

遠望カメラ画像による噴煙高度の把握とマグマ噴出率の推定

—2011 年 3 月 13 日霧島山新燃岳噴火の事例—

Eruption column height and magma discharge rate as inferred from camera images
—The eruption of the Shinmoedake Volcano on March 13, 2011—

鬼澤真也¹・新堀敏基¹・福井敬一²

Shin'ya ONIZAWA¹, Toshiki SHIMBORI¹ and Keiichi FUKUI²

(Received October 7, 2012; Accepted September 5, 2013)

1 はじめに

噴煙高度は火口からのマグマ噴出率を反映すると考えられ (例えば, Sparks et al., 1997), 噴火規模を把握する上で, さらにはその後の火山灰の拡散, 降灰予測の初期値を与える上でも重要な観測量である.

2011 年 1 月 26 日, 27 日に発生した新燃岳の準プリニー式噴火では, 遠望監視カメラが新燃岳から比較的近距离に設置されていたこと, 火口周辺を監視するために望遠に設定されていたことから噴煙の全容を捉えることが出来なかった. これを受けてより遠方の溝辺 (鹿児島空港) にカメラが設置され, その後の好天時の噴火活動では上方にフレームアウトすることなく噴煙の連続画像が取得されている.

ここでは, 溝辺にカメラを設置以降, 晴天下で最も噴煙高度の大きかった 3 月 13 日噴火の事例を扱い, まず遠望監視カメラ画像を時系列順に並べ噴火活動の概要を記述する. 続いて, 噴煙高度の時間変化を追跡し, マグマ噴出率, 総噴出量の推定を行う.

2 遠望観測

2011 年噴火前から, 新燃岳南 7.6 km の猪子石に気象庁遠望観測カメラ (新燃岳用, 御鉢用の 2 台), 大浪池に鹿児島県始良・伊佐地域振興局のカメラが設置されていた (図 1). 1 月 26 日, 27 日の準プリニー式噴火を受けて, 猪子石カメラのうち御鉢用の 1 台は, 御鉢から新燃岳も視野内に収めた広角設定

に変更された. さらに, 猪子石のカメラにてフレームアウトした噴煙を捉えることを目的として, 新燃岳から 20 km 南西に離れた溝辺 (鹿児島空港) に超高感度カメラが 1 月 30 日に設置された. このカメラは, 空港ドップラーレーダーの補修用テラスに設置されている.

ここでは, 噴火活動の概要と噴煙の巨視的な情報を抽出することを目的とし, 時刻管理がなされ, 広角にフレーミングされ御鉢用猪子石カメラ (以下, 猪子石 (御鉢) カメラ) および溝辺に新設されたカメラ (以下, 溝辺カメラ) で得られた画像を用いる. その他のカメラによる情報は噴火活動把握の上で, 補助的に用いる.

猪子石 (御鉢) では Panasonic 社製高感度カメラ (WV-E850) を, 溝辺では日本電気株式会社製超高感度デジタルカメラ (NC-R550-CU) を使用している. またレンズはともに Canon 社製 1/2" 型 3CCD カメラ対応 21 倍ズームレンズである. 1/2" 型 CCD の画面寸法は 6.4mm×4.8mm であり, ズームレンズを最大広角時の焦点距離 7mm に設定した際, レンズに歪がない理想的な場合の画角は 49.1°×37.8°となる. メーカーによれば, 焦点距離 7 mm とした際, レンズの歪曲収差は樽型となり, TV ディストーション表示にて -0.9% 以内である.

映像は約 2 秒毎にスキャンされ, 640×480pixel の JPEG 形式の画像ファイルで保存されている. なお,

¹ 気象研究所地震火山研究部, Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute

² 気象研究所地震火山研究部, Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute
現所属: 地磁気観測所, Kakioka Magnetic Observatory

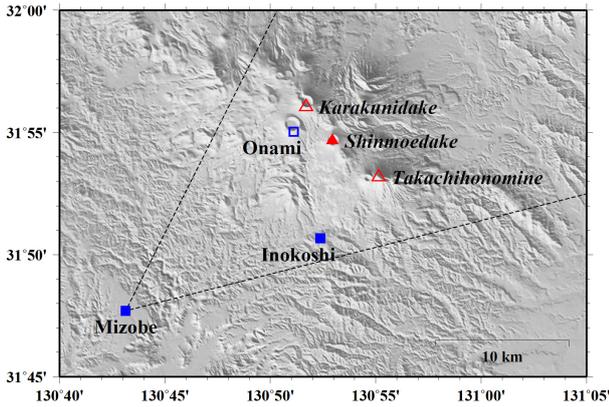


図 1 霧島火山群周辺の地形と遠望監視カメラ設置位置. ▲: 新燃岳, △: 韓国岳および高千穂峰. ■: 猪子石および溝辺カメラ. □: 鹿児島県大浪カメラ. 破線: 溝辺カメラの視野角.

溝辺カメラについては、回線断や画像の伝送遅延により画像が更新されない場合がある.

3 噴煙動態

3.1 噴火噴煙の概要

猪子石（御鉢）カメラ、溝辺カメラで得られた噴煙画像を時系列順に並べ本報文の末尾に掲載する（図 7）. 掲載する画像の間隔は、噴火の初期は約 10 秒とし、その後徐々に延ばした. 基準となる時刻は図の左端に記載している. 画像保存間隔はどちらのカメラでも約 2 秒であるが、必ずしも一定ではないため、画像に映しこまれた時刻が基準時刻に最も近い画像を選択している. なお、溝辺カメラについては、画像が更新されない場合は灰色のフレームのみを掲載した.

