

大規模噴煙の最低輝度温度とその時間変化率

Minimum Brightness Temperature for Large-scale Eruption Clouds and Related Tendency

新堀敏基¹, 石元裕史¹

Toshiki SHIMBORI¹ and Hiroshi ISHIMOTO¹

(Received July 9, 2025: Accepted January 7, 2026)

ABSTRACT: This study focused on analysis of minimum brightness temperature associated with large-scale eruption clouds (as observed by the Japan Meteorological Agency's Himawari-8/9 geostationary meteorological satellites) for the previous decade from July 2015 to June 2025, along with the maximum cooling rate. Results from the largest eruption (Hunga Tonga-Hunga Ha'apai submarine volcano, 15 January 2022) showed significantly low values and a flat brightness temperature spectrum incorporating the O₃ band.

1 はじめに

火山噴火の規模を表す尺度の一つである噴煙の到達高度を推定する方法に、気象衛星で観測される赤外輝度温度を解析する方法がある。この「輝度温度による高度推定」(例えば、澤田, 2003)は、噴煙が大気場と熱平衡していると仮定して、噴煙の頂部(灰雲の雲頂)の輝度温度と等しい気温に対応する高度を求める。しかし、大規模噴火の直後の噴煙は断熱膨張により過冷却(undercooling, Woods and Self, 1992; Sparks et al., 1997)の状態にあり、大気場の最低気温よりさらに低い輝度温度が観測されることがある(例えば、新堀・他, 2023)。この場合、従来の「輝度温度による高度推定」はできないが、その時間変化率は爆発的噴火に伴う噴煙の鉛直発達率と関係があることが知られている(Pavolonis et al., 2018; Pardini et al., 2024)。そこで本稿では、噴火規模を即時把握するために、静止気象衛星ひまわり8号(Himawari-8, Bessho et al., 2016)の運用開始から10年間に発生した比較的規模の大きな噴火事例(久利・他, 2024)について、対流圏水蒸気による吸収の影響が少ない赤外バンド(IR, 10.4 μm帯)で観測された最低輝度温度とその時間変化率を解析した結果をまとめておく。

2 解析方法

(関連図表: 図1, 表1)

解析には、2015年7月7日に正式運用を開始したHimawari-8および2022年12月13日に運用交代したHimawari-9により時間間隔 $\Delta t = 10$ minで観測されているフルディスク画像を使用した。Himawari-8/9に搭載されている可視赤外放射計(AHI)で観測される可視(B01, 02, 03), 近赤外(B04, 05, 06), 赤外(B07~16)の計16バンド(Bessho et al., 2016)のうち、水平分解能2 kmの赤外バンド(B07~16)で観測された赤外面像を解析した。

対象とする噴火は、Himawari-8/9の観測領域内において、噴煙高度15 km超の航空路火山灰情報(VAA)が入電した15火山、32事例とした(表1, 久利・他(2024)の表2を2025年6月末まで延長)。各事例の一連の噴火活動(当該噴火の発生前から衛星画像で噴煙が検出できなくなるまで、もしくは次の噴火が検知されるまで)について、下記の解析(図1)を行った:

- (1) 噴煙の輝度温度スペクトルを解析するために、各時刻 t の噴煙の赤外面像(B13, 中心波長: 10.4 μm)で輝度温度 $T_{BB}(t)$ の最低値を観測した位置において、B07~16で観測した輝度温度を求める。
- (2) 噴煙の過冷却度を解析するために、全時刻のB13画像から最低輝度温度 $\min T_{BB}$ を観測した時刻において、火口上空の大気場の最低気温からの温度差 $\min T_{BB} - \min T_a$ を求める。
- (3) 噴煙の鉛直発達率を解析するために、連続する二

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

時刻の $T_{BB}(t - \Delta t)$, $T_{BB}(t)$ の各最低値から、その最大時間低下率 $\max(-\Delta T_{BB}/\Delta t)$ を後方差分で求める($\Delta T_{BB} \equiv \min T_{BB}(t) - \min T_{BB}(t - \Delta t)$).

ただし (1) において、噴火検知前は火口位置に固定した。(2) において、大気場の気温 T_a は気象庁全球サイクル解析(GA)の6時間ごとの気圧面格子点値(GPV)を観測時刻・火口上空に時空間内挿した鉛直プロファイルを参照した。(3)の時間変化率は、各時刻における輝度温度の最低値 $\min T_{BB}(t)$ を比較するものであり、必ずしも同一位置で取ったものではないことに注意する。なお、本稿で示す観測時刻は、フルディスク観測の終了時刻ではなく、各火山付近の撮像時刻である。

3 解析結果

(1) 輝度温度スペクトルの時間変化

(関連図表：図 2-6, 表 1)

表 1 に挙げた 32 事例について、当該噴火の発生前後の輝度温度スペクトルを図 2 に示す。連続的噴火で噴火発生直後に最低輝度温度 $\min T_{BB}$ や最大時間低下率 $\max(-\Delta T_{BB}/\Delta t)$ が解析されなかった場合は、これらの値が解析された時刻前後のスペクトルを合わせて示した。図中に示した大気場の最低気温は、いずれの事例も対流圏界面付近で解析された気温である。

全事例のうち、噴火規模の最も大きい事例 No. 20: 2022 年 1 月 15 日フンガ・トンガーフンガ・ハアパイ (HTHH) 火山噴火 (例えば, Carr et al., 2022; Proud et al., 2022; 新堀・他, 2023; 久利・他, 2024) を例に、大規模噴煙に見られる輝度温度スペクトルの特徴を述べる。各観測時刻 03:57~04:57 UTC に輝度温度スペクトルを解析した位置を図 3 の B13 画像上に示す。ただし、衛星視差による雲の位置ズレは補正していない。各時刻に $\min T_{BB}(t)$ を観測した位置は、過冷却状態にあつては、大規模噴煙の最も発達した部分に対応すると考えられる。

さらに、噴火発生から約 5 時間後の 08:57 UTC に対流圏界面付近の気温とほぼ同じ $\min T_{BB}(t)$ が観測された位置 (図 4 左の×印) において、Himawari-8/AHI と極軌道衛星 MetOp-B, C/赤外サウンダ IASI で解析された輝度温度スペクトルの比較を図 5 に示す。灰雲が消散しつつある 20:57 UTC (図 4 右) は対流圏中～上層の半透明な氷雲の観測で特徴的な (例えば, Gangale et al., 2010)、波長 10~13 μm にかけて輝度温度が大きく減少するスペクトル (図 5 の▼印) を有しているのに

対して、高層大気中で水平方向へ広がる傘型噴煙 (例えば, 小屋口, 2008) がまだ形成されている 08:57 UTC のスペクトル (図 5 の▲印) は、オゾンバンド (B12, 中心波長: 9.6 μm) を除き、おおむね平坦であり、対流圏界面付近を光学的に厚い大規模噴煙が広がっていることが推測される。ただし一般に、傘型噴煙が広がる密度中立高度は対流圏界面高度と必ずしも一致しないことに注意する。

大規模噴火で噴煙が対流圏上層へ達すると、オゾンバンドのスペクトルが相対的に反転する (オゾンバンドそのものの輝度温度変化は小さいが、スペクトル分布が下に凸から上に凸になる) 特性がある。この特性は、放射伝達モデル (例えば, Ishimoto et al., 2022) により、仮想的に不透明な灰雲を置いて雲頂高度を変化させたシミュレーションからも確認できる (図 6)。さらに、大規模噴煙が対流圏界面を越えて上昇すると、成層圏オゾンによる吸収の影響もなくなるため、輝度温度スペクトルはオゾンバンドも含めて平坦になり昇温する (図 2 の事例 No. 20)。

(2) 最低輝度温度と最低気温からの温度差

(関連図表：図 2, 7, 表 1)

