の投影点 P は、

$$\begin{aligned} X_P &= G_1(\varphi_P) \cos \varphi_P \cos \lambda_P \\ Y_P &= G_1(\varphi_P) \cos \varphi_P \sin \lambda_P \\ Z_P &= G_2(\varphi_P) \sin \varphi_P \end{aligned} \quad (\text{A4})$$

と表される。

点 S, C, P は衛星の視準線方向の同一直線上にあるから、直線の方程式：

$$\frac{X - X_P}{X_S - X_P} = \frac{Y - Y_P}{Y_S - Y_P} = \frac{Z - Z_P}{Z_S - Z_P} \quad (\text{A5})$$

を満たす。ここで既知の分母を

$$\begin{aligned} \Delta X &\equiv X_S - X_P \\ \Delta Y &\equiv Y_S - Y_P \\ \Delta Z &\equiv Z_S - Z_P \end{aligned} \quad (\text{A6})$$

と置き、(A5) 式を媒介変数  $t$  を用いて表すと

$$\begin{aligned} X &= X_p + t\Delta X \\ Y &= Y_p + t\Delta Y \\ Z &= Z_p + t\Delta Z \end{aligned} \quad (\text{A7})$$

となる。

(A5) 式に (A1), (A2) 式を代入して変形すると、 $\sin \varphi$  に関する 8 次方程式となり数値解法が必要になる (原田, 1979). 原田 (1979) も述べているとおり、雲の位置ズレの補正においては地球を球体で近似しても十分であることから、ここでは (A2) 式を  $e^2$  ( $\approx 0.007$ ) について展開する：

$$\begin{aligned} G_1(\varphi) &\approx R_{\text{eq}} \left[ 1 + \frac{1}{2} e^2 \sin^2 \varphi + O(e^4) \right] \\ G_2(\varphi) &\approx \frac{R_p^2}{R_{\text{eq}}} \left[ 1 + \frac{1}{2} e^2 \sin^2 \varphi + O(e^4) \right] \end{aligned} \quad (\text{A8})$$

この第ゼロ近似を用いて、(A1) 式を (A7) 式に代入して変形すると、 $t$  に関する 2 次方程式：

$$at^2 + 2bt + c = 0 \quad (\text{A9})$$

から解析解が求まる。ただし、

$$\begin{aligned} a &= (\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (r\Delta Z)^2 \\ b &= X_p \Delta X + Y_p \Delta Y + r^2 Z_p \Delta Z \\ c &= X_p^2 + Y_p^2 + (rZ_p)^2 - (R_{\text{eq}} + H)^2 \end{aligned} \quad (\text{A10})$$

$$r \equiv \frac{G_1 + H}{G_2 + H} \approx \frac{R_{\text{eq}} + H}{R_p^2/R_{\text{eq}} + H} \quad (\text{A11})$$

である。

以上により求めた直交座標 (A7) 式から、雲 C の緯度・経度は (A1) 式に代入して、

$$\begin{aligned} \varphi &= \arctan \left( \frac{rZ}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right) \\ \lambda &= \arctan \left( \frac{Y}{X} \right) \end{aligned} \quad (\text{A12})$$

で求められる。

なお衛星画像の緯度が Fig. A1 に示す地心緯度  $\phi$  で与えられるときは、扁平率  $f \equiv (R_{\text{eq}} - R_p)/R_{\text{eq}}$  を用いて、次式で測地緯度 (地理緯度)  $\varphi$  に変換すればよい (原田, 1979)：

$$\tan \varphi = \frac{1}{(1-f)^2} \tan \phi = \left( \frac{R_{\text{eq}}}{R_p} \right)^2 \tan \phi \quad (\text{A13})$$

雲頂高度  $H = 15 \text{ km}$  の場合の位置ズレの補正量の例は、原田 (1979) の Figs. 4 and 5 を参照されたい。

## Appendix 2 衛星視差による雲域面積の補正率

一定高度にある雲の面積について、衛星視差による位置ズレにより、衛星画像に投影された面積から縮小される割合を求める。

Fig. A1 の雲 C における面積要素は、(A1) 式から

$$\begin{aligned} dS &= \sqrt{(G_1 + H)^2 \sin^2 \varphi + (G_2 + H)^2 \cos^2 \varphi} \\ &\times (G_1 + H) \cos \varphi d\varphi d\lambda \end{aligned} \quad (\text{A14})$$

になる。ただし、(A8) 式の第ゼロ近似を用いて  $G_1, G_2$  の  $\varphi$  依存性は無視した。

同様に、Fig. A1 の投影点 P における面積要素は、(A4) 式から

$$\begin{aligned} dS_p &= \sqrt{G_1^2 \sin^2 \varphi_p + G_2^2 \cos^2 \varphi_p} \\ &\times G_1 \cos \varphi_p d\varphi_p d\lambda_p \end{aligned} \quad (\text{A15})$$

になる。

(A14), (A15) 式から、Appendix 1 で求めた  $(\varphi, \lambda)$  と  $(\varphi_p, \lambda_p)$  の関係を用いて、比  $dS/dS_p$  を取ることにより、雲域面積の補正率が与えられる。

例として雲頂高度  $H = 15 \text{ km}$  の場合に、ひまわり画像上の雲域面積の位置ズレ補正率について、経度依存性を Fig. A2 に、緯度依存性を Fig. A3 に示す。

## List of Acronyms

AHI	Advanced Himawari Imager
ATM	Atmospheric Transport Model
FOB	Fukutoku-Oka-no-Ba
GA	Global Analysis
GK	GEO-KOMPSAT (Geostationary Korea Multi-

	Purpose Satellite)
GMS	Geostationary Meteorological Satellite
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GPV	Grid Point Value
HTHH	Hunga Tonga–Hunga Ha’apai
IR	Infrared
JMA	Japan Meteorological Agency
JST	Japan Standard Time
MA	Mesoscale Analysis
MSC	Meteorological Satellite Center
MSH	Mount St. Helens
MTSAT	Multi-functional Transport Satellite
NIR	Near-infrared
PDT	Pacific Daylight Time
SATAID	Satellite Animation and Interactive Diagnosis
SCP	Sub-cloud Point
SP	Split-window
SSP	Sub-satellite Point
TBB	Blackbody Brightness Temperature
USGS	United States Geological Survey
UTC	Universal Time Coordinated
VAA	Volcanic Ash Advisory
VAAC	Volcanic Ash Advisory Center
VIS	Visible

## 文献

- 池上郁彦 (2021): 福徳岡ノ場 2021 年噴火により噴出・拡散した軽石ラフト, 日本火山学会講演予稿集, A2-02.
- 泉宮尊司 (2022): トンガ大規模火山噴火に伴う気圧変動とそれによる津波発生メカニズムについて, 津波工学研究報告, **39**, 67-89.
- 及川輝樹 (2022): 海底からのプリニー式噴火, 福徳岡ノ場 2021 年噴火と漂流軽石, 日本地球惑星科学連合ニュースレター, **18.1**, 8-9.
- 及川輝樹・柳澤宏彰・池上郁彦・石塚 治・水落裕樹・東宮昭彦・森田雅明・中野 俊・川口亮平・中村政道 (2021): 小笠原諸島, 福徳岡ノ場における 2021 年 8 月の噴火, 日本火山学会講演予稿集, P1-34.
- 小倉義光 (1978): 気象力学通論, 東京大学出版会, 249 pp.
- 尾関一頼・佐々木政幸 (2018): ひまわり 8 号及び 9 号の概要, 静止気象衛星ひまわり 8 号・9 号とその利用, 気象研究ノート, **238**, 11-21.
- 尾関一頼・佐々木幸男 (2016): 静止気象衛星ひまわり 8 号及び 9 号の概要, ひまわり 8 号及び 9 号の地上システム総合報告, 気象衛星センター技術報告, **特別号**, 3-16.
- 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 (2022): 火山噴火等による潮位変化に関する情報のあり方 (報告書), 27+25 pp.
- 鎌田靖宏 (2006): 火山灰検知—火山灰の検出と応用—, 衛星からわかる気象—マルチチャンネルデータの利用—, 気象研究ノート, **212**, 77-104.
- 嶋志田 章 (1980): 衛星の天頂角による雲位置の誤差, 天気, **27**, 63-66.
- 気象衛星センター (2022): 気象衛星画像の解析と利用《2022 改訂版》, 気象衛星センター技術報告, **特別号**, 258 pp.
- 小屋口剛博 (2008): 火山現象のモデリング, 東京大学出版会, 637 pp.
- 澤田可洋 (2003a): 静止気象衛星「ひまわり」の画像による噴火噴煙の観測とその解析に関する研究, 気象庁研究時報, **55**, 57-152.
- 澤田可洋 (2003b): 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.
- 澤田可洋・涌井仙一郎・小宮 学 (1982): Mount St. Helens の 1980 年 5 月 18 日大噴火による気圧波, 火山, **27**, 195-202.
- 志水菊広・齋藤幸太郎・山本幹人 (2018): RGB 合成画像, 静止気象衛星ひまわり 8 号・9 号とその利用, 気象研究ノート, **238**, 59-71.
- 新堀敏基・石井憲介 (2021): 気象庁移流拡散モデル設計書, 気象研究所技術報告, **84**, 146 pp.
- 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.
- 新堀敏基・林 昌宏・石元裕史 (2022a): 2022 年 1 月 15 日トンガ海底火山噴火により発生した火山灰雲のひまわり 8 号による解析, 日本気象学会春季大会講演予稿集, OB-22.
- 新堀敏基・林 昌宏・石元裕史 (2022b): 2022 年 1 月 15 日トンガ海底火山噴火により発生した傘型噴煙のひまわり 8 号による解析, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, U09-P25.
- 新堀敏基・林 昌宏・石元裕史 (2022c): 2022 年 1 月 15 日トンガ海底火山噴火により発生した傘型噴煙のひまわり