鹿児島県の大浪カメラでは 17 時 45 分 44 秒に、気象庁の猪子石（新燃）カメラでは同 46 秒に噴火の開始を確認できる. 溝辺カメラでは噴火開始から時間が経過するにつれて噴煙高度を上げていくプリュームを複数確認することができ、これらは噴煙の上昇に伴い画像上右側に傾いていく. ここではこのようなプリュームおよびその後追跡出来る噴煙を便宜上 P1~P7 と記述する.

噴火開始直後に P1 の上昇があり、17 時 46 分 30 秒くらいからこれを追い越し速度を減しながら上昇する P2 を確認できる. P2 は高度増加、上昇速度減少に従い、徐々に南東方向へ折れ曲がる. 17 時 47

分 50 秒頃に P2 を追い越して P3 が上昇していく. 溝辺カメラからは 17 時 49 分 00 秒頃からさらに P3 を追い越す P4 を確認できるが、猪子石（御鉢）カメラからはこの時点ですでにフレームアウトし、これ以降最高高度はわからない. P2 は溝辺カメラの画像では 17 時 48 分 30 秒くらいから、噴煙の右側にこぶ状に認識でき、17 時 50 分頃には P4 は P2 に比べ 2 倍程度高度が大きいことがわかる. さらに 17 時 50 分 30 秒頃には上昇速度が低下し南東側へ流され始めた P4 に続き、P5 が上昇してくる. この後、17 時 51 分 10 秒から同 40 秒まで溝辺カメラは回線断のため画像は更新されない. 画像更新が回復した同 50 秒以降、P4 の高度は見掛け上低下し始めており、この間に最高点に達したと考えられる. 一方、P5 も 17 時 52 分頃に最高点に達し、その後見掛け高度を下げ始めている. 画像からは P4 と P5 とはほぼ同程度の高度であったと推定される.

17 時 52 分頃に P4、P5 が最高高度に達した後、噴煙は全体として南東方向へ倒れ込むように移動していく. これ以降、画像右側からフレームアウトするまで P5 が噴煙全体のうちの見掛け上の最高高度を維持しており、この後、P4、P5 に匹敵する噴煙は上がっていないと考えられる. 南東方向への移動速度は P2 よりも高度の大きい P4、P5 に伴う噴煙の方が大きく、風速あるいは風向の違いによると思われる.

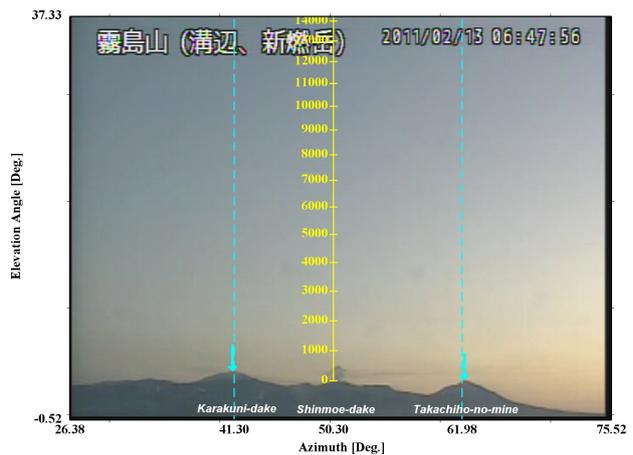


図 2 溝辺カメラから見た霧島火山群と視野角. 画像中心のスケールは新燃岳の火口縁上高度. 矢印: 画像から読み取った韓国岳および高千穂峰山頂. 破線: カメラおよび韓国岳、高千穂峰山頂の座標から計算される山頂方位.

P5 の後、最高点を追跡出来るプリュームは 17 時 55 分頃から現れるが(P6), すでに高度は P2 程度まで大きく下がっている. P6 に続き, 17 時 57 分頃から P7 を追跡出来るが, P6 よりさらに高度は下がっている.

18 時を過ぎると, 猪子石 (御鉢) カメラからは拡散する火山灰に遮られて火口周辺の状況を把握できない. また, 溝辺カメラの画像でも噴煙は拡散によりコントラストが無くなっており, 追跡出来るプリュームは無い. ただし, 溝辺カメラからはこれ以前のように火口上に立ち上がる噴煙は確認できず, 少なくとも P1~P7 に匹敵する噴出はしていないと考えられる. なお, これ以降火口の状況を確認できるのは 19 時台に入ってから猪子石 (御鉢) カメラからであり, すでに火山灰の放出は停止していると思われる.

3.2 噴煙高度

これらの画像から噴煙高度の時間変化を把握するために, P1 から P7 の最高点の軌跡を読み取る. これには噴火中, 上方にフレームアウトすることのない溝辺カメラの画像を使用した.

画像の視野角の決定には, まず, 1) レンズの歪はなく画角は最も広角時 (焦点距離 7 mm) に相当する $49.1^\circ \times 37.8^\circ$ であること, 2) 画像の整準はとれていること, という仮定を置いた. さらに, 画像上で特徴的であり, かつカメラから見た方位角, 仰角が既知である点として高千穂峰および韓国岳の山頂を選択し, これらに合わせるように画像端の方位角, 仰角を決定した. 決定された画像左端, 右端の方位角はそれぞれ 26.38° , 75.52° , 下端, 上端の仰角はそれぞれ -0.52° , 37.33° である.