輝度温度スペクトルの時間変化 (図 2) から、一連の噴火活動中に、赤外バンド (B13) で観測された最低輝度温度とそのときの最低気温との差を図 7 に示す。表 1 に挙げた 32 事例のうち、過冷却状態が観測されたのは 12 事例あり、最も過冷却が観測されたのは事例 No. 19: 2022 年 1 月 13 日 HTHH 噴火 ($\min T_{BB} - \min T_a = -16.7^\circ\text{C}$)、次いで事例 No. 20: 2022 年 1 月 15 日 HTHH 噴火 (-16.3°C) であった。

図 7 において、縦軸の温度差 0°C 線の付近にある多くの事例は、噴煙が対流圏界面まで到達していることを意味している。しかし、過冷却状態にない噴煙がさらに成層圏に入ったかは、雲頂付近の輝度温度の極大値を解析する必要があり、最低輝度温度のみからは判断が難しい。また、横軸の最低輝度温度が比較的高い事例 (No. 2, 10, 22, 24) はいずれもカムチャツカ半島の火山噴火である。低・中緯度帯と比べて、高緯度帯の対流圏界面は高度が低く気温が高いため、熱帯・亜熱帯の火山噴火とは切片が変わると考えられる。

なお、参照する $\min T_a$ を火口上空ではなく $\min T_{BB}$ を観測した位置の鉛直方向で取った場合、水平方向は最大約 100 km 離れるが、対流圏界面付近の最低気温差

は $-0.4\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ (平均 0.0°C , 標準偏差 0.1°C) に留まる. また外れ値の事例 No. 5 は, 「輝度温度による高度推定」で事後解析したところ, 噴煙高度は海拔 10 km に満たず, 大規模噴火ではなかった事例である.

(3) 輝度温度の最大時間低下率

(関連図表: 図 2, 8, 表 1)

(2) と同様に図 2 から, 10 分ごとに観測された最低輝度温度の時間変化量 (低下量) が最も大きくなったとき, 低下前の輝度温度に対する最大時間低下率 (10 分値を 1 分値に換算) を図 8 に示す. 表 1 に挙げた 32 事例のうち, 比較的大きな時間低下率 ($\max(-\Delta T_{\text{BB}}/\Delta t) > 6.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 参考: 湿潤大気の気温減率 $\Gamma\sim 6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$) が解析されたのは 7 事例あり, 最大は事例 No. 20: 2022 年 1 月 15 日 HTHH 噴火と No. 32: 2025 年 6 月 17 日レウオトビ火山噴火 (いずれも $\max(-\Delta T_{\text{BB}}/\Delta t) = 8.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$) であった.

この時間変化率は, 噴煙の発達過程で観測された最低輝度温度間で差分が取れることが望ましい. しかし, 10 分ごとの撮像画像からこの条件で解析できた事例 (No. 14, 17, 19, 20) は限られる. 一般に, 連続噴火中にさらに規模の大きな噴火が発生した事例 (No. 6, 7, 13, 18, 22 など) や積乱雲・乱層雲などが噴火検知や噴煙解析に影響した事例 (No. 1, 4, 8, 9, 11, 12, 16, 21, 23 ~28, 31 など) では過小になる. 逆に, 噴火発生時に火口付近で比較的光熱異常 (ホットスポット) が検知された事例 (No. 2, 3, 10, 29, 30, 32) や温度低下前は地表面・海面温度が観測された事例 (No. 15 など) では過大になる. 比較的大きな時間低下率が解析された 7 事例のうち, いずれも海底噴火である事例 No. 17: 2021 年 8 月 12 日福徳岡ノ場 (FOB) 噴火と No. 20: 2022 年 1 月 15 日 HTHH 噴火については, $\max(-\Delta T_{\text{BB}}/\Delta t)$ は噴火規模と相関していると考えられる.

4 まとめと課題

Himawari-8 以降の 10 年間に VAA で通報された大規模噴火事例について, 噴煙の輝度温度スペクトル, 最低輝度温度とその時間変化率を解析した. 大規模噴煙が対流圏上層へ達するとオゾンバンドのスペクトル特性が上に凸に反転し, さらに対流圏界面を越えて成層圏を上昇すると輝度温度スペクトルは平坦になり昇温する特徴を確認した. 噴火規模の最も大きい 2022

年 1 月 15 日 HTHH 噴火の事例では, 最低輝度温度 $\min T_{\text{BB}}$ は過冷却状態を示し, 最大時間低下率 $\max(-\Delta T_{\text{BB}}/\Delta t)$ も $6.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ より大きな温度減率を示した. $\min T_{\text{BB}}$ や $\max(-\Delta T_{\text{BB}}/\Delta t)$ は, 輝度温度スペクトルの特徴とともに, 噴火規模を即時把握する尺度になる (すなわち, 噴火規模が大きくなるほど図 7, 8 のグラフ左下方にプロットされる) と考えられる.

$\min T_{\text{BB}}$ は, 過冷却状態にある大規模噴煙では, 水雲・氷雲の影響を受けず, また衛星視差による位置ズレを考慮する必要がないので, 噴火規模の即時把握に適している. $\max(-\Delta T_{\text{BB}}/\Delta t)$ は, 噴煙の運動に対応した値であるか注意が必要であり, 水雲・氷雲やホットスポットなどの影響を受けるが, スペクトル分解能や時間分解能については今後の改善が期待される. 次期気象衛星 (Himawari-10, 例えば, 別所・他, 2024) では, 赤外サウンドが搭載されるとともに, 時間間隔 2.5 分の機動観測の数が 1 から 4 に増える計画である. これらの改善に伴い, 図 7, 8 も精緻化されるであろう.

むすびに, 噴火規模を即時把握する上で, 「モデルによる高度推定」は有用な方法である. それはまた, 最低輝度温度やその時間変化率の解析結果の物理的理解にも繋がる. 2022 年 1 月 15 日 HTHH 噴火の事例で観測された過冷却状態は, 1 次元噴煙モデル (Mastin et al., 2024) により再現されている. 現在, 気象庁で進めている火山灰予測情報の改善 (広域降灰対策に資する降灰予測情報に関する検討会, 2025) の取組の一つである 1 次元噴煙モデルの改良 (Ishii et al., 2022; Ishii and Iriyama, 2024) において, さらに外来水の影響 (Koyaguchi and Woods, 1996; Rowell et al., 2022; Pardini et al., 2024) や潜熱の解放 (過冷却の抑制) を考慮するなど, 現業化後のさらなる活用を目指した研究を進めることは重要な課題である.

謝辞

執筆に際しては, 気象研究所火山研究部第二研究室の石井憲介主任研究官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, 気象庁数値予報開発センターの林 昌宏調査官から貴重な助言を戴いた. さらに査読者である火山灰情報企画調整官の林 勇太氏および編集委員の中村政道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.