- り 8 号による解析(その 2), 日本火山学会講演予稿集, P1-38.
- 鈴木雄治郎 (2022): トンガ 2022 火山噴火の噴煙 3 次元シミュレーション, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, U09-09.
- 田中總太郎・杉村俊郎・原田知幸・田中美枝子 (1991): ピナツボ火山噴煙の成層圏拡散に関する衛星観測, 日本リモートセンシング学会誌, **11**, 529-537.
- 土山博昭 (2017): 静止気象衛星による西之島の熱活動, 2013-2015 年西之島噴火のモニタリングに関する研究, 気象研究所技術報告, **78**, 23-33.
- 津波予測技術に関する勉強会 (2022): 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, 33 pp.
- 西田 究 (2022): トンガ火山の噴火で励起された大気波動と海面変動, 日本地球惑星科学連合ニュースレター, **18.2**, 15-17.
- 林 勇太・石元裕史・稲澤智之 (2018): 火山灰, 静止気象衛星ひまわり 8 号・9 号とその利用, 気象研究ノート, **238**, 99-113.
- 原田知幸 (1979): 衛星画像を用いた雲位置の補正, 気象衛星センター技術報告, **1**, 53-57.
- 福井敬一 (2017): 衛星搭載光学センサーを用いた西之島火山における噴煙活動評価, 2013-2015 年西之島噴火のモニタリングに関する研究, 気象研究所技術報告, **78**, 11-22.
- 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, P1-33.
- 山岸 登・涌井仙一郎 (1981): セントヘレンズ火山の爆発と松代ならびにその他の観測結果, 気象庁地震観測所技術報告, **2**, 13-18.
- 山崎一哉・塚田大河 (2022): 静止気象衛星の視差を利用したトンガ噴煙高度の推定, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, U09-P24.
- 和田雄治 (1886): 気浪及ビ海浪ノ説, 日本地震学会報告, **3**, 49-69.
- Bessho, K., K. Date, M. Hayashi, A. Ikeda, T. Imai, H. Inoue, Y. Kumagai, T. Miyakawa, H. Murata, T. Ohno, A. Okuyama, R. Oyama, Y. Sasaki, Y. Shimazu, K. Shimoji, Y. Sumida, M. Suzuki, H. Taniguchi, H. Tsuchiyama, D. Uesawa, H. Yokota, and R. Yoshida (2016): An introduction to Himawari-8/9 — Japan's new-generation geostationary meteorological satellites, *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, 151-183.
- Carey, S. N. and H. Sigurdsson (1982): Influence of particle aggregation on deposition of distal tephra from the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens volcano, *J. Geophys. Res.*, **87**, 7061-7072.
- Carr, J. L., Á., Horváth, D. L. Wu, and 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.
- Cronin, S. J., M. Brenna, I. E. M. Smith, S. J. Barker, M. Tost, M. Ford, S. Tonga'onevai, T. Kula, and R. Vaiomounga (2017): New volcanic island unveils explosive past, *EOS Trans. AGU*, **98**.
- Durant, A. J., W. I. Rose, A. M. Sarna-Wojcicki, S. N. Carey, and A. C. M. Volentik (2009): Hydrometeor-enhanced tephra sedimentation: Constraints from the 18 May 1980 eruption of Mount St. Helens, *J. Geophys. Res.*, **114**, B03204.
- Gorshkov, G. S. (1959): Gigantic eruption of the volcano Bezymianny, *Bull. Volcanol.*, **20**, 77-109+39 pp.
- Hayashi, M. and H. Ishimoto (2018): Joint volcanic ash retrieval using Himawari-8 and satellite infrared sounder data, AGU Fall Meeting, A31G-2912.
- Hobbs, P. V., D. A. Hegg, and L. F. Radke (1983): Resuspension of volcanic ash from Mount St. Helens, *J. Geophys. Res.*, **88**, 3919-3921.
- Holasek, R. E. and S. Self (1995): GOES weather satellite observations and measurements of the May 18, 1980, Mount St. Helens eruption, *J. Geophys. Res.*, **100**, 8469-8487.
- Holasek, R. E., S. Self, and A. W. Woods (1996): Satellite observations and interpretation of the 1991 Mount Pinatubo eruption plumes, *J. Geophys. Res.*, **101**, 27635-27655.
- Horváth, Á., J. L. Carr, O. A. Girina, D. L. Wu, A. A. Bril, A. A. Mazurov, D. V. Melnikov, G. A. Hoshyaripour, and S. A. Buehler (2021a): Geometric estimation of volcanic eruption column height from GOES-R near-limb imagery – Part 1: Methodology, *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 12189-12206.
- Horváth, Á., O. A. Girina, J. L. Carr, D. L. Wu, A. A. Bril, A. A. Mazurov, D. V. Melnikov, G. A. Hoshyaripour, and S. A. Buehler (2021b): Geometric estimation of volcanic eruption column height from GOES-R near-limb imagery – Part 2:

- Case studies, *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 12207-12226.
- Ishii, K., M. Hayashi, H. Ishimoto, and T. Shimbori (2023): Prediction of volcanic ash concentrations in ash clouds from explosive eruptions based on an atmospheric transport model and the Japanese meteorological satellite Himawari-8: A case study for the Kirishima-Shinmoedake eruption on April 4th 2018, *Earth Planets Space*, **75**, 37.
- Ishii, K., Y. Hayashi, and T. Shimbori (2018): Using Himawari-8, estimation of SO<sub>2</sub> cloud altitude at Aso volcano eruption, on October 8, 2016, *Earth Planets Space*, **70**, 19.
- Ishii, K., A. Nishijo, T. Koyaguchi, and Y. J. Suzuki (2022): A physics-based source model for real-time tephra-dispersal forecasting for weak eruption plumes, *J. Appl. Volcanol.*, **11**, 15.
- Kubota, T., T. Saito, and K. Nishida (2022): Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption, *Science*, **377**, 91-94.
- Latter, J. H. (1981): Tsunamis of volcanic origin: Summary of causes, with particular reference to Krakatoa, 1883, *Bull. Volcanol.*, **44**, 467-490.
- Lipman, P. W. and D. R. Mullineaux, editors (1981): The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, USGS Prof. Pap., **1250**, 844 pp.
- 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-Oka-no-Ba, *Commun. Earth Environ.*, **3**, 260.
- Merucci, L., K. Zakšek, E. Carboni, and S. Corradini (2016): Stereoscopic estimation of volcanic ash cloud-top height from two geostationary satellites, *Remote Sens.*, **8**, 206.
- Murata, H., K. Saitoh, and Y. Sumida (2018): True color imagery rendering for Himawari-8 with a color reproduction approach based on the CIE XYZ color system, *J. Meteor. Soc. Japan*, **96B**, 211-238.
- Newhall, C. G. and R. S. Punongbayan (1996): Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines, Univ. Washington Press, 1126 pp.
- Okada, Hm. (1983): Comparative study of earthquake swarms associated with major volcanic activities, *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*, D. Shimozuru and I. Yokoyama, editors, TERRAPUB, Tokyo, pp. 43-61.
- Otsuka, S. (2022): Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8, *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2022GL098324.
- Proud, S. R., A. T. Prata, and S. Schmauß (2022): The January 2022 eruption of Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano reached the mesosphere, *Science*, **378**, 554-557.
- Smart, D. (2022): The first hour of the paroxysmal phase of the 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcanic eruption as seen by a geostationary meteorological satellite, *Weather*, **77**, 81-82.
- Sparks, R. S. J., M. I. Bursik, S. N. Carey, J. S. Gilbert, L. S. Glaze, H. Sigurdsson, and A. W. Woods (1997): *Volcanic Plumes*, Wiley, 574 pp.
- Sparks, R. S. J., J. G. Moore, and C. J. Rice (1986): The initial giant umbrella cloud of the May 18th, 1980, explosive eruption of Mount St. Helens, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **28**, 257-274.
- Tokuno, M. (1991): GMS-4 observations of volcanic eruption clouds from Mt. Pinatubo, Philippines, *MSC Tech. Note*, **23**, 1-14.
- Woods, A. W. and J. Kienle (1994): The dynamics and thermodynamics of volcanic clouds: Theory and observations from the April 15 and April 21, 1990 eruptions of Redoubt volcano, Alaska, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **62**, 273-299.
- Woods, A. W. and S. Self (1992): Thermal disequilibrium at the top of volcanic clouds and its effect on estimates of the column height, *Nature*, **355**, 628-630.
- Woods, A. W. and K. Wohletz (1991): Dimensions and dynamics of co-ignimbrite eruption columns, *Nature*, **350**, 225-227.

(編集担当 山里 平)

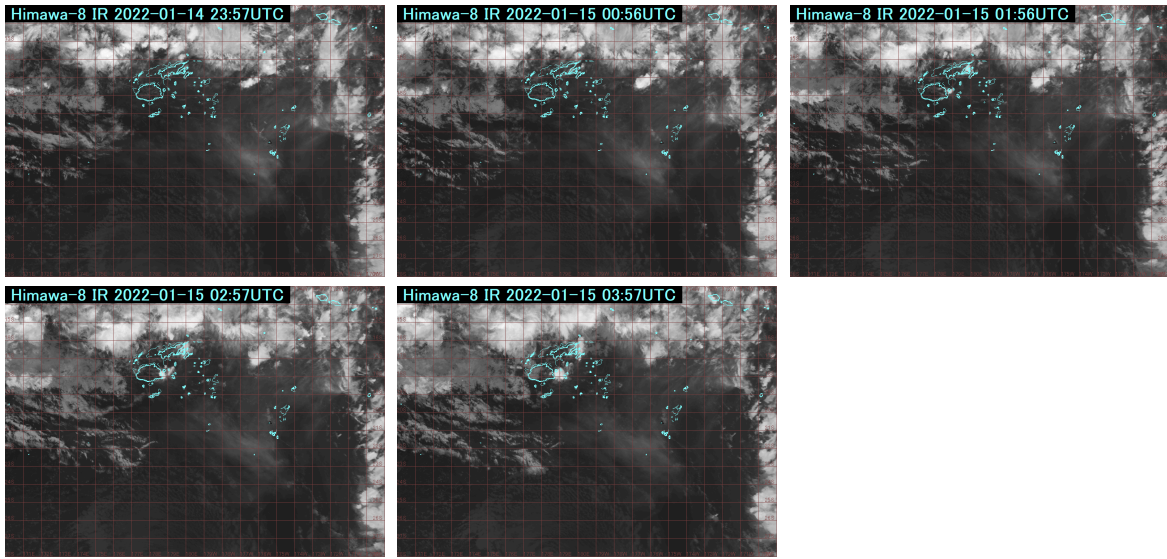


Fig. 1 Himawari-8 IR (10.4  $\mu\text{m}$ ) imagery from 23:57 UTC on 14 January to 03:57 UTC on 15 January 2022 (1-h intervals before HTHH eruption). Triangles denote HTHH location, and latitude-longitude grid lines indicate 1° intervals.