図 2 は視野角決定のために用いた画像の例である. 矢印の先端が画像から読み取った高千穂峰および韓国岳山頂位置であり, 水平方向の画角 49.1° を按分して得られる山頂 2 点間の角度は 21.04° であった. 一方, 破線はカメラとそれぞれの山頂位置の座標から決定される方位角で, 山頂間がなす角は 20.68° である. これらの差は 1.7 % であり, レンズの歪等によるものと思われる.

海拔高度 H への変換はカメラから対象物までの水平距離 r と仰角 θ から決定する.

$$H = r \tan \theta + H^{camera} \quad (1)$$

ここで H^{camera} は溝辺カメラ設置地点 (鹿児島空港のレーダータワー) の標高で 310.7 m を用いた. さらに, 海拔高度から火口縁上の高度へ換算した. 図 2 中に示したスケールは対象物が火口の真上にあるとした場合の, 火口縁上からの高度である. この画角においておよそ 14,000 m まで測定することができる.

噴煙移動を把握するために, P1 から P7 について画像上認識できる最高点の位置を約 10 秒間隔で読み取った. 図 3 には見掛け上最も噴煙高度が高かった 17 時 52 分の画像の上に, 連続画像から読み取ったこれらの軌跡を重ね合わせたものである. これらの軌跡から, 噴煙は火口からの噴出後は上方へ向かっていたものが, 途中から右側に折れ曲がるのが確認でき, 上昇速度の低下により相対的に風の影響が大きくなることがうかがえる. また, 風により流される P4, P5 の噴煙は画像上右側に行くにつれ, 見掛け上高度を下げている.

ここで注意しなければならないことは, 画像上読み取った座標から高度に変換する際には, カメラから対象物までの水平距離 r に依存することである ((1)式). 風に流される噴煙がカメラに近づく成分を持つ場合, 画像上では見掛け上高度を上げるように, 逆に遠ざかる成分を持つ場合は下げるように見える. 当日の風向や気象レーダーで捉えられた噴煙エコー, 気象衛星画像からは, 噴火後, 噴煙は新燃岳から東南東方向へ流されたと考えられ (新堀・他, 2013), こ

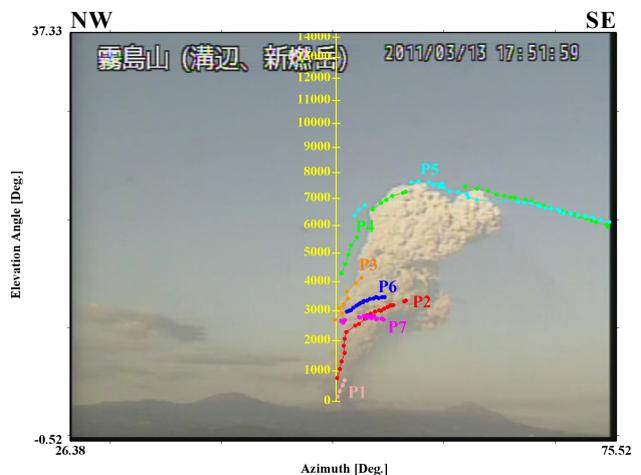


図 3 3 月 13 日噴火の最高高度到達時の噴煙と P1~P7 の軌跡.

の場合、溝辺カメラから見て距離が遠くなるセンスになる。

図 4 は、各プリューム高度の時間変化であり、以下の 2 つの場合について示した。すなわち、Case 1：噴煙までの水平距離を新燃岳までの距離で固定した場合（図 4 の●）、および Case 2：噴煙は火口から東南東（方位角 103°）方向へ流されたとし、この噴煙流向と画像上でのカメラから見た方位から水平距離を算出した場合（図 4 の○）である。なお、103°の値は 17 時 56 分の鹿児島空港レーダーによる噴煙エコーを参照した。

噴煙高度の時間変化の大局は高度の高かった P4、P5 を除き、Case 1 と Case 2 とで大きく変わらない。17 時 45 分に開始した噴火の初期は、P1 から P4 にかけて、時間の経過とともに噴煙が成長していく過程が見られ、同 49 分を過ぎると P4 あるいは P5 による噴煙が最高高度となり、活動のクライマックスとなる。17 時 55 分を過ぎると新しく上昇してくるプリュームの高度は大きく下がり、P5 から P6、P7 へと噴煙活動は衰退していく。

Case 1 では、各プリュームの最高点は、図 3 の画像上で見られる最高点と一致する。噴火全期間を通しての最高到達高度は 17 時 52 分の P5 による火口縁上 7,600 m である。ただし、前述のとおり、噴煙は遠ざかる方向に流されていると推定され、この値は実

際よりも過小評価になると考えられる。一方、Case 2 では、カメラから見た方位が火口方向から大きくなるほど水平距離が大きくなるため、特に画像の右端まで追跡出来た P4、P5 では時間とともに Case 1 と比べ差が大きくなる。今回用いた噴煙流向の場合、画像上での最高高度となった 17 時 52 分以降も噴煙高度を上げ続ける結果となった。実際には、火口からの噴煙流向の設定によって噴煙高度は敏感に変化してしまう。このため、噴煙が上昇し続けているのは流向の設定が充分でないための見掛けのもの可能性が考えられる。また、ここでは図示しないが、水平方向への移動速度は画像の右方向へ移るにつれ増加する結果が得られた。これはレンズ歪曲収差の未補正による可能性があり、噴煙高度の見積もりへも影響を与えているかもしれない。