文献

- 久利美和・桑山辰夫・杉浦 理 (2024): 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, 験震時報, **88** : 2.
- 広域降灰対策に資する降灰予測情報に関する検討会 (2025): 広域に降り積もる火山灰対策に資する火山灰予測情報のあり方 (報告書), 36 pp, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kentoukai/2025/kouhai/houkoku/houkoku_honbun.pdf, (参照 2025-06-30).
- 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 (2003): 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.
- 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一, 験震時報, **87** : 2.
- 別所康太郎・安藤昭芳・隅田康彦・安部実希 (2024): 静止気象衛星ひまわり 10 号について, 天気, **71**, 511-515.
- 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.
- 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.
- Gangale, G., A. J. Prata, and L. Clarisse (2010): The infrared spectral signature of volcanic ash determined from high-spectral resolution satellite measurements, *Remote Sens. Environ.*, **114**, 414-425.
- Ishii, K. and Y. Iriyama (2024): Do seasonality and latitude dictate the formation of strong or weak volcanic eruption plumes? *Geophys. Res. Lett.*, **51**, e2023GL106674.
- 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.
- Ishimoto, H., M. Hayashi, and Y. Mano (2022): Ash particle refractive index model for simulating the brightness temperature spectrum of volcanic ash clouds from satellite infrared sounder measurements, *Atmos. Meas. Tech.*, **15**, 435-458.
- Koyaguchi, T. and A. W. Woods (1996): On the formation of eruption columns following explosive mixing of magma and surface–water, *J. Geophys. Res.*, **101**, 5561-5574.
- Mastin, L. G., A. R. Van Eaton, and S. J. Cronin (2024): Did steam boost the height and growth rate of the giant Hunga eruption plume? *Bull. Volcanol.*, **86**, 64.
- NOAA, NASA, and US Air Force (1976): U.S. Standard Atmosphere, 1976, U.S. Government Printing Office, 227 pp.
- Pardini, F., S. Barsotti, C. Bonadonna, M. de' Michieli Vitturi, A. Folch, L. Mastin, S. Osorio, and A. T. Prata (2024): Dynamics, monitoring, and forecasting of tephra in the atmosphere, *Rev. Geophys.*, **62**, e2023RG000808.
- Pavolonis, M. J., J. Sieglaff, and J. Cintineo (2018): Automated detection of explosive volcanic eruptions using satellite-derived cloud vertical growth rates, *Earth Space Sci.*, **5**, 903-928.
- 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.
- Rowell, C. R., A. M. Jellinek, S. Hajimirza, and T. J. Aubry (2022): External surface water influence on explosive eruption dynamics, with implications for stratospheric sulfur delivery and volcano–climate feedback, *Front. Earth Sci.*, **10**, 788294.
- 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.
- 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.

(編集担当 中村 政道)