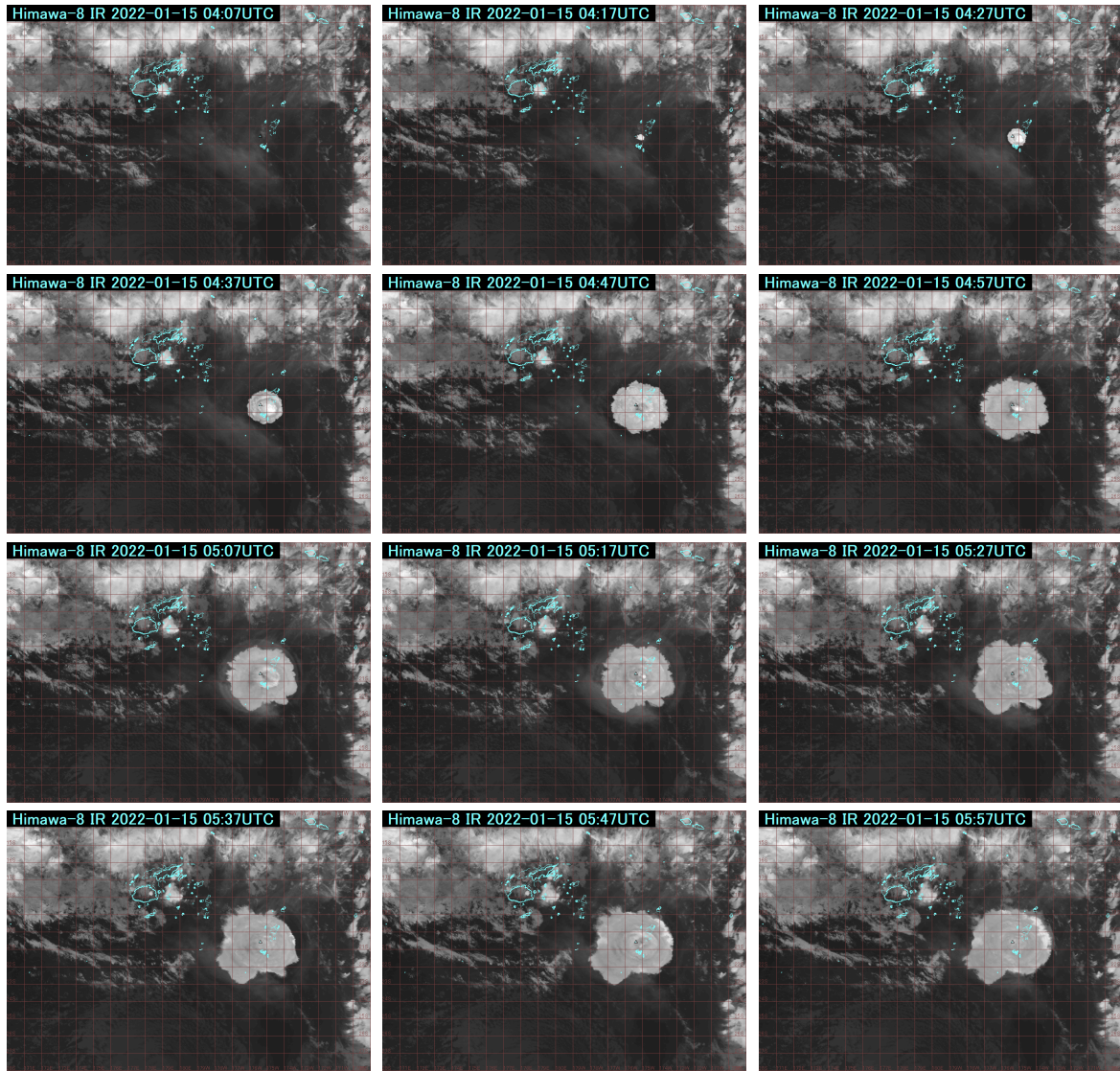


Fig. 2 Himawari-8 IR (10.4  $\mu\text{m}$ ) imagery from 04:07 to 05:57 UTC on 15 January 2022 (10-min intervals during HTHH eruption cloud formation). Triangles and latitude-longitude grid lines are as per Fig. 1.

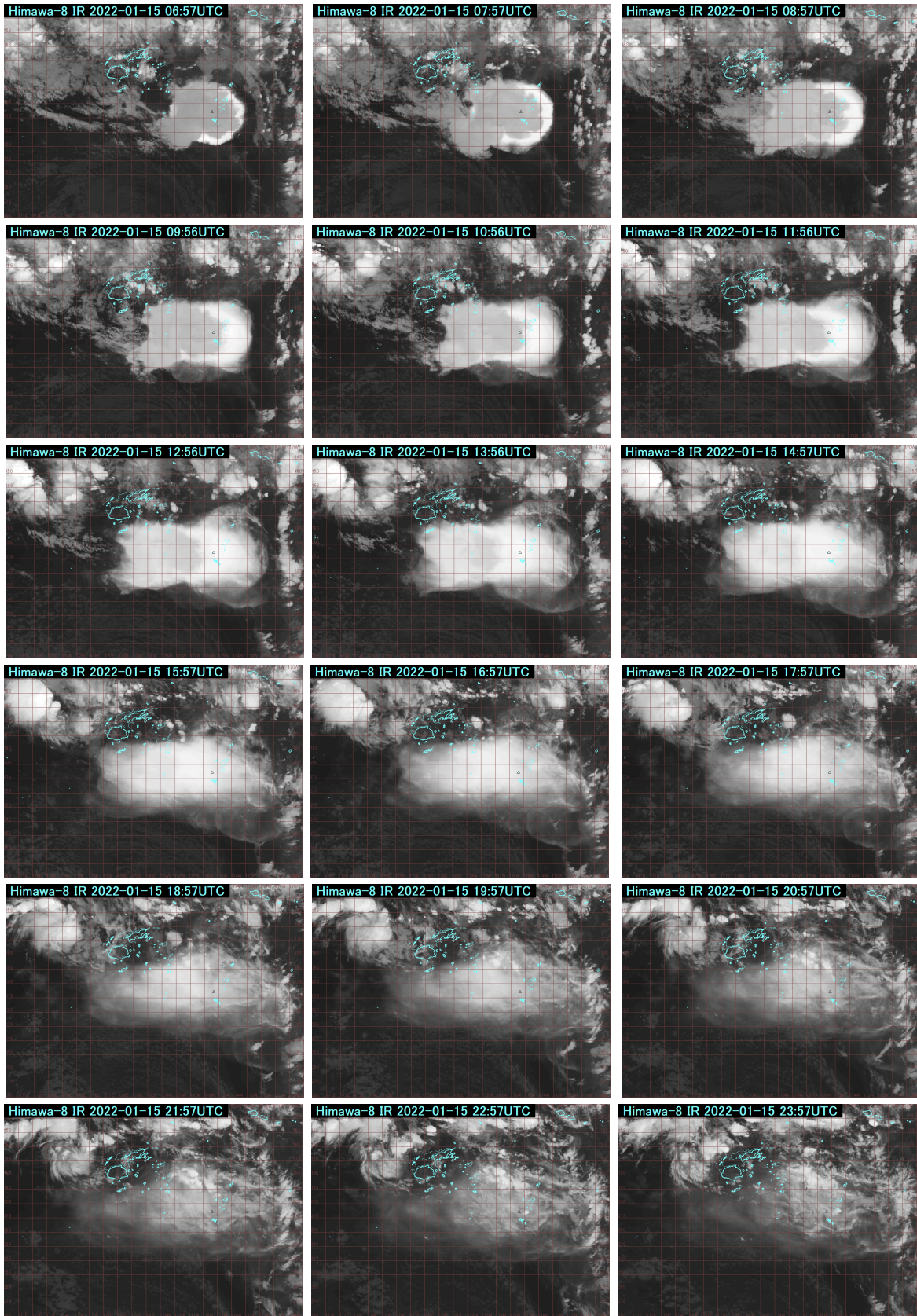


Fig. 3 Himawari-8 IR ( $10.4 \mu\text{m}$ ) imagery from 06:57 to 23:57 UTC on 15 January 2022 (1-h intervals after HTHH eruption cloud transport). Triangles and latitude-longitude grid lines are as per Fig. 1.



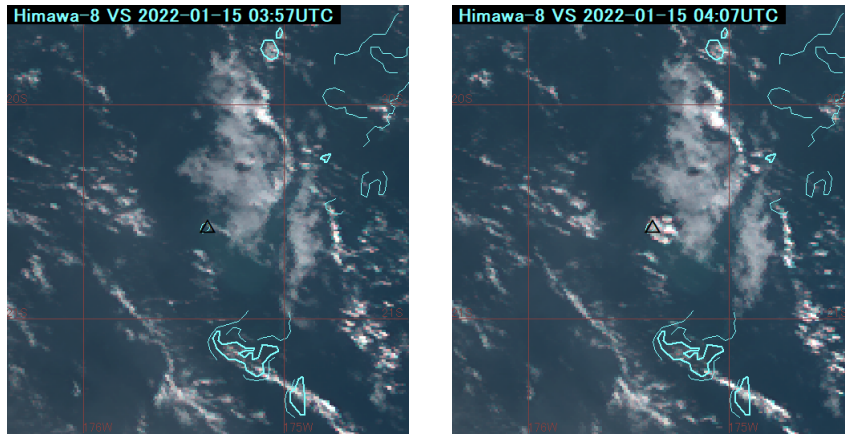


Fig. 4 Himawari-8 VIS (True Color RGB) imagery for 03:57 and 04:07 UTC on 15 January 2022. Triangles denote HTHH location, and latitude-longitude grid lines indicate 1° intervals.