4 議論

4.1 噴煙高度の比較

遠望カメラによる噴煙高度の把握は、火口上に限れば、噴煙が上方にフレームアウトしないカメラを利用することにより比較的容易に行うことができる。今回対象とした 3 月 13 日 17 時 45 分の噴火は、遠望観測による噴煙高度は火口縁上 4,000 m と報告されたが（気象庁, 2011）、本報にて溝辺カメラを用い解

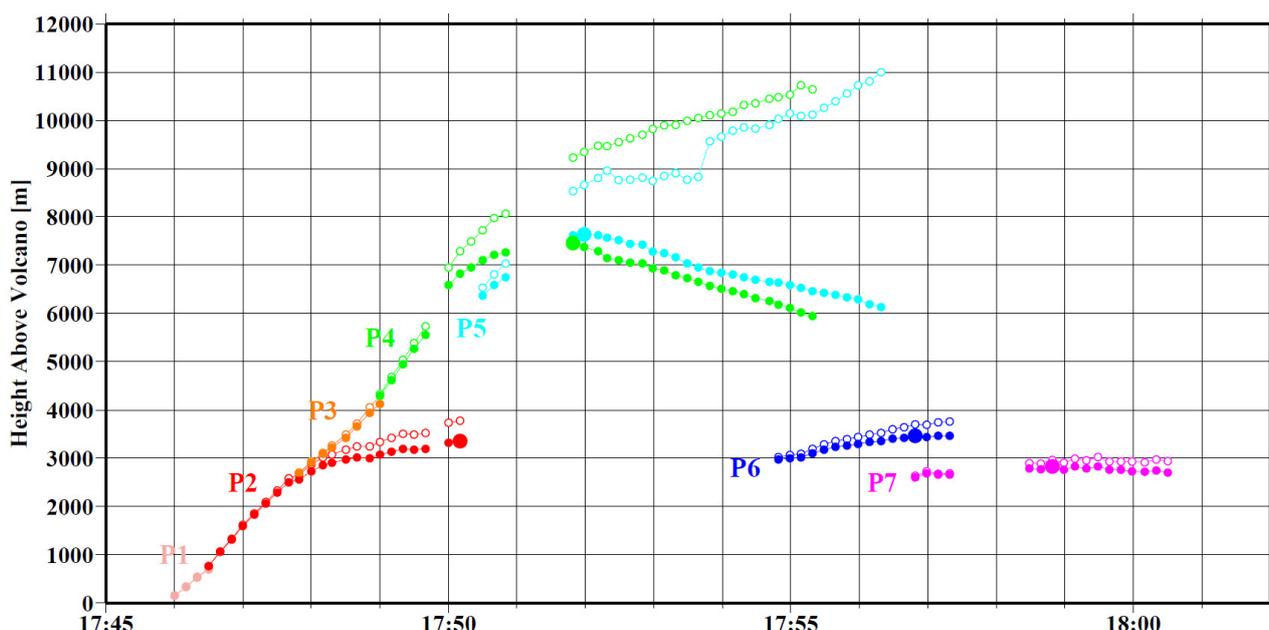


図 4 各プリューム高度の時間変化。●：Case 1，○：Case 2。Case 1 での大きい●は、各プリュームの見掛け上の最高点。

析した結果、噴火開始から約7分後の17時52分に少なくとも火口縁上7,600 mに達したと推定され、実際にはこれより高かった可能性がある。遠望カメラと同様に可視の情報として、東京航空路火山灰情報センター (VAAC) によると、航空機から17時51分に海拔6,100 m (火口縁上4,700 m)、18時20分に海拔11,000 m (火口縁上9,600 m)の火山灰雲が観測されたと報告されており (新堀・他, 2013)、やはり火口縁上4,000 mよりは高かったであろう。なお報告された時刻から、前者は噴煙柱が成長する過程での高度、後者はすでに風に流されてからの高度と推定される。

遠望カメラによる監視は、噴火発生から噴煙上昇、拡散に至るまで、視覚で連続的に把握できる反面、利用は噴煙が見える天候、時間帯に限られる、画角を超える大規模な噴煙には対応できない、という欠点がある。このため、気象レーダーエコーや衛星画像による噴煙の検出を積極的に進められるとともに、地震動、空振動と噴煙高度、噴出率との相関を求める試みもなされている (高木・他, 2013)。本噴火の噴煙高度に関して、気象レーダーによる噴煙エコー頂高度、気象衛星画像からの推定値が新堀・他 (2013)にまとめられている。種子島・福岡合成レーダーでは17時57分に、新燃岳東南東10.3 kmにて海拔7,600 m (火口縁上6,200 m)、鹿児島空港気象ドップラーレーダーでは17時56分に新燃岳東南東11.1~12.0 kmで海拔8,800 m (火口縁上7,400 m)で噴煙エコーが捉えられた。また、気象衛星赤外面像の輝度温度から18時03分に海拔7,100 m (火口縁上5,700 m)、火山灰雲の移動速度と風速との対応から海拔8,300 m (火口縁上6,900 m)と推定された。どれも可視による推定値、報告値と較べて低めの傾向があるようであり、これらが噴煙のどのような物理化学量を反映しているのか興味深い。今後、これらの観測手法を積極的に活用していく上でも、可視、噴煙エコー、赤外面像を対比出来る事例を増やしていくべきであろう。