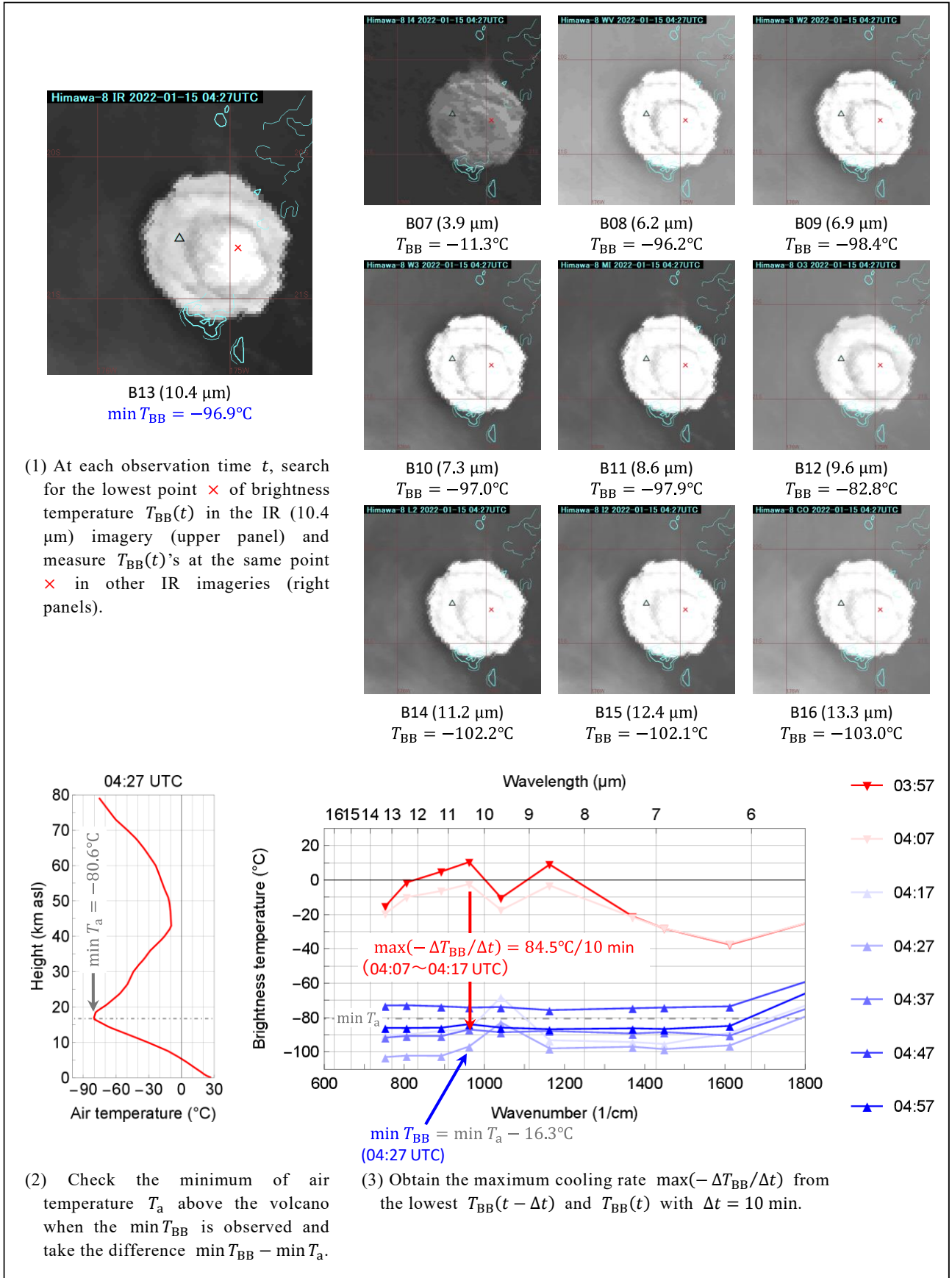


図1 衛星解析方法の概念図

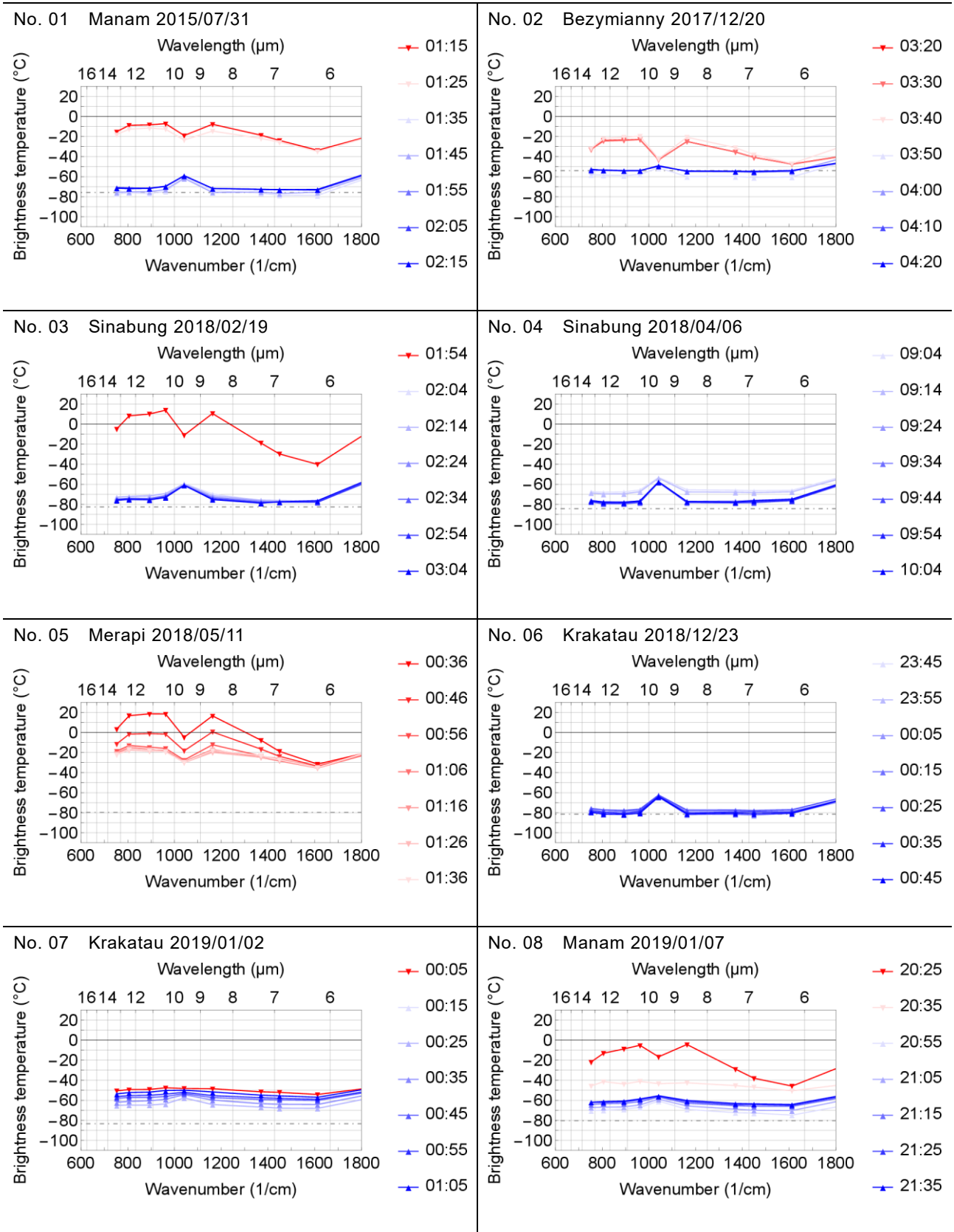


図 2 Himawari-8/9 による火山噴火前後の赤外輝度温度スペクトルの時間変化. 各時刻に IR (10.4 μm) で最低輝度温度を観測した位置で解析した. ▼印は輝度温度差 O_3 (9.6 μm) - IR (10.4 μm) が負, ▲印は正に反転後のスペクトル, 鎖線は GA による対流圏界面付近の気温 ($\min T_a$ と同値) を示す.

大規模噴煙の最低輝度温度

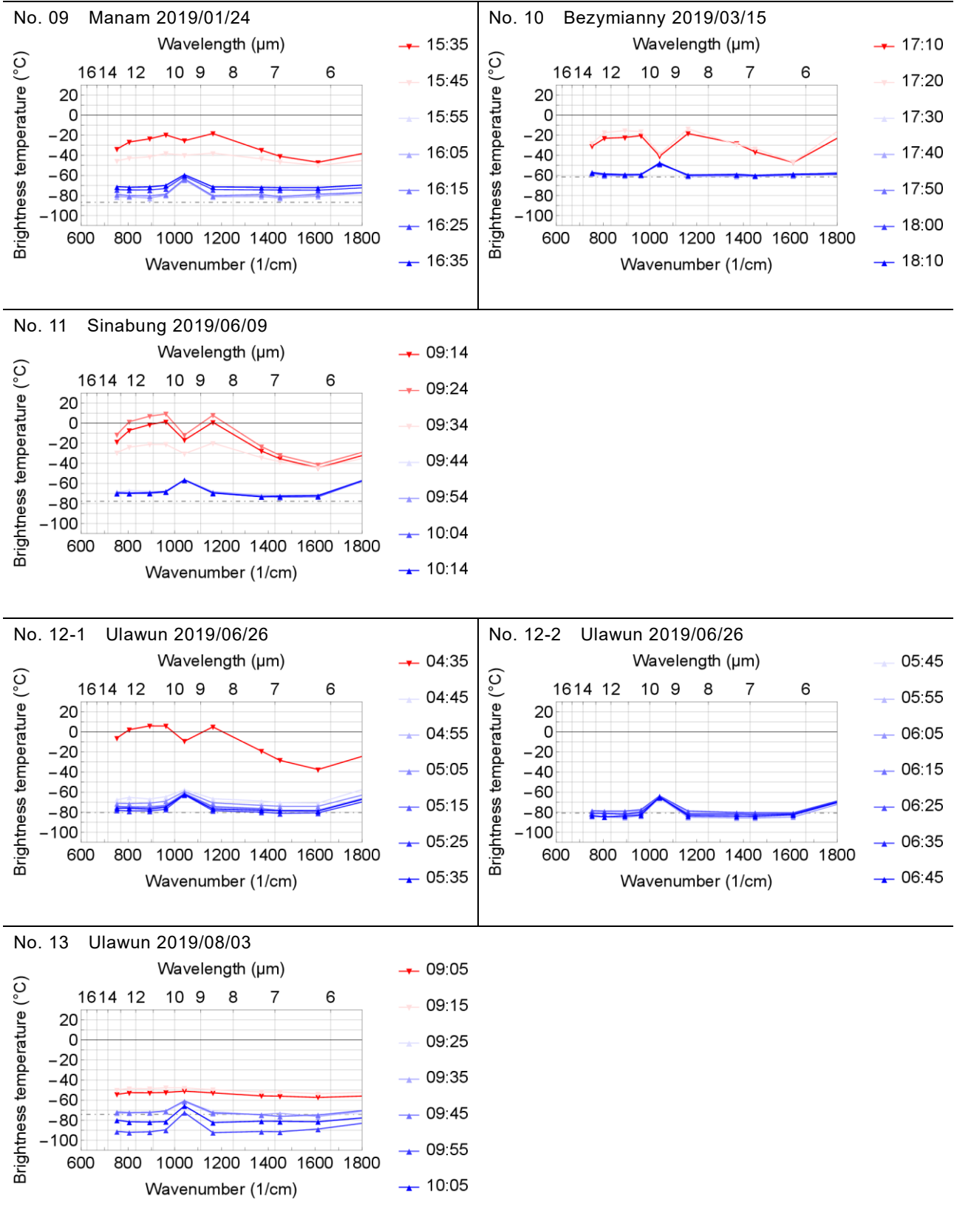


図2 (つづき)