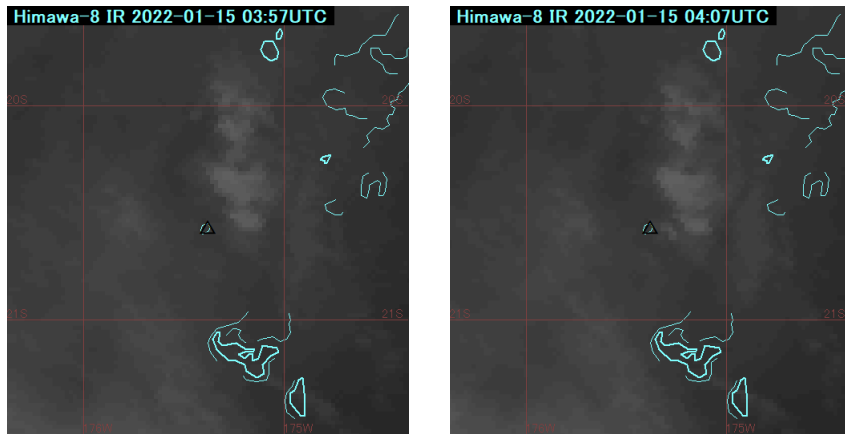


Fig. 5 Himawari-8 IR (10.4 μm) imagery for 03:57 and 04:07 UTC on 15 January 2022. These are enlarged views of the lower-middle panel in Fig. 1 and the upper-left panel in Fig. 2. Triangles and latitude-longitude grid lines are as per Fig. 4.

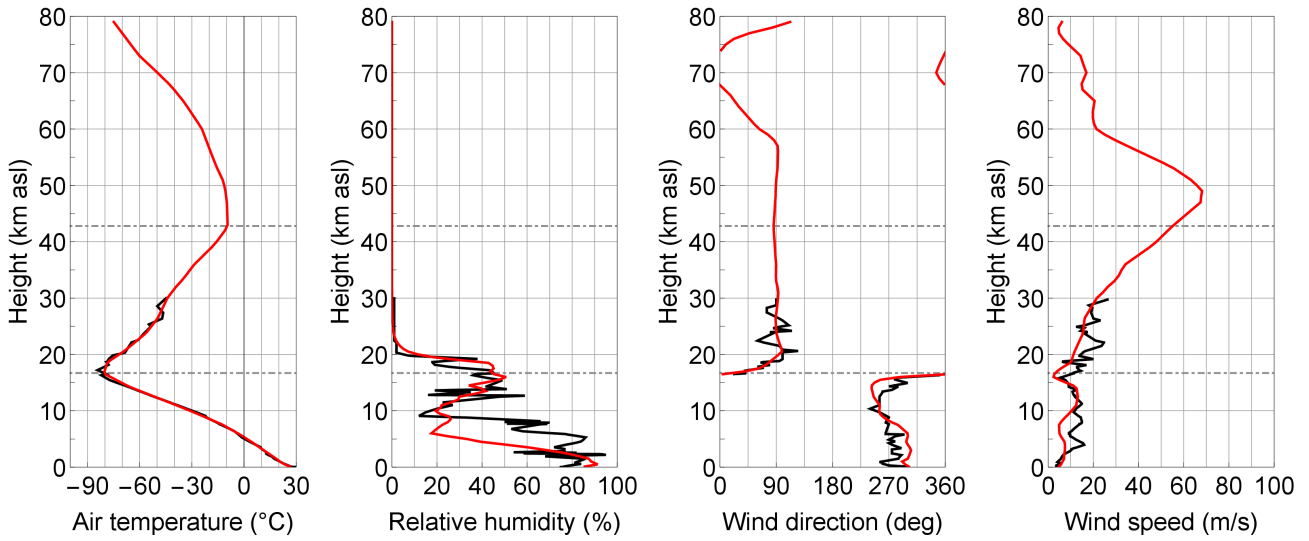


Fig. 6 Vertical profiles of air temperature, relative humidity, wind direction and speed above HTHH for 04:00 UTC on 15 January 2022 (red lines). Interpolated GPVs are GA values at the analysis times of 00:00 and 06:00 UTC. The gray dashed lines show altitude around the tropopause (16.7 km asl) and stratopause (42.8 km asl). For reference, NFFN (815 km, N69°W of HTHH) sonde data for 00:00 UTC are shown by black lines.

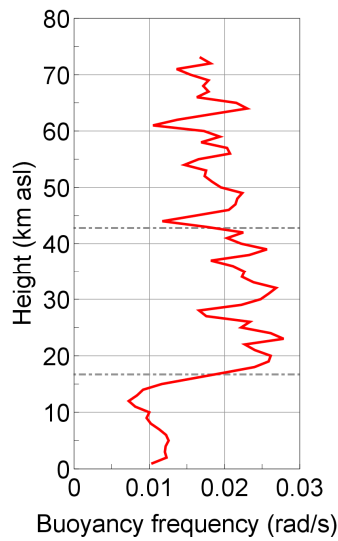


Fig. 6 (Continued) Vertical profile of Brunt-Väisälä frequency above HTHH for 04:00 UTC on 15 January 2022.

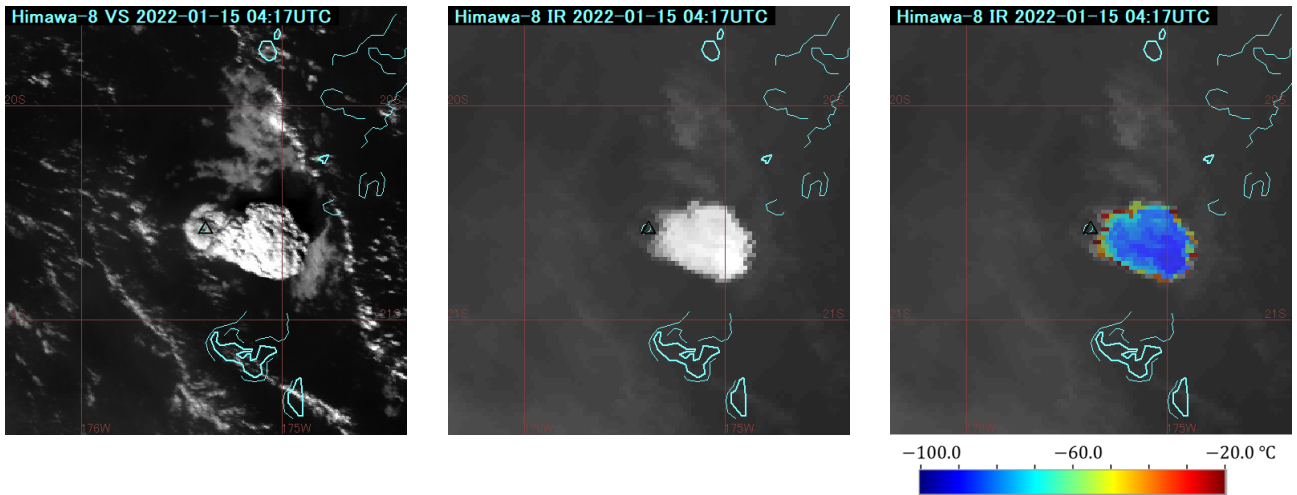


Fig. 7 Himawari-8 VIS (0.64  $\mu\text{m}$ ) and IR (10.4  $\mu\text{m}$ ) imagery for 04:17 UTC on 15 January 2022. Middle panel: enlarged view of the upper-middle panel in Fig. 2. Right panel: enhanced color image with  $T_{\text{BB}} < -20^\circ\text{C}$ . Triangles denote HTHH locations, and latitude-longitude grid lines indicate  $1^\circ$  intervals.

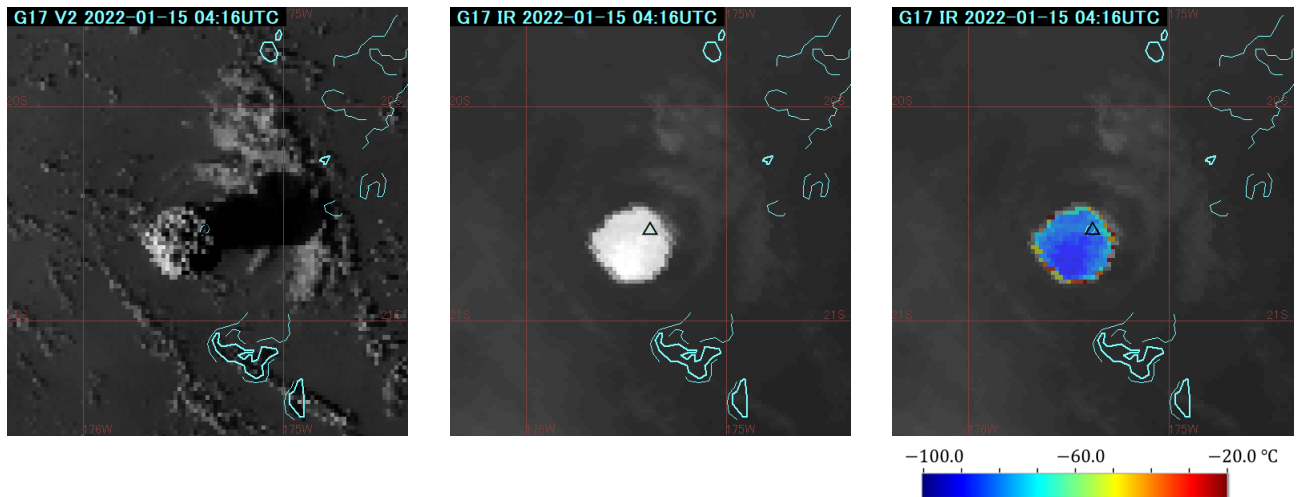


Fig. 8 GOES-17 VIS (0.64  $\mu\text{m}$ ) and IR (10.3  $\mu\text{m}$ ) imagery for 04:16 UTC on 15 January 2022. Right panel: enhanced color image with  $T_{\text{BB}} < -20^\circ\text{C}$ . Triangles and latitude-longitude grid lines are as per Fig. 7.