4.2 マグマ噴出率の推定

噴煙高度はマグマ噴出率という噴火現象を記述する上で最も本質的なパラメータを反映する。噴煙高度からのマグマ噴出率の推定は、降灰予測 (新堀・他, 2010) で用いられているようにプリュームやサ

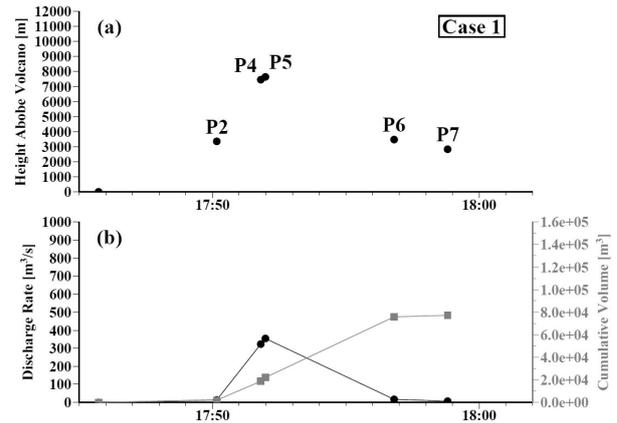


図5 Case 1での各プリュームの最高高度とそこから推定される噴出率、積算噴出量。(a)各プリュームの最高高度[m]。(b)最高高度から換算される体積噴出率および積算噴出量。●：体積噴出率[m³/s]。■：積算噴出量[m³]。

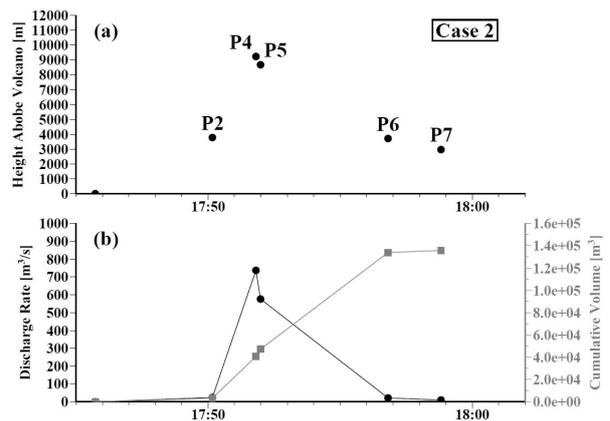


図6 Case 2での各プリュームの最高高度とそこから推定される噴出率、積算噴出量。その他の説明は図5と同じ。

ーマルに関するMorton et al. (1956)の理論式にてエントレインメント定数を仮定して利用、あるいはSparks et al. (1997)の噴煙柱高度とマグマ噴出率との経験式を利用することになるだろう。後者では、噴煙柱高度 H [km]と溶岩換算での平均マグマ噴出率 Q [m³/s]との間に、以下の経験式を導いている。

$$H = 1.67Q^{0.259} \quad (2)$$

ここでは、簡単に個々のプリュームについて観測された噴煙高度から(2)式の関係を用い噴出率を求め、

これらを積分することにより総噴出量の推定を行う。

図 5 および図 6 には、それぞれ Case1 および Case 2 の場合のプルーム最高高度(a), および(2)式を用いて換算される噴出率, 積算噴出量(b)を示す。ここで、噴煙高度から直接噴出率を求められる時刻以外では、噴出率が線形に変化するとの仮定の下で積算噴出量を求めた。Case 2 に関しては、噴煙高度が時間とともに大きくなり、最高到達点を定義できない。3.2 で述べたように噴煙が上昇し続けているのは流向の設定が充分でないためで見掛けのものの可能性があるため、ここでは Case 1 で最高高度と認められた時刻の高度を採用した。この場合噴火全体を通しての最高高度は P4 の火口縁上 9,200 m である。なお、噴煙上昇が継続しているが後続のプルームのために最高点まで計測できない P1 と P3 とは省いている。

噴出率は噴煙高度の約 4 乗で効いてくるため (Morton et al., 1956; Sparks et al., 1997), 総噴出量のうちのほとんどは、P4, P5 の時期に依存している。最高噴出率は、Case 1 が $354 \text{ m}^3/\text{s}$, Case 2 が $736 \text{ m}^3/\text{s}$, 総噴出量はそれぞれ $7.7 \times 10^4 \text{ m}^3$, $1.36 \times 10^5 \text{ m}^3$ と見積もられた。Case 2 の総噴出量は Case 1 の 1.76 倍である。なお、18 時以降については火口の状況が見えないことと、追跡出来る噴煙がないために同様の見積もりが出来ないが、画像から認められる噴煙高度は P7 の最高高度よりも低い。多めに見積もって、仮に P7 の最高高度で 30 分間継続していたとしてもその噴出量はそれ以前の積算噴出量の 18 %あるいは 12 %にすぎない。