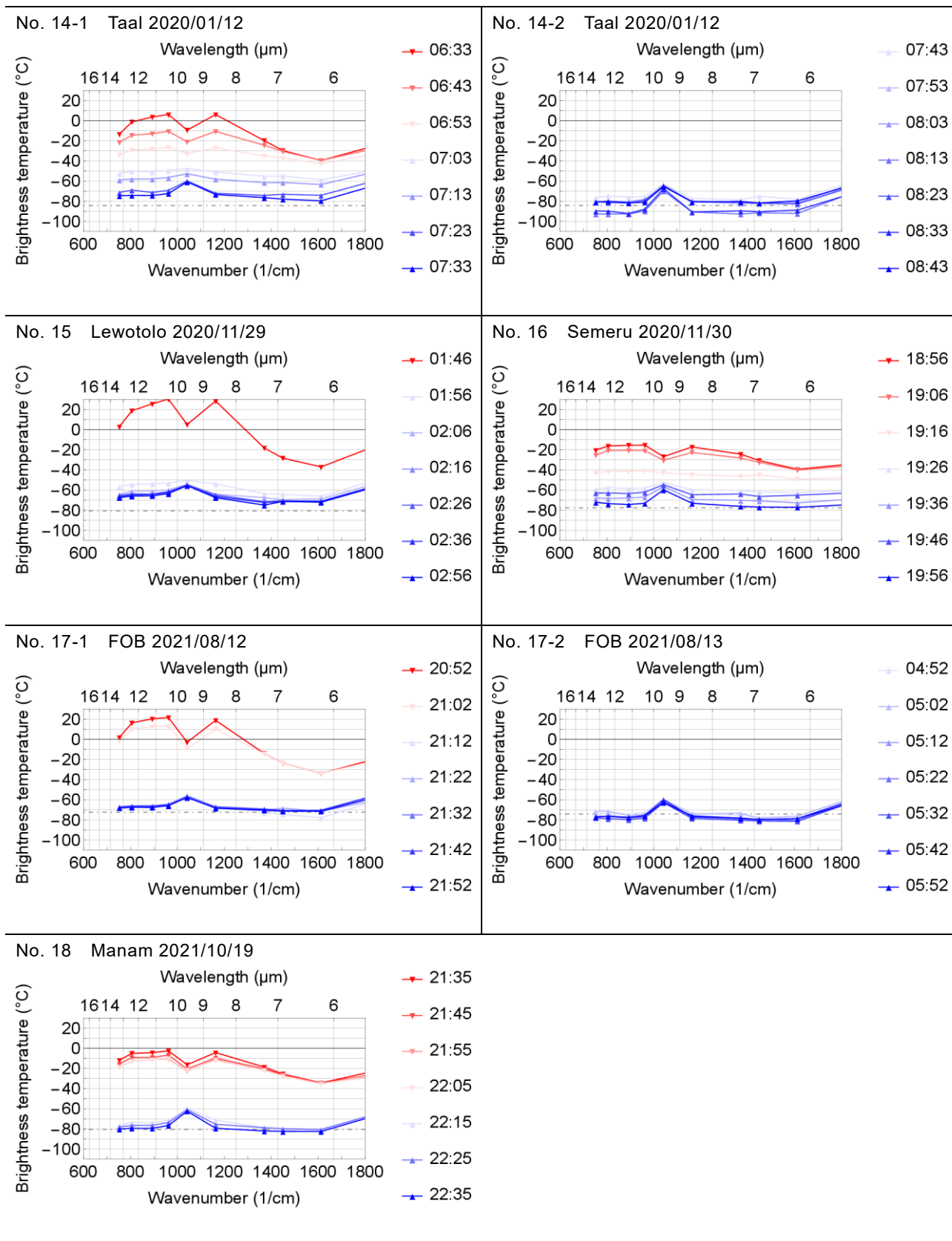


図 2 (つづき)

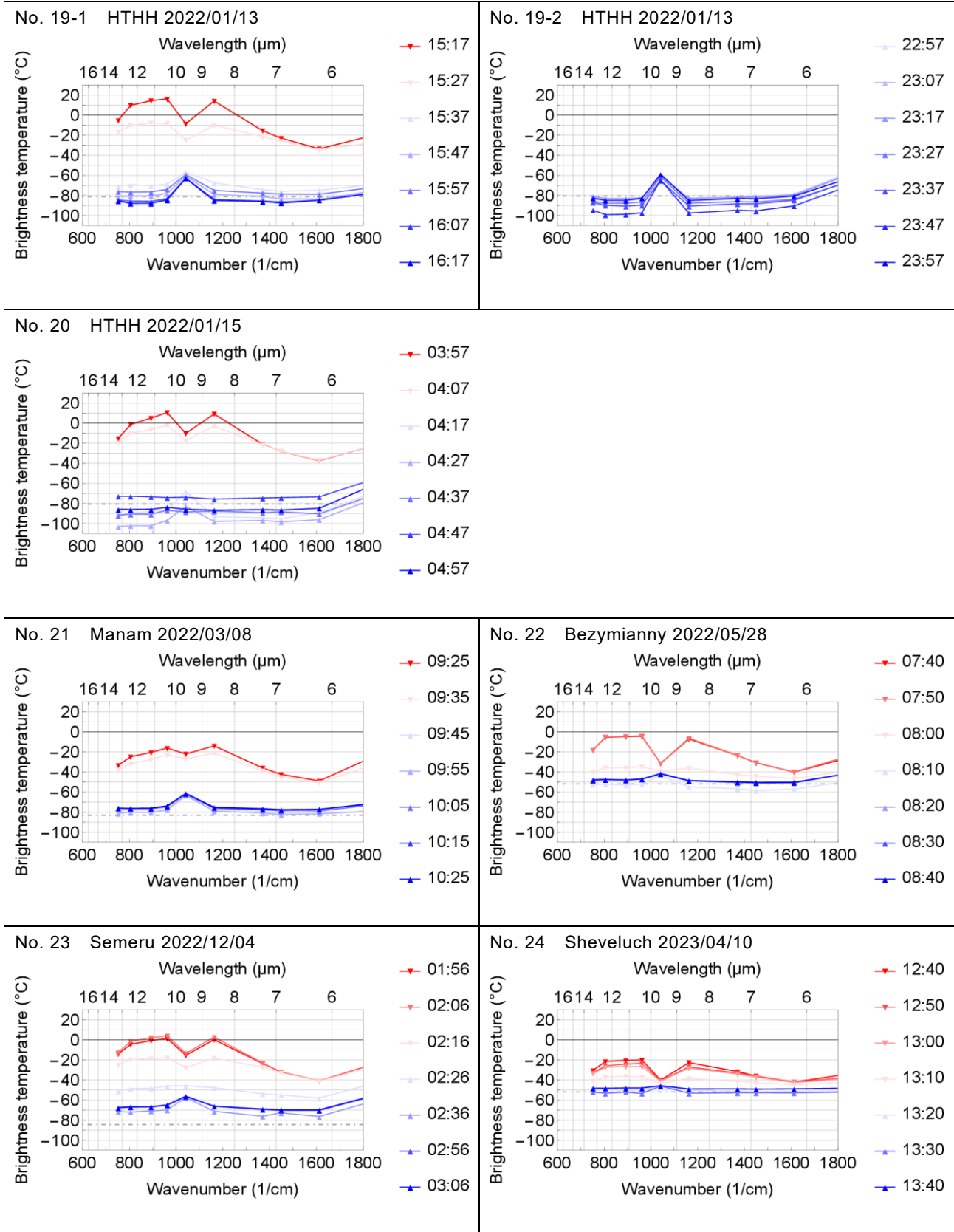


図2 (つづき)