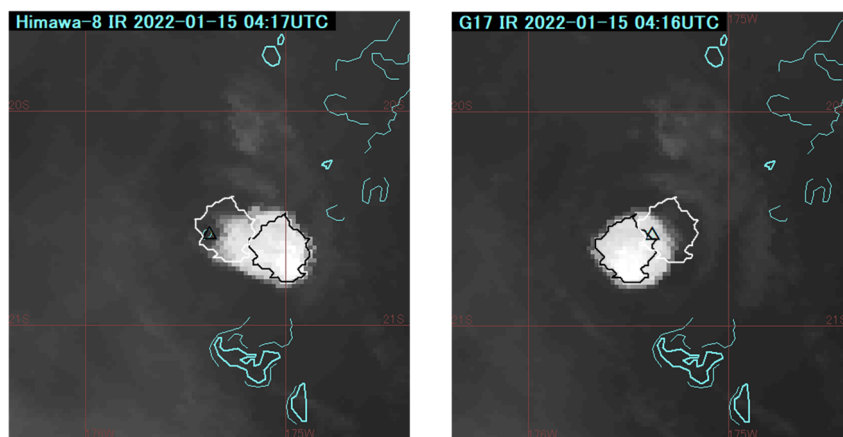


Fig. 9 Himawari-8 and GOES-17 IR imagery around 04:17 UTC on 15 January 2022, as per the middle panels in Figs. 7 and 8. Black lines: area with  $T_{\text{BB}} < -40^\circ\text{C}$  observed from both satellites. White lines: after parallax correction (same in both panels).

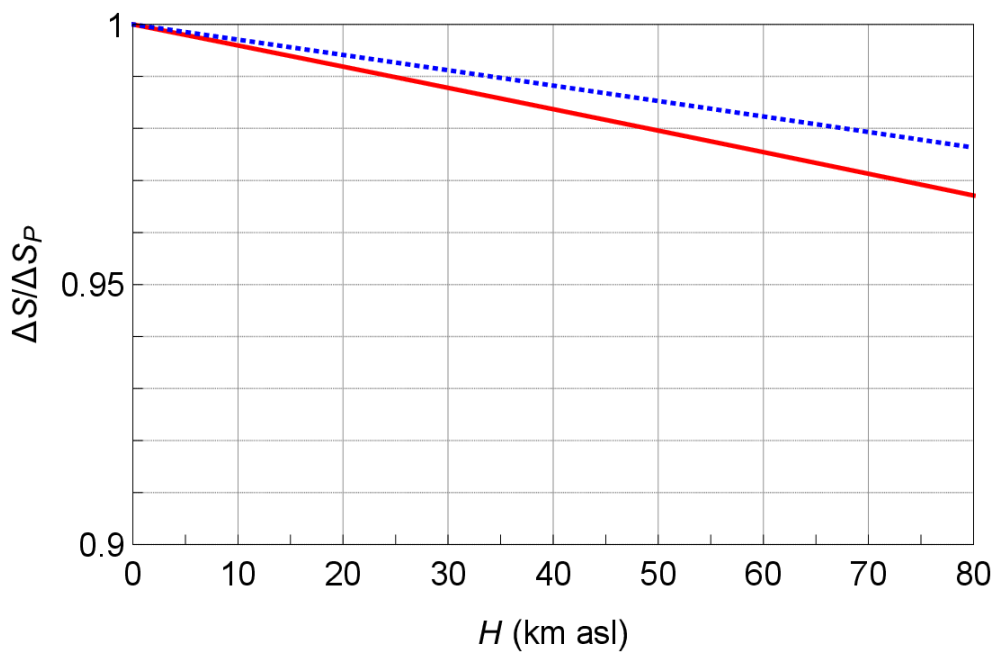


Fig. 10 Correction of cloud area ratio with cloud height  $H$  on the horizontal axis.  $\Delta S$ : corrected cloud area;  $\Delta S_P$ : apparent cloud area in satellite imagery (point P in Fig. A1). For latitude and longitude of SCP  $\varphi = 20.536^\circ\text{S}$ ,  $\lambda = 175.382^\circ\text{W}$  (HTHH), latitude and longitude of SSPs  $\varphi_S = 0^\circ$ ,  $\lambda_S = 140.7^\circ\text{E}$  (Himawari-8, red line) or  $\varphi_S = 0^\circ$ ,  $\lambda_S = 137.2^\circ\text{W}$  (GOES-17, blue dotted line) and satellite height  $H_S = 35800$  km asl.

気象衛星による大規模噴煙解析

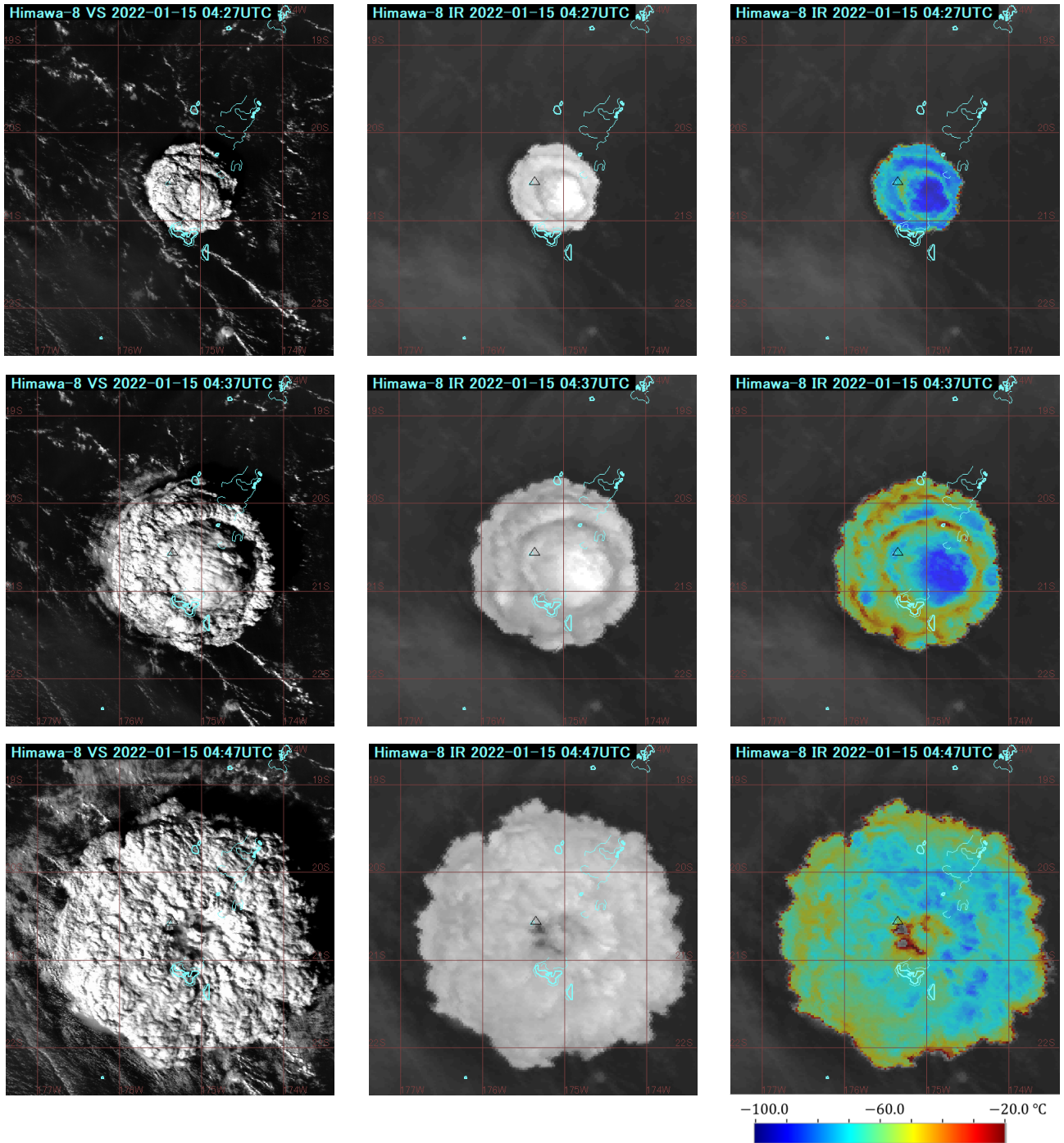


Fig. 11 As per Fig. 7, but from 04:27 to 04:47 UTC on 15 January 2022. The middle panels are enlarged views of the upper-right, second-row left and middle panels in Fig. 2.

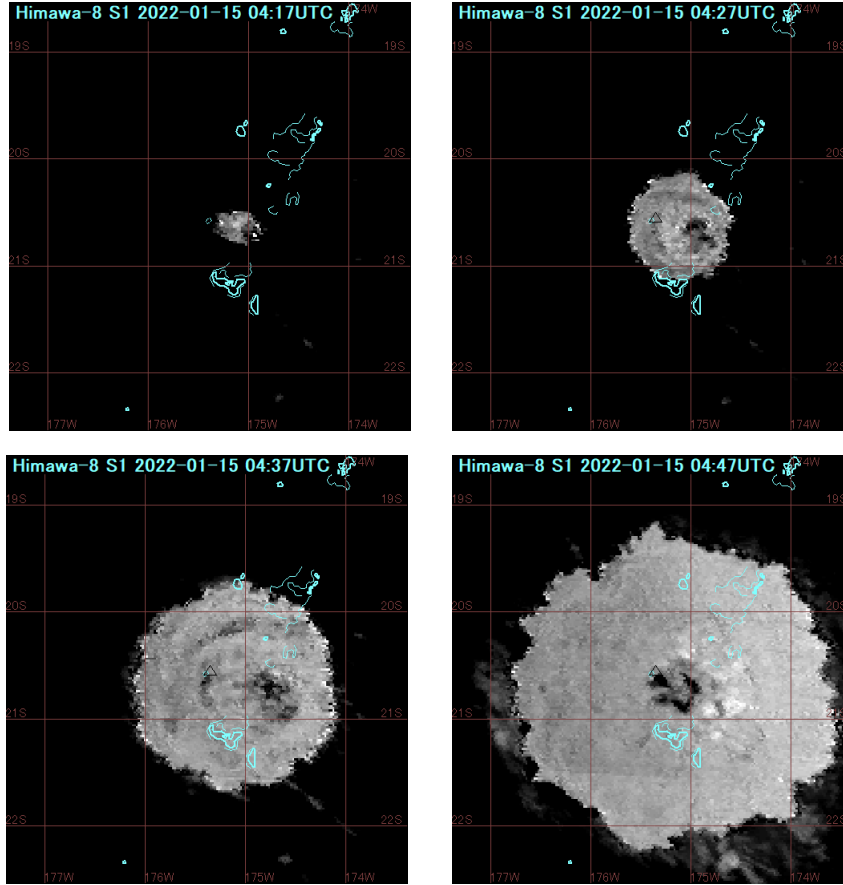


Fig. 12 Himawari-8 SP (10.4 – 12.4  $\mu\text{m}$ ) imagery from 04:17 to 04:47 UTC on 15 January 2022. Triangles denote HTHH locations, and latitude-longitude grid lines indicate  $1^\circ$  intervals.