この噴火による噴出量として、噴出物調査から産業技術総合研究所・アジア航測(株)(2011)では速報値約 $2 \times 10^5 \text{ ton}$, 東大地震研究所・防災科学技術研究所(2011)では概算値 $1 \times 10^6 \text{ ton}$ と報告している。噴煙高度から推定した噴出量は、溶岩の密度を $2,700 \text{ kg/m}^3$ と仮定して質量に換算した場合、Case 1 では $2.1 \times 10^5 \text{ ton}$, Case 2 では $3.7 \times 10^5 \text{ ton}$ となる。すなわち Case 1 では産業技術総合研究所・アジア航測(株)(2011)の速報値にほぼ等しく、Case2 ではその 1.76 倍で、両噴出物調査による推定値の間に収まった。

本報で扱った噴火事例は、噴煙が最高高度を維持した期間は 5 分未満と短く、Sparks et al. (1997)による経験式を適用可能か必ずしも自明ではない。またこの経験式自体にも 1 桁近い不確定性を含んでいると思われる。しかし、今後は堆積物調査を待たずによ

り早期に噴火規模を把握することが求められていくと思われ、このために噴煙高度の情報を積極的に利用していくことになるだろう。この観点からも噴煙高度と噴出率との関係の精度向上が求められる。

5 まとめ

2011 年 3 月 13 日噴火について、遠望カメラによる画像から噴煙高度および噴出率, 総噴出量の推定を行った。噴煙の最高高度は少なく見積もって火口縁上 7,600 m で、実際にはこれ以上高かったと推定される。さらに噴煙高度から Sparks et al. (1997)の経験式の従い噴出率および総噴出量を見積もったところ $2.1 - 3.7 \times 10^5 \text{ ton}$ と推定された。これは噴出物調査から見積もられた総噴出量と矛盾のないものである。

謝辞

福岡管区気象台火山監視・情報センターからは遠望カメラによる画像のご提供を頂きました。また、地震火山部火山課の晴山 智調査官には遠望観測カメラの設置状況や仕様についてご教授頂きました。査読者である地震火山部火山課の小野幸治氏、編集委員会の内藤宏人氏、坂井孝行氏、長岡 優氏には原稿を改善する上で有益なご助言を頂きました。ここに記して感謝致します。

文献

- 気象庁 (2011): 日本の主な火山活動, 平成 23 年 3 月, 地震・火山月報 (防災編), 41-54.
- 産業技術総合研究所・アジア航測(株) (2011): 新燃岳 2011 年 1 月 26 日以降のテフラ噴出量, 第 120 回火山噴火予知連絡会資料, 64-67.
- 新堀敏基・相川百合・福井敬一・橋本明弘・清野直子・山里平 (2010): 火山灰移流拡散モデルによる量的降灰予測—2009 年浅間山噴火の事例—, 気象研究所研究報告, **61**, 13-29.
- 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.
- 高木朗充・新堀敏基・山本哲也・白土正明・平 祐太郎・加藤幸司・福井敬一 (2013): 物理観測による新燃岳の噴火規模の即時的な推定の試み, 験震時報, **77**,

111-118.

東京大学地震研究所・防災科学技術研究所 (2011):
霧島山（新燃岳）のブルカノ式噴火ステージの噴
出量，火口内堆積量および噴出物の時間変化，第
120 回火山噴火予知連絡会資料, 59.

Morton, B. R., G. Taylor and J. S. Turner (1956): Turbulent
gravitational convection from maintained and
instantaneous sources, Proc. Roy. Soc. (London), A234,
1-23.

Sparks, R.S., M.I. Bursik, S.N. Carey, J.S. Gilbert, L.S.
Glaze, H. Sigurdsson, and A.W. Woods, (1997):
Volcanic Plumes, John Wiley & Sons, 574pp.

図 7 (次ページ) 3 月 13 日噴火画像の時系列. 17
時 45 分 30 秒から 20 時 00 分 00 秒まで. 中央:
猪子石 (御鉢) カメラ. 右: 溝辺カメラ. 溝辺カ
メラの視野角は図 1 および図 2 参照.

(編集担当 坂井孝行・長岡 優)