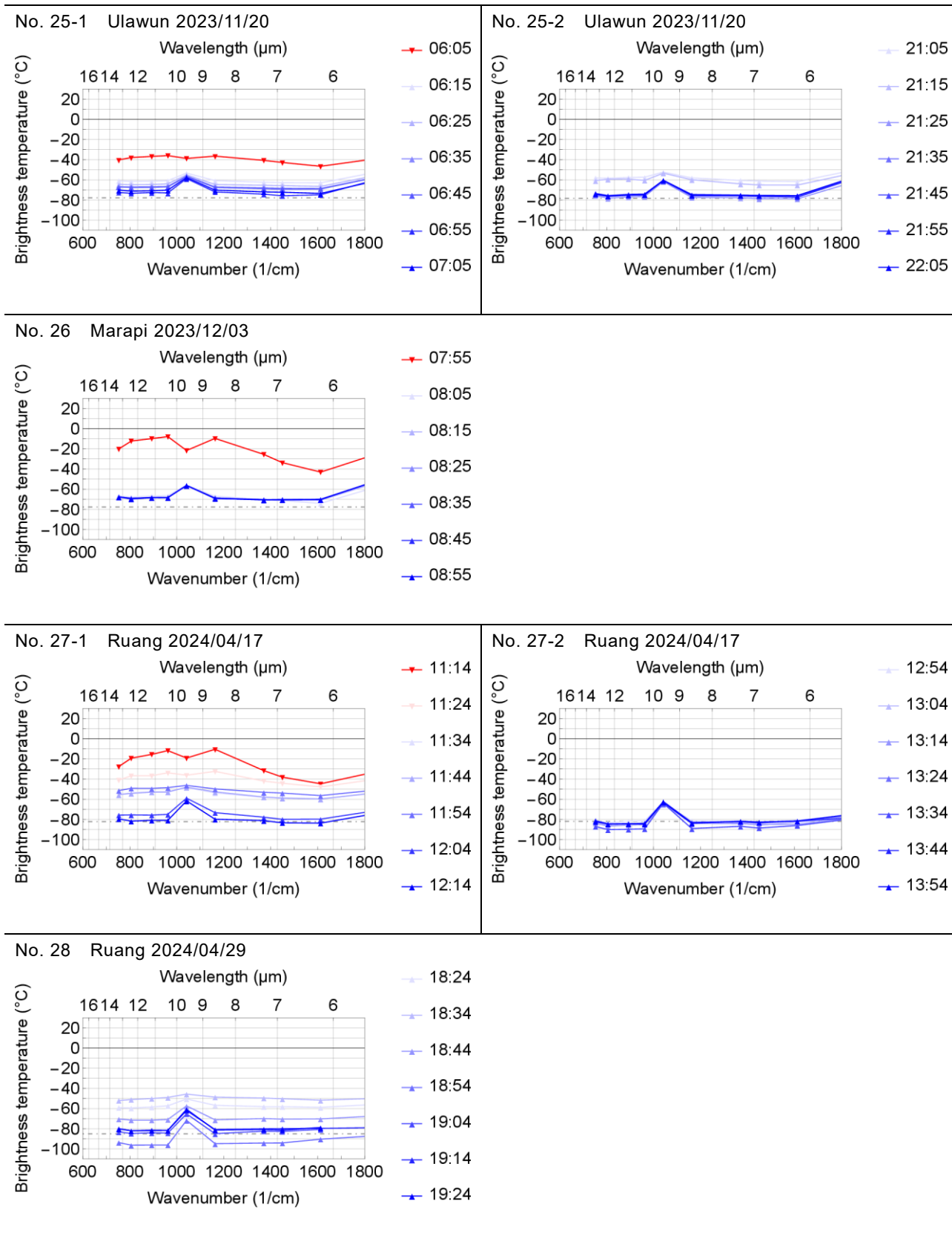


図 2 (つづき)

大規模噴煙の最低輝度温度

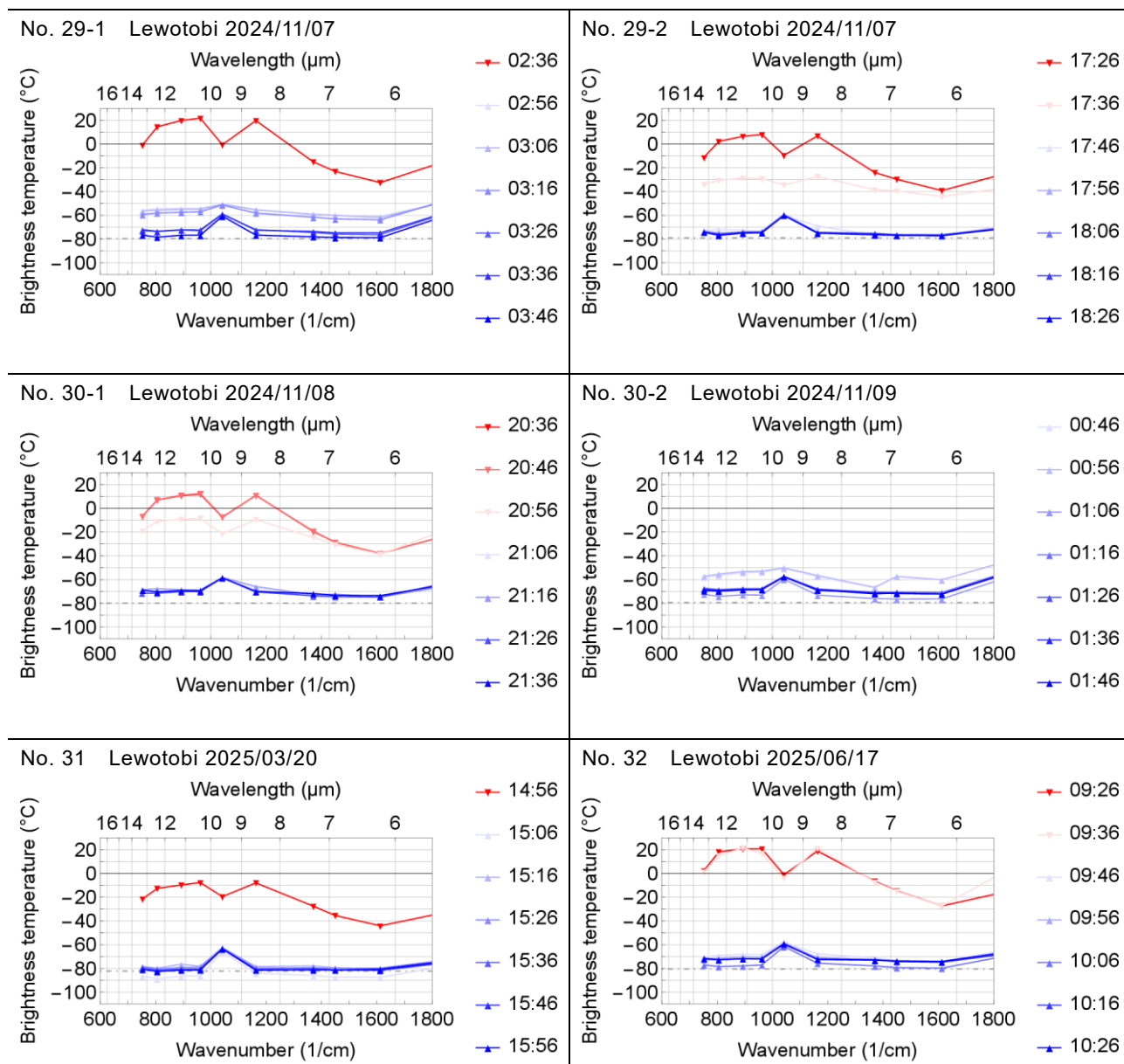


図2 (つづき)