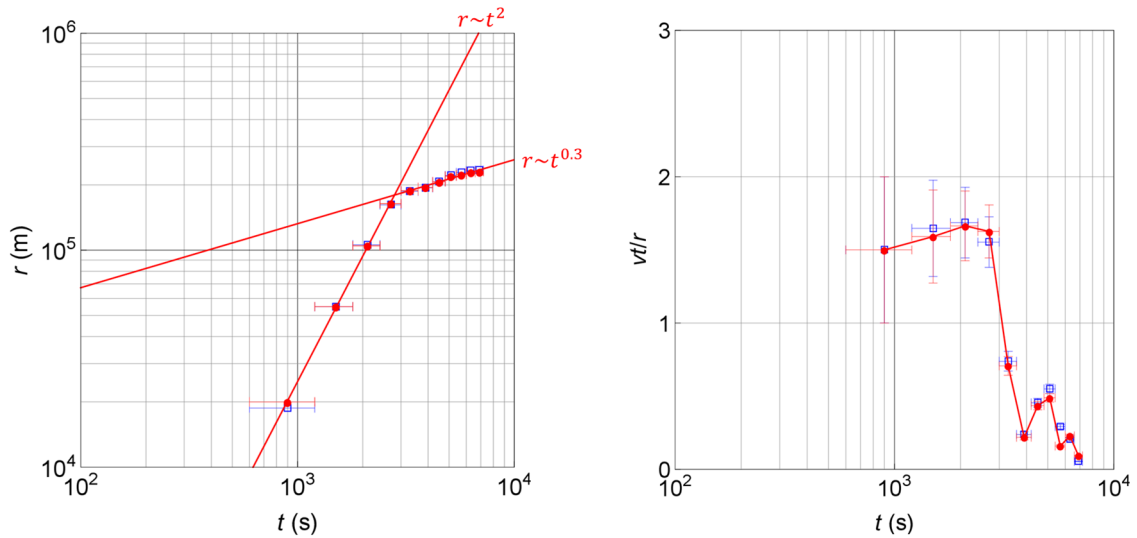


Fig. 13 Mean radius  $r$  of HTHH eruption cloud observed by Himawari-8 (red dots) and GOES-17 (blue squares) from 04:17 to 05:57 UTC on 15 January 2022. The horizontal axes represent time  $t$  since eruption (assumed to have been at 04:02 UTC). The lines in the figure on the left show power-law fittings for 04:17 – 04:47 and 04:57 – 05:57 UTC. The panel on the right shows a corresponding dimensionless length scale with radial velocity  $v$  calculated from backward difference. Error bars indicate spread associated with satellite observation time intervals. All intervals are 10 min.

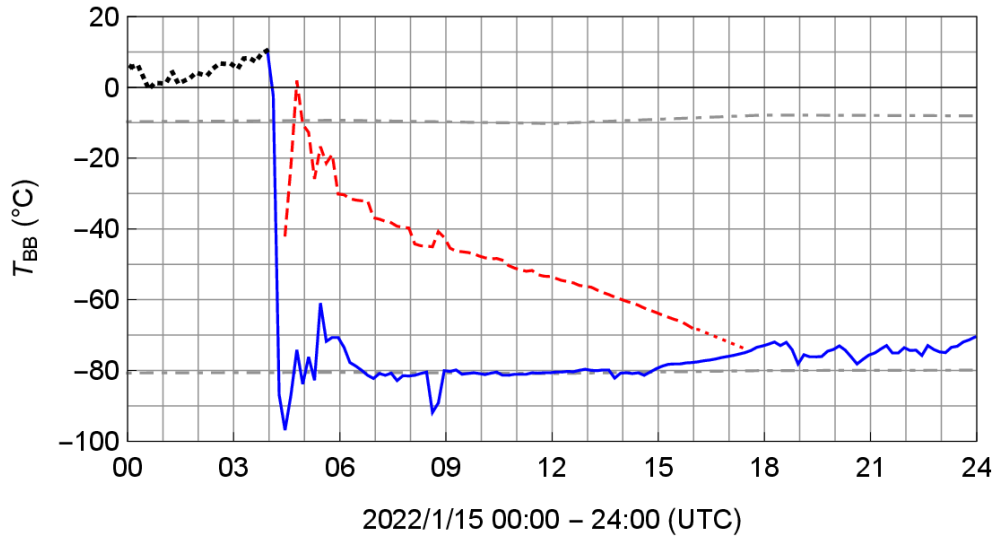


Fig. 14 Time-series variation in brightness temperature  $T_{BB}$  of the HTHH eruption cloud analyzed using Himawari-8 IR (10.4  $\mu\text{m}$ ) imagery from 00:00 to 24:00 UTC on 15 January 2022. Black dotted line: background  $T_{BB}$  at HTHH before the eruption; blue line: minimum  $T_{BB}$  for the HTHH eruption cloud; red dashed line: local maximum  $T_{BB}$  on the cloud; red dotted line: linear extrapolation after difference  $T_{BB} < 10^\circ\text{C}$ . Gray dashed lines show air temperature around the tropopause and stratopause based on GA (Fig. 6) at the analysis times of 00:00, 06:00, 12:00, 18:00 and 24:00 UTC.

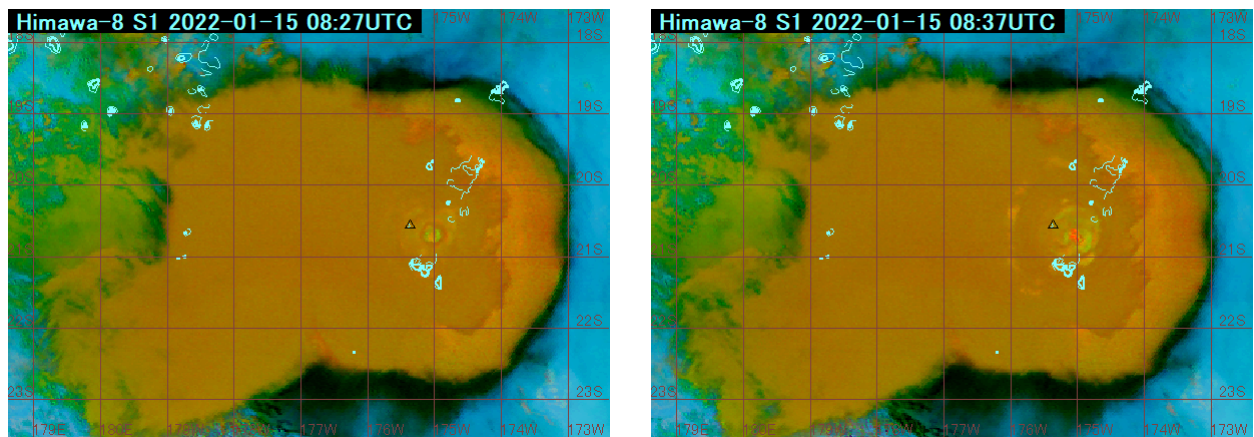


Fig. 15 Himawari-8 SP (Ash RGB) imagery for 08:27 and 08:37 UTC on 15 January 2022. Triangles denote HTHH locations, and latitude-longitude grid lines indicate  $1^\circ$  intervals.

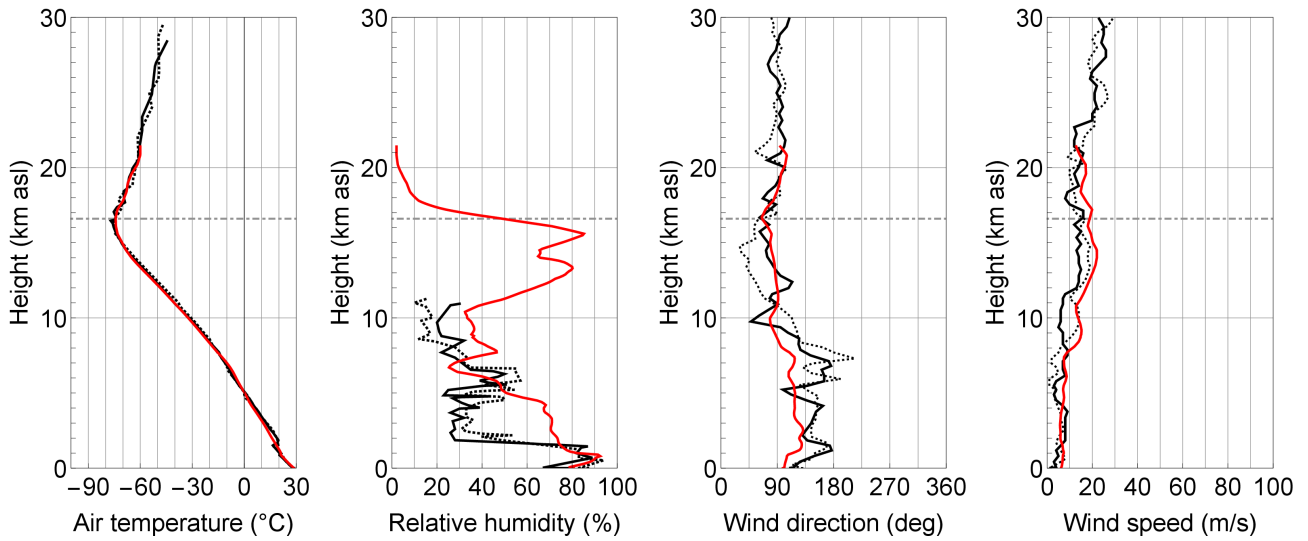


Fig. 16 Vertical profiles of air temperature, relative humidity, wind direction and speed above FOB for 06:00 UTC on 13 August 2021 (red lines). Interpolated GPVs are MA values for the same analysis time. Gray dashed lines show altitude around the tropopause (16.6 km asl). For reference, Chichijima (320 km, N13°E of FOB) sonde data for 00:00 and 12:00 UTC are shown by the solid and dotted black lines, respectively.