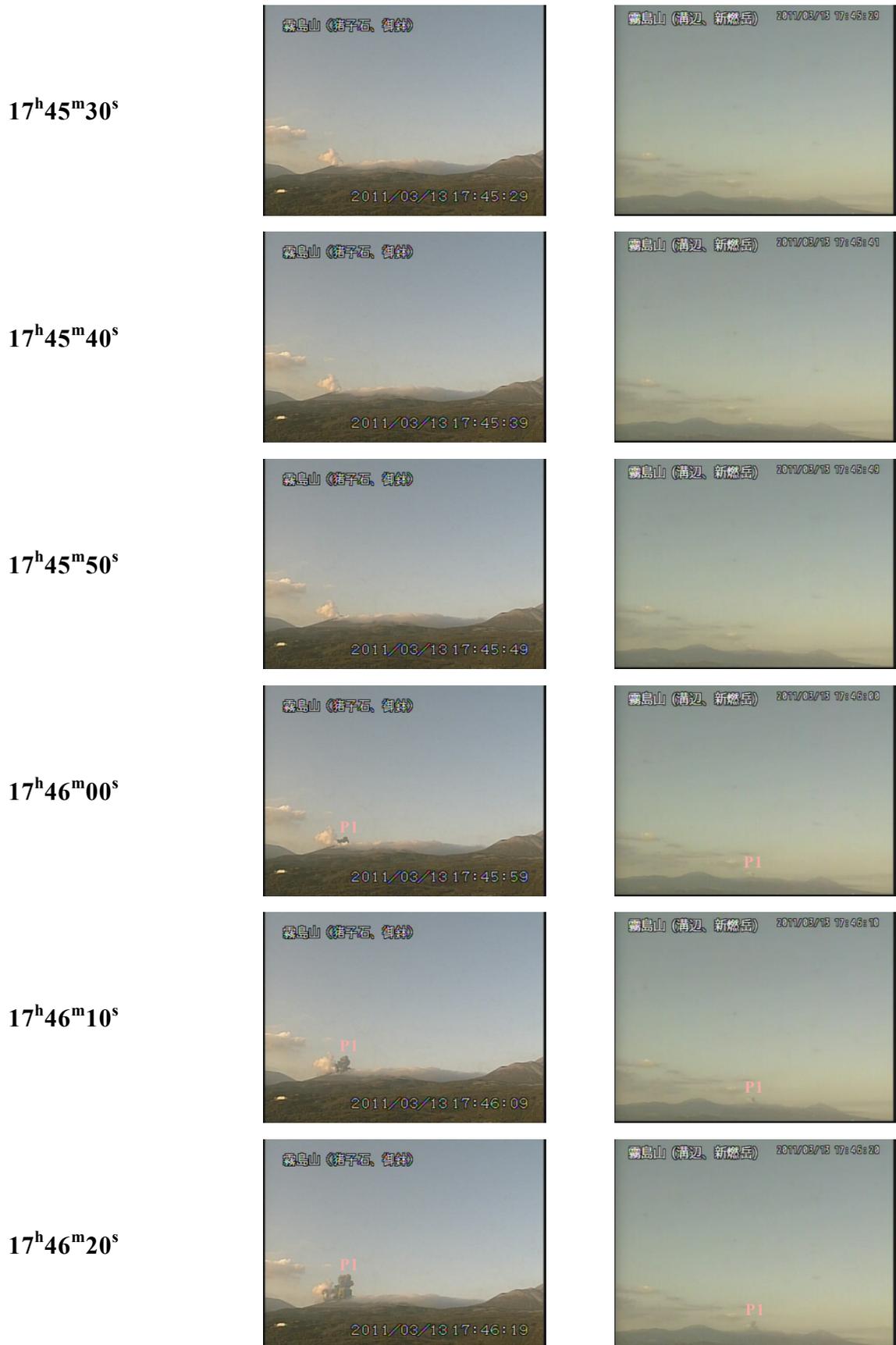


図 7 17 時 45 分 30 秒から 17 時 46 分 20 秒 (10 秒間隔).



図 7 つづき. 17 時 46 分 30 秒から 17 時 47 分 20 秒 (10 秒間隔).