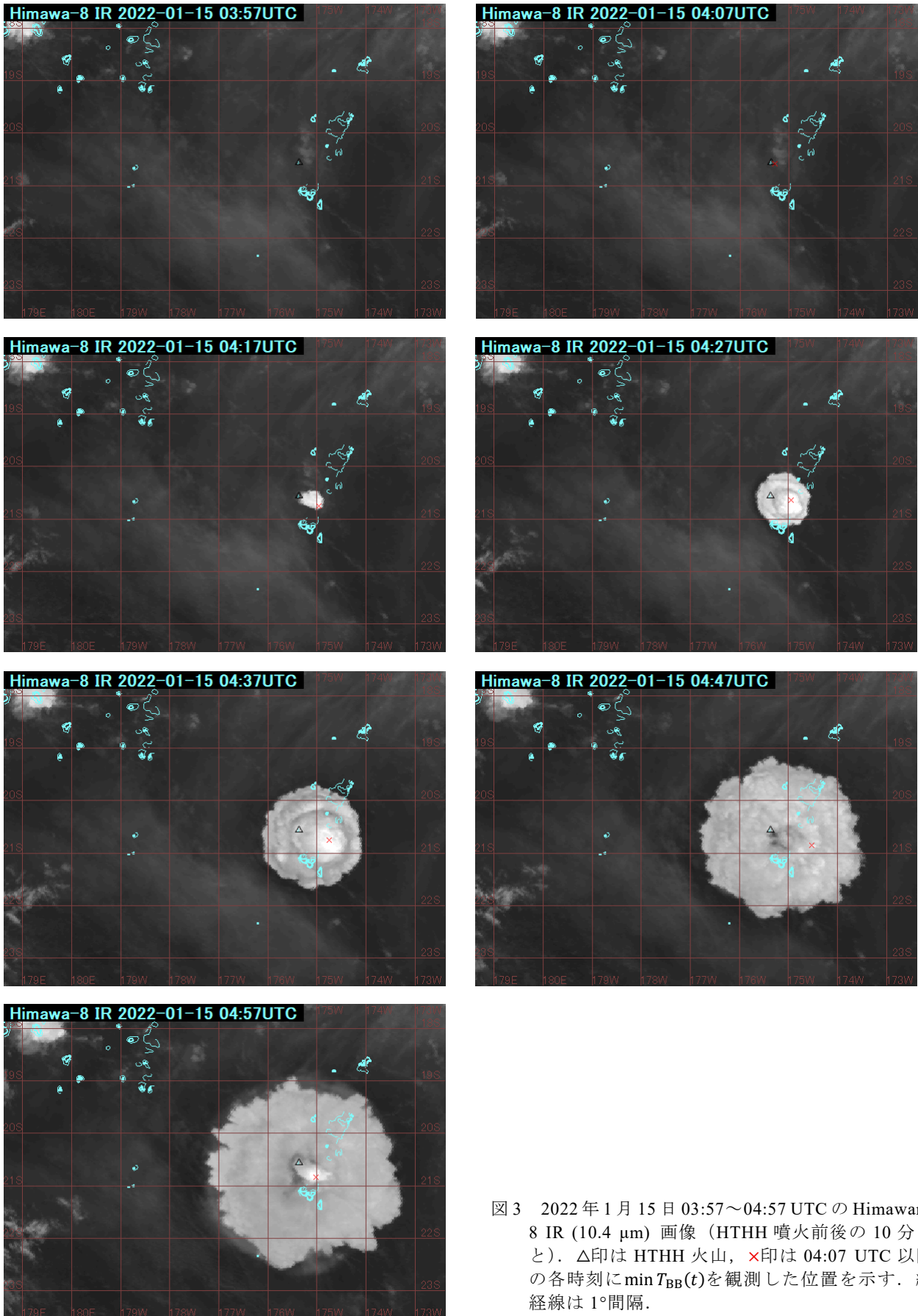


図3 2022年1月15日03:57~04:57 UTCのHimawari-8 IR (10.4 μm) 画像 (HTHH噴火前後の10分ごと). Δ 印はHTHH火山, \times 印は04:07 UTC以降の各時刻に $\min T_{\text{BB}}(t)$ を観測した位置を示す. 緯経線は 1° 間隔.

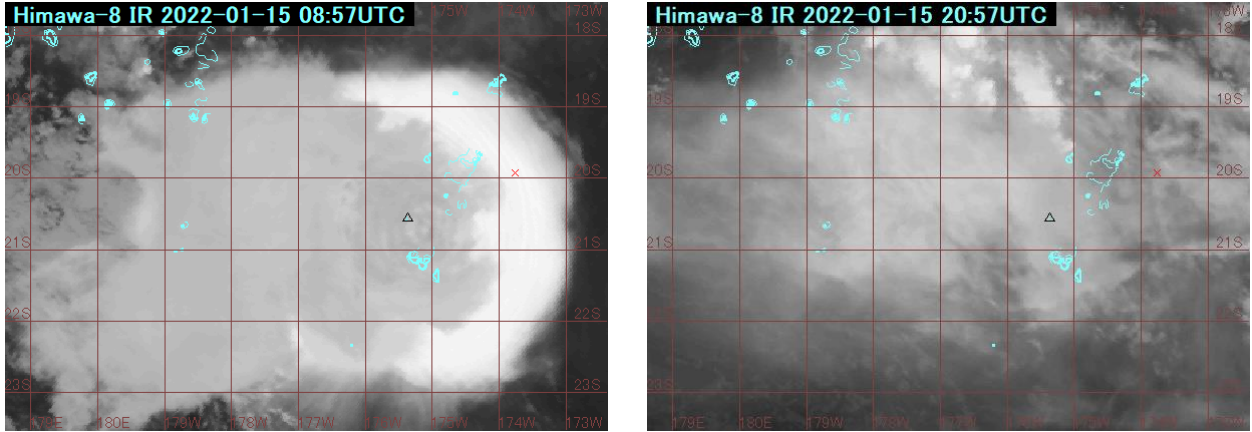


図4 2022年1月15日08:57, 20:57 UTCのHimawari-8 IR (10.4 μm) 画像. 両図の \times 印は08:57 UTCに $\min T_{\text{BB}}(t)$ を観測した位置を示す. Δ 印と緯経線間隔は図3に同じ.

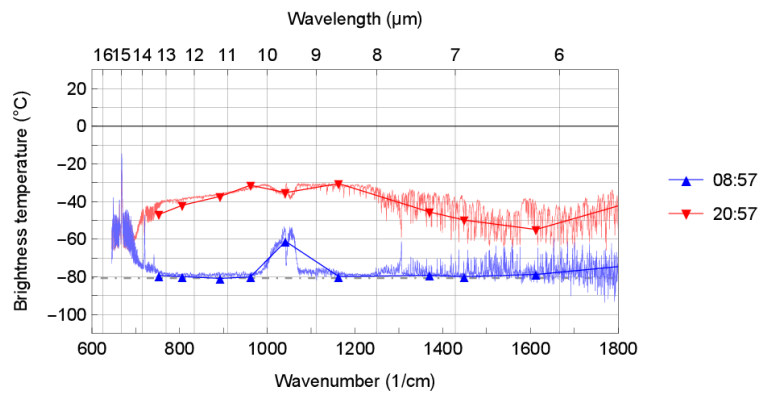


図5 2022年1月15日08:57 UTCにHimawari-8により $\min T_{\text{BB}}(t)$ が観測された位置(図4の \times 印)における輝度温度スペクトル(\blacktriangle 印)と同時刻に同付近でMetOp-B, C/IASIにより解析されたスペクトル(青線). \blacktriangledown 印と赤線は20:57 UTCの同位置におけるそれぞれの輝度温度スペクトル. 鎖線は08:57 UTCのGAによる対流圏界面付近の気温を示す.

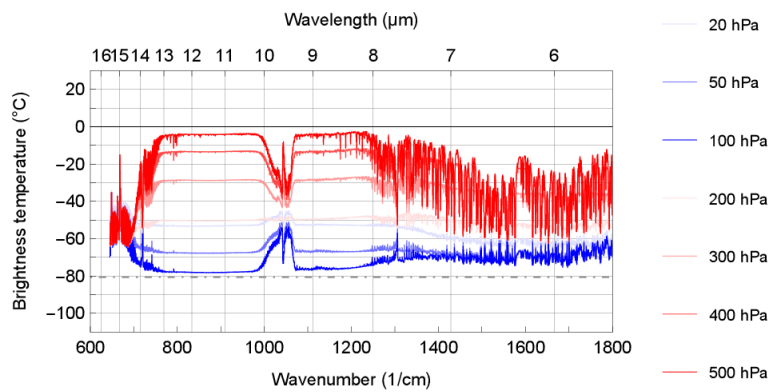


図6 光学的に不透明な灰雲の雲頂高度を500 hPa(約5.8 km asl)から20 hPa(約26.4 km asl)まで変えたときの放射伝達モデルによる輝度温度スペクトルのシミュレーション. 2022年1月15日08:57 UTC(図4左)の \times 印の位置に, 粒子有効半径 $10 \mu\text{m}$, 波長 $11 \mu\text{m}$ での光学的厚さ20, 雲底気圧は雲頂気圧+100 hPaの灰雲を置いた場合. ただし, O_3 の鉛直プロファイルは標準大気(NOAA et al., 1976)を仮定した. 鎖線は図5に同じ.