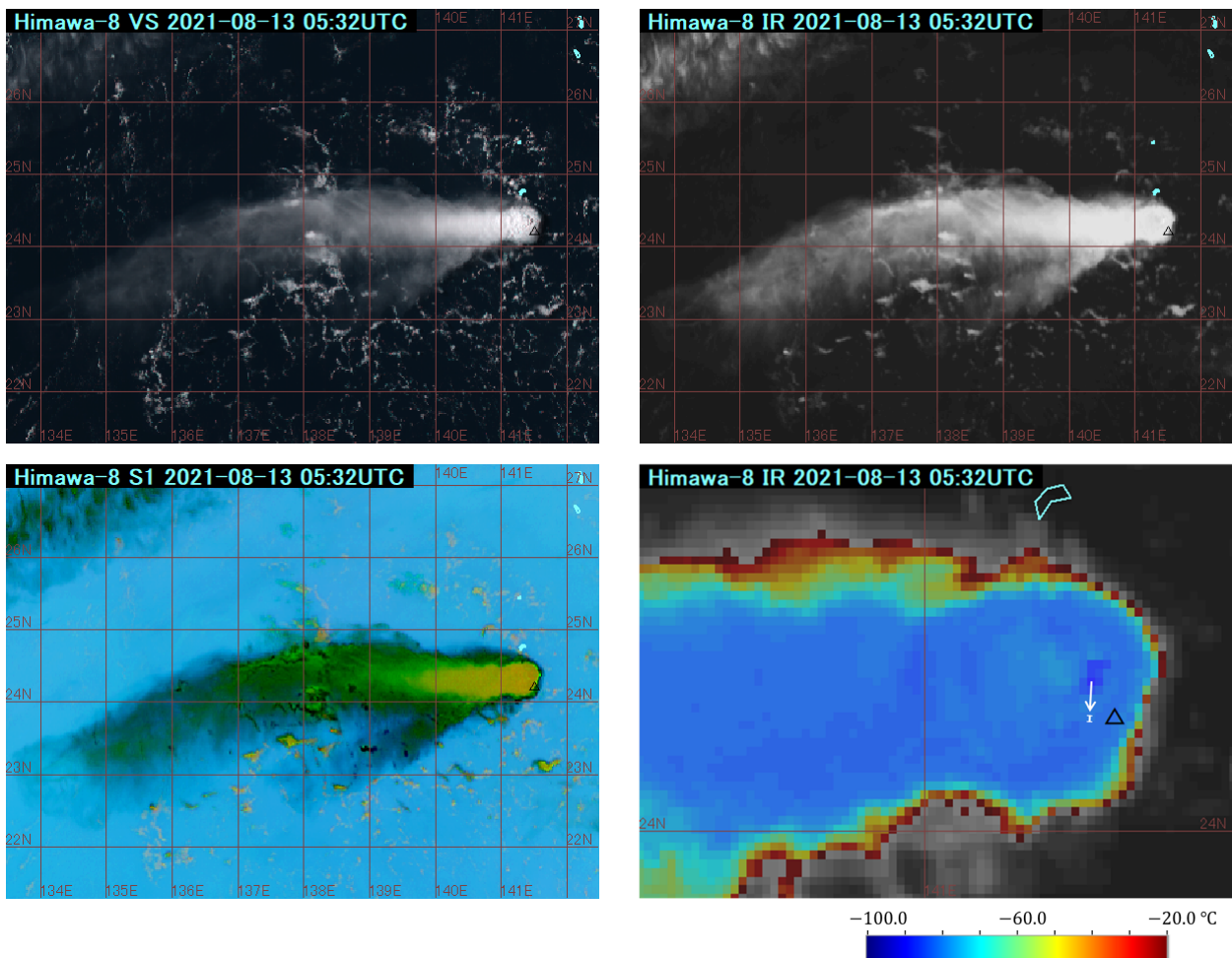


Fig. 17 Himawari-8 VIS (True Color RGB), IR (10.4  $\mu\text{m}$ ) and SP (Ash RGB) imagery for 05:32 UTC on 13 August 2021. The lower-right panel is an enlarged view of the enhanced color image with  $T_{\text{BB}} < -20^\circ\text{C}$ . Triangles denote FOB locations. The white arrow indicates the SCP of the minimum  $T_{\text{BB}}$ , and the white error bar indicates plume height spread. Latitude-longitude grid lines indicate 1° intervals.



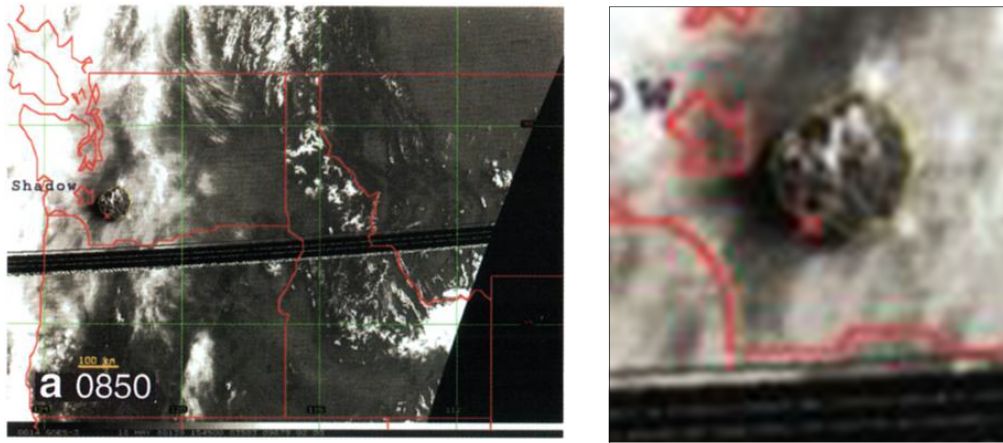


Fig. 18 GOES-3 VIS (0.55~0.70  $\mu\text{m}$ ) imagery for 15:50 UTC (08:50 PDT) on 18 May 1980 (Plate 3a of Holasek and Self (1995)). Crosses denote MSH locations, and latitude-longitude grid lines indicate  $4^\circ$  intervals. The panel on the right is an enlarged view around the MSH on the same scale as Fig. 7.

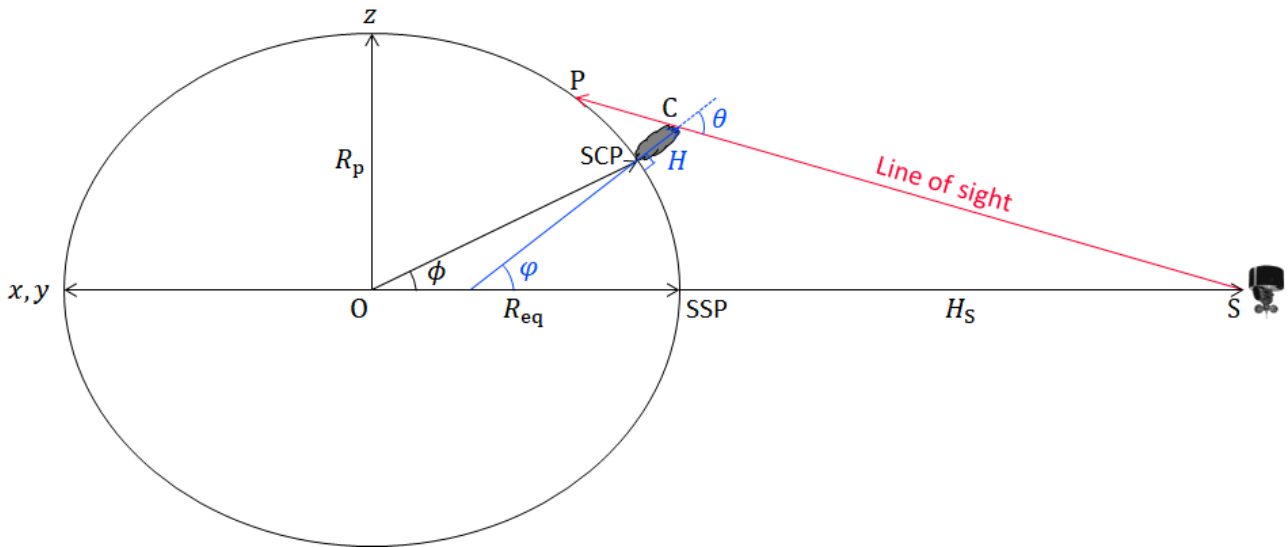


Fig. A1 Location of the satellite (S), cloud top (C) and apparent position in the image (P). SSP is a sub-satellite point, and SCP is a sub-cloud point.  $R_{eq}$ : equatorial radius;  $R_p$ : polar radius;  $H_s$ : satellite height;  $H$ : cloud height from earth surface;  $\phi$ : geocentric latitude;  $\varphi$ : geodetic latitude at SCP;  $\theta$ : satellite zenith angle.

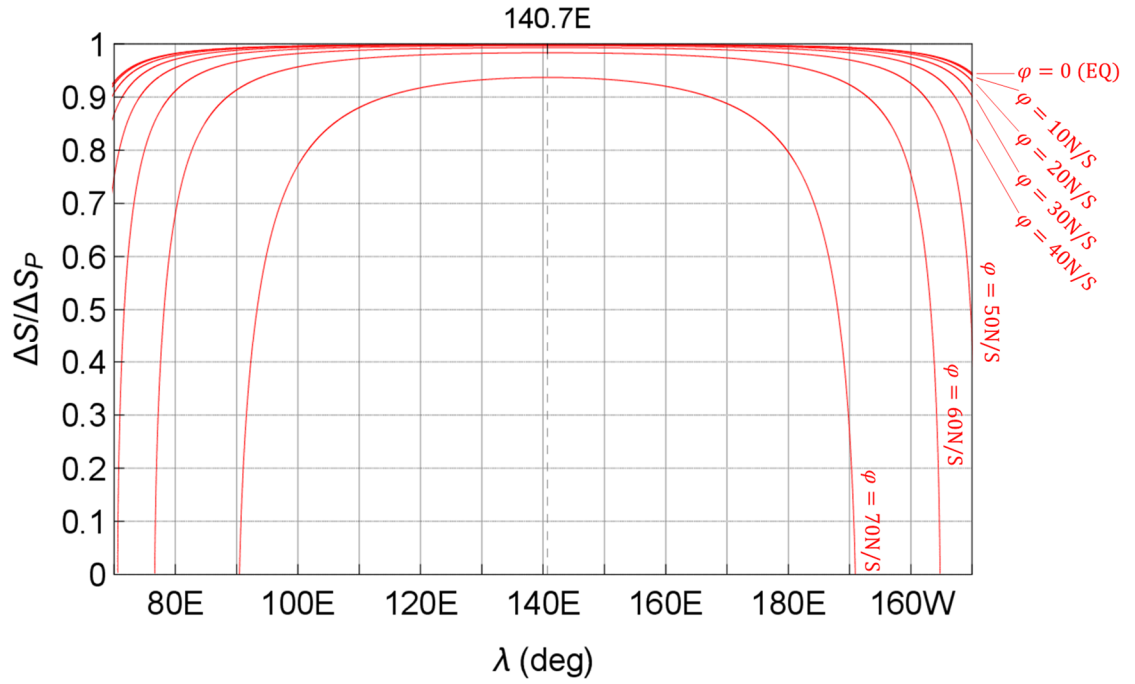


Fig. A2 Correction of cloud area ratio with longitude  $\lambda$  on the horizontal axis.  $\Delta S$ : corrected cloud area;  $\Delta S_P$ : apparent cloud area in satellite image (point P in Fig. A1). For cloud height  $H = 15$  km asl, latitude and longitude of SSP  $\varphi_S = 0^\circ$ ,  $\lambda_S = 140.7^\circ\text{E}$  (Himawari) and satellite height  $H_S = 35800$  km asl.

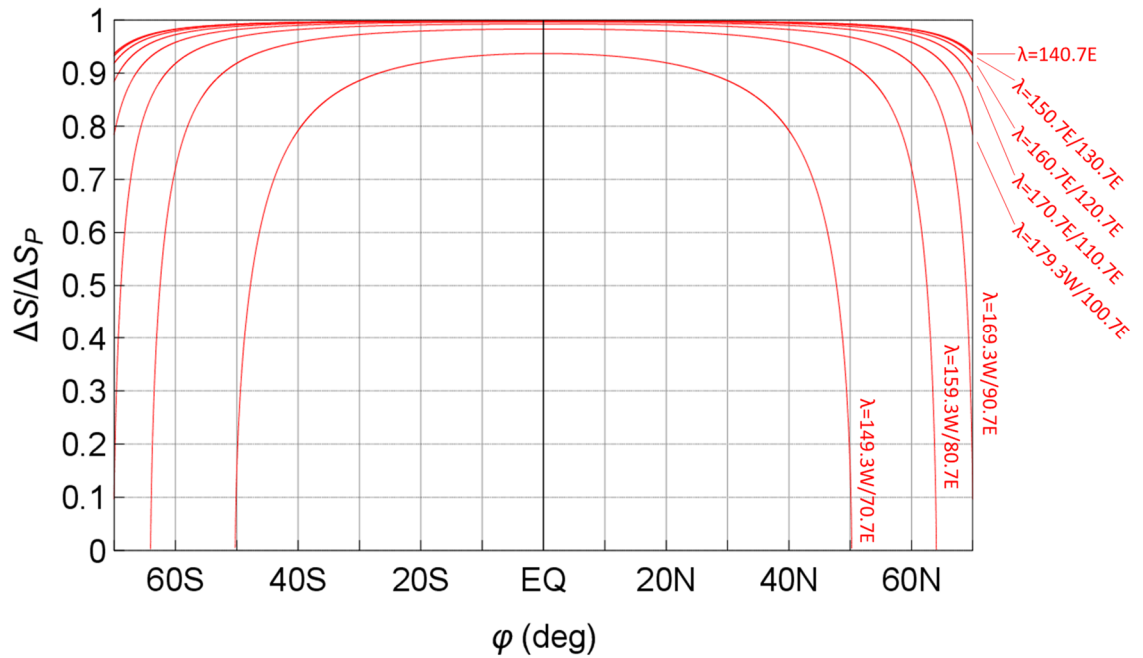


Fig. A3 As per Fig. A2, but with latitude  $\varphi$  on the horizontal axis

Table 1 Himawari-8 imager (AHI) characteristics.

	<b>Band</b>	<b>Wavelength [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Resolution <sup>a</sup> [km]</b>
VIS	1	0.47 (0.450~0.491)	1
	2	0.51 (0.495~0.526)	
	3	0.64 (0.599~0.681)	0.5
NIR	4	0.86 (0.839~0.874)	1
	5	1.6 (1.59~1.63)	2
	6	2.3 (2.23~2.28)	
7	3.9 (3.78~3.99)		
8	6.2 (5.83~6.65)		
9	6.9 (6.74~7.14)		
10	7.3 (7.25~7.44)		
IR	11	8.6 (8.40~8.78)	
	12	9.6 (9.45~9.82)	
	13	10.4 (10.2~10.6)	
	14	11.2 (10.9~11.6)	
	15	12.4 (11.9~12.9)	
	16	13.3 (13.0~13.6)	

a: at SSP

Table 2 VAA records of volcanic ash cloud from HTHH (from 15 to 22 January 2022).

Date [UTC]	VAAC	Height <sup>a</sup> [ft]	Direction	Speed [kt]
1/15 04:39	Wellington	Surface~52000	N	5
1/15 05:19	Wellington	Surface~50000	NE	20
1/15 10:22				
1/15 14:43	Wellington	Surface~63000	W	15
1/16 03:32				
1/16 03:32	Wellington	50000~63000	W	50
1/16 09:14	Wellington	Surface~60000	W	50
1/16 15:00	Wellington	Surface~60000	S	5
1/16 15:00	Wellington	45000~63000	W	30
1/16 15:00	Darwin	40000~63000	W	40
1/16 16:10				
1/16 20:53	Wellington	40000~63000	W	30
1/16 21:19				
1/16 21:30	Darwin	40000~63000	W	55
1/17 02:30	Darwin	42000~63000	W	50
1/17 06:20				
1/17 12:30	Darwin	42000~63000	W	55
1/17 18:00	Darwin	45000~63000	W	50
1/18 05:50				
1/18 12:00	Darwin	42000~63000	W	50
1/19 12:00				
1/19 18:00	Darwin	42000~63000	W	55
1/20 00:03	Darwin	42000~63000	W	50
1/20 17:40				
1/20 23:40	Darwin	42000~63000	W	30
1/21 11:40				
1/21 17:40	Darwin	42000~63000	W	40
1/21 23:40	Darwin	42000~63000	W	45
1/22 17:20				

a: cloud base~cloud top height

Table 3 VAA records of volcanic ash cloud from FOB (from 12 to 15 August 2021).

<b>Date [UTC]</b>	<b>VAAC</b>	<b>Height <sup>a</sup> [ft]</b>	<b>Direction</b>	<b>Speed [kt]</b>
8/12 23:50 	Tokyo	Surface~54000	W	50
8/13 20:20 8/13 23:20 	Tokyo	Surface~54000	W	55
8/14 11:30 8/14 14:20	Tokyo	Surface~54000	W	50
8/14 17:20 8/14 20:20 	Tokyo	Surface~48000	W	55
8/15 05:20 8/15 08:20 	Tokyo	Surface~40000	W	40
8/15 14:20				

a: cloud base~cloud top height

Table 4 Comparison of first eruption clouds from HTHH in 2022 and MSH in 1980.

	<b>HTHH2022</b>	<b>MSH1980</b>	<b>Remarks</b>
Date	15 January 2022	18 May 1980	
Seismic magnitude and depth	$M_S = 5.8$ , 0 km <sup>a</sup>	$M_{SZ} = 5.2$ , 4 km bvl <sup>b</sup>	
Lateral speed	~ 58 m/s (average between 04:07 and 04:17 UTC) <sup>c</sup>	~ 60 m/s (average between 15:37 and 15:50 UTC) <sup>d</sup>	
Directivity	ESE	NNE <sup>d</sup>	
Plume height	$\geq 23$ km asl (at 04:17 UTC)	~ 26 km asl (at 15:50 UTC) <sup>d</sup>	§ 2.2.2
Undercooling	> 6 ~ 16°C ( $T_{BB} = -86.8 \sim -96.9^\circ\text{C}$ at 04:17, 04:27 and 04:37 UTC)	> 6 ~ 15 °C ( $T_{BB} = -56 \sim -65.2^\circ\text{C}$ at 15:50 and 16:20 UTC) <sup>d</sup>	Fig. 14
Atmospheric pressure wave (Amp. in Japan)	$L_1 \sim 200$ Pa (+, 7816 km) <sup>e</sup> $S_1 \sim 40$ Pa (7920 ~ 8000 km) <sup>f</sup> $A_1 \sim 10$ Pa (7920 ~ 8000 km) <sup>f</sup>	$A_1 \sim 10$ Pa (+, 7802 km) <sup>g</sup>	L: Lamb wave S: Acoustic wave A: Gravity wave
Tide level change	Observed <sup>e</sup>	Undetected	
GMS	Himawari-8 5291 km, N70°W of HTHH, $\theta = 54.7^\circ$	GOES-3 5270 km, S18°W of MSH, $\theta = 54.6^\circ$	Fig. A1 for $H = 0$
Satellite imagery	Fig. 7 (10 ~ 20 min after eruption)	Fig. 18 <sup>d</sup> (18 min after eruption)	

a: USGS

b: Yamagishi and Wakui (1981)

c: Carr et al. (2022)

d: Holasek and Self (1995)

e: JMA

f: Izumiya (2022)

g: Sawada et al. (1982)