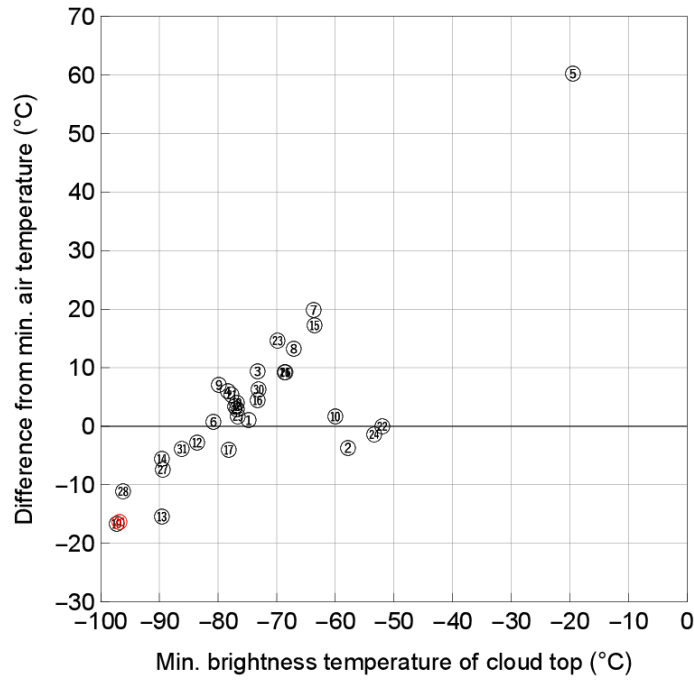


図 7 大規模噴煙の最低輝度温度. 横軸は Himawari-8/9 IR (10.4 μm) により一連の噴火活動中に観測された雲頂輝度温度の $\min T_{\text{BB}}$. 縦軸はそのときの気温の鉛直プロファイルの $\min T_{\text{a}}$ からの差. 丸数字は表 1 の事例番号に対応 (20 は事例 No. 20 を示す).

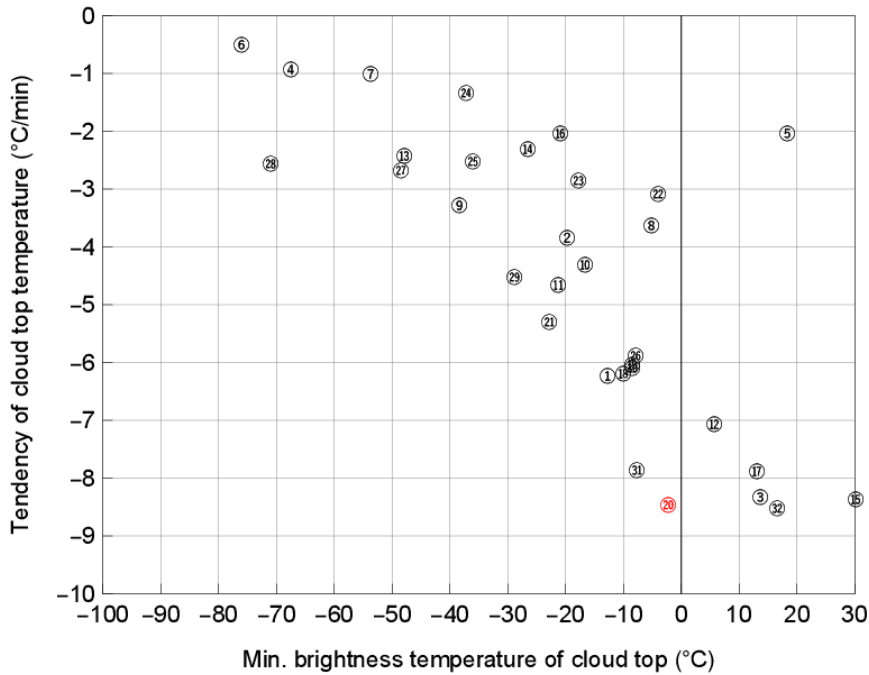


図 8 大規模噴煙の輝度温度の最大時間低下率. 縦軸は Himawari-8/9 IR (10.4 μm) により一連の噴火活動中に雲頂輝度温度の最大低下量が解析されたときの時間変化率 $\Delta T_{\text{BB}}/\Delta t$. 横軸は温度低下前の時刻に観測された最低輝度温度 (これら $\min T_{\text{BB}}(t - \Delta t)$ の値は, 図 7 に示した $\min T_{\text{BB}}$ とは一般に異なることに注意). 丸数字は図 7 に同じ.

大規模噴煙の最低輝度温度

表 1 Himawari 観測領域内の噴煙高度 50000 ft 以上の VAA 入電事例一覧 (2015 年 7 月～2025 年 6 月)

Case No. ^a	Observation time ^b [UTC]	Volcano	Country	Location	Elevation [m asl]	Cloud top height ^b [ft]	Information source
1	2015/07/31 02:15	Manam	Papua New Guinea	4.08°S 145.037°E	1807	65000	Darwin VAAC
2	2017/12/20 04:10	Bezymianny	Russia	55.972°N 160.595°E	2882	50000	Tokyo VAAC
3	2018/02/19 02:30 02:55	Sinabung	Indonesia	3.17°N 98.392°E	2460	50000 →55000	Darwin VAAC
4	2018/04/06 10:10	"	"	"	"	50000	"
5	2018/05/11 01:45	Merapi	"	7.54°S 110.446°E	2910	50000	"
6	2018/12/23 00:25	Krakatau	"	6.102°S 105.423°E	813 ^c	55000	"
7	2019/01/02 00:40	"	"	"	"	50000	"
8	2019/01/07 21:10	Manam	Papua New Guinea	4.08°S 145.037°E	1807	50000	"
9	2019/01/24 16:00	"	"	"	"	55000	"
10	2019/03/15 17:40	Bezymianny	Russia	55.972°N 160.595°E	2882	50000	Tokyo VAAC
11	2019/06/09 10:05	Sinabung	Indonesia	3.17°N 98.392°E	2460	55000	Darwin VAAC
12	2019/06/26 05:35 07:30	Ulawun	Papua New Guinea	5.05°S 151.33°E	2334	50000 →63000	"
13	2019/08/03 09:53 10:15	"	"	"	"	50000 →63000	"
14	2020/01/12 08:20	Taal	Philippines	14.002°N 120.993°E	311	55000	Tokyo VAAC
15	2020/11/29 02:50 03:20	Lewotolo	Indonesia	8.272°S 123.505°E	1423	50000 →63000	Darwin VAAC
16	2020/11/30 20:00	Semeru	"	8.108°S 112.922°E	3657	50000	"
17	2021/08/12 23:50	FOB	Japan (Ogasawara)	24.285°N 141.481°E	-29	54000	Tokyo VAAC
18	2021/10/19 22:40	Manam	Papua New Guinea	4.08°S 145.037°E	1807	50000	Darwin VAAC
19	2022/01/13 17:42	HTHH	Tonga	20.536°S 175.382°W	114	55000	Wellington VAAC
20	2022/01/15 04:39 14:43	"	"	"	"	52000 →63000	"

験震時報第 89 卷
表 1 (つづき)

Case No. ^a	Observation time ^b [UTC]		Volcano	Country	Location		Elevation [m asl]	Cloud top height ^b [ft]	Information source
21	2022/03/08	09:50	Manam	Papua New Guinea	4.08°S	145.037°E	1807	50000	Darwin VAAC
22	2022/05/28	08:40	Bezymianny	Russia	55.972°N	160.595°E	2882	50000	Tokyo VAAC
23	2022/12/04	02:30	Semeru	Indonesia	8.108°S	112.922°E	3657	50000	Darwin VAAC
24	2023/04/10	13:40	Sheveluch	Russia	56.653°N	161.36°E	3283	52000	Tokyo VAAC
25	2023/11/20	06:30	Ulawun	Papua New Guinea	5.05°S	151.33°E	2334	50000	Darwin VAAC
		18:50						→60000	
26	2023/12/03	08:40	Marapi	Indonesia	0.38°S	100.474°E	2885	50000	"
27	2024/04/17	12:00	Ruang	"	2.3°N	125.37°E	725	50000	"
		12:20						→63000	
28	2024/04/29	19:00	"	"	"	"	"	50000	"
		19:20						→63000	
29	2024/11/07	03:30	Lewotobi	"	8.542°S	122.775°E	1703	50000	"
		04:50						→55000	
30	2024/11/08	21:10	"	"	"	"	"	50000	"
	2024/11/09	01:20						→52000	
31	2025/03/20	15:40	"	"	"	"	"	53000	"
32	2025/06/17	09:45	"	"	"	"	"	53000	"

a: Nos. 1-25 based on Kuri et al. (2024)

b: The values reported by VAA (not eruption-start time/post hoc analysis height)

c: As of 2018