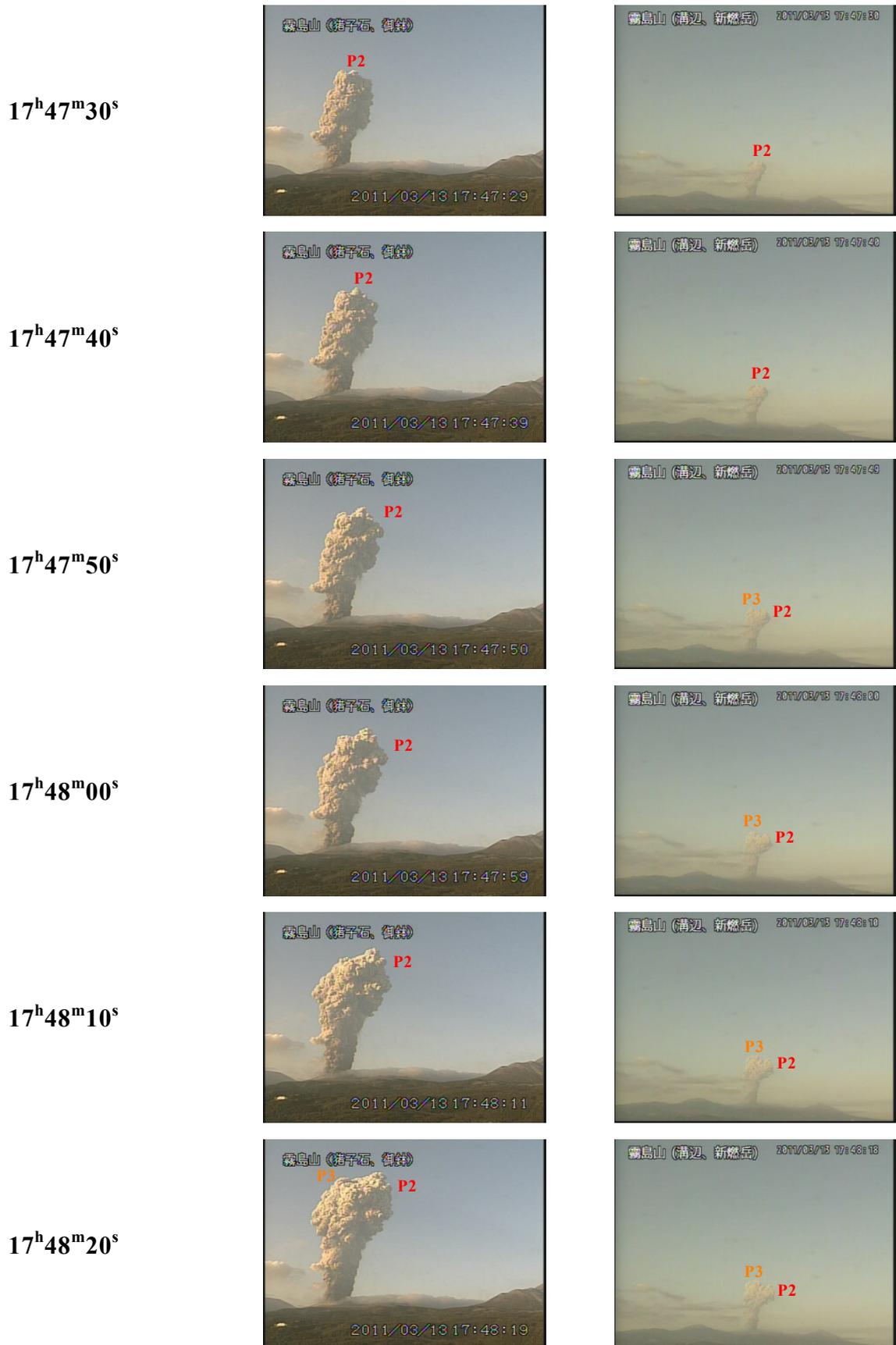


図 7 つづき. 17 時 47 分 30 秒から 17 時 48 分 20 秒 (10 秒間隔).

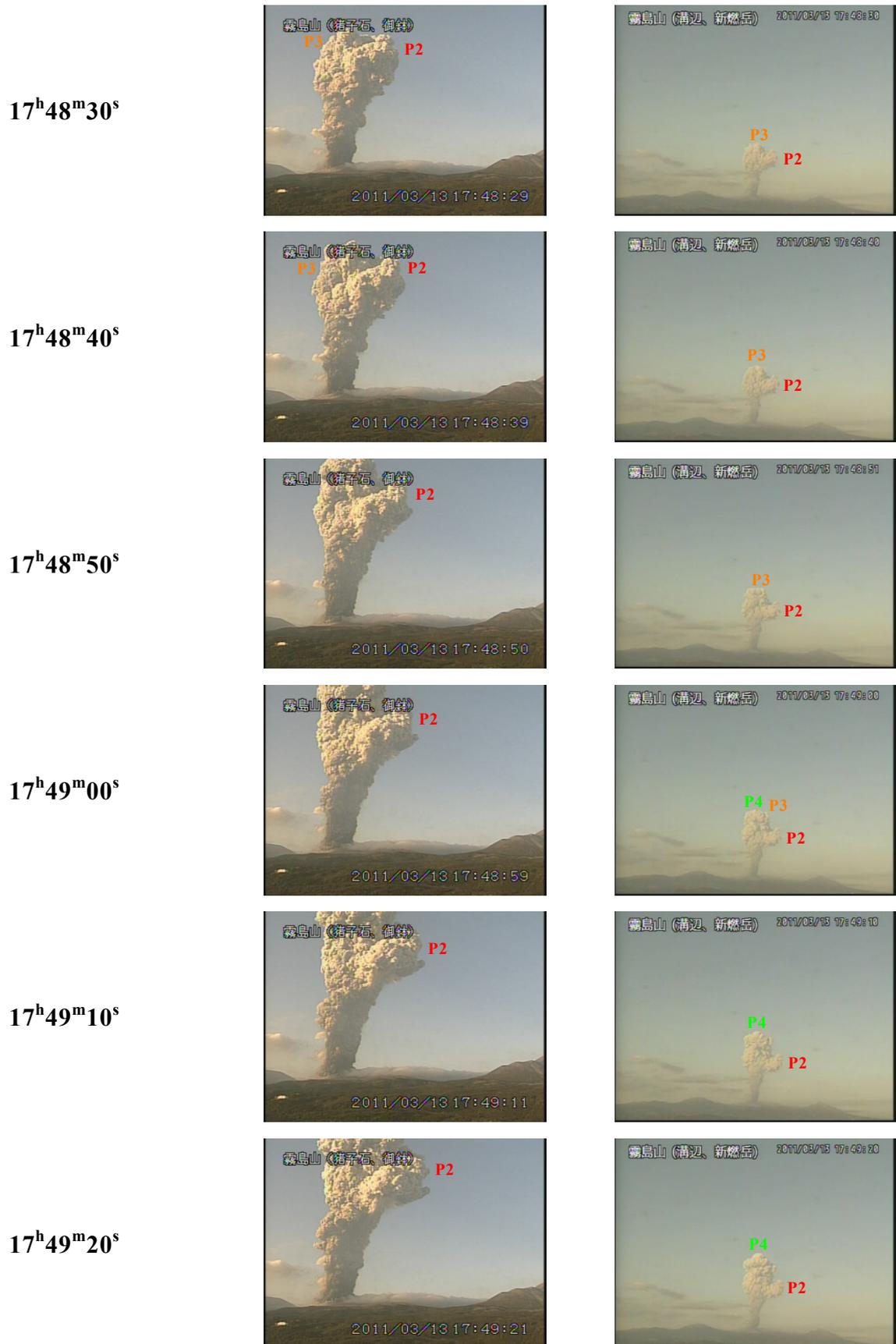


図7つづき. 17時48分30秒から17時49分20秒(10秒間隔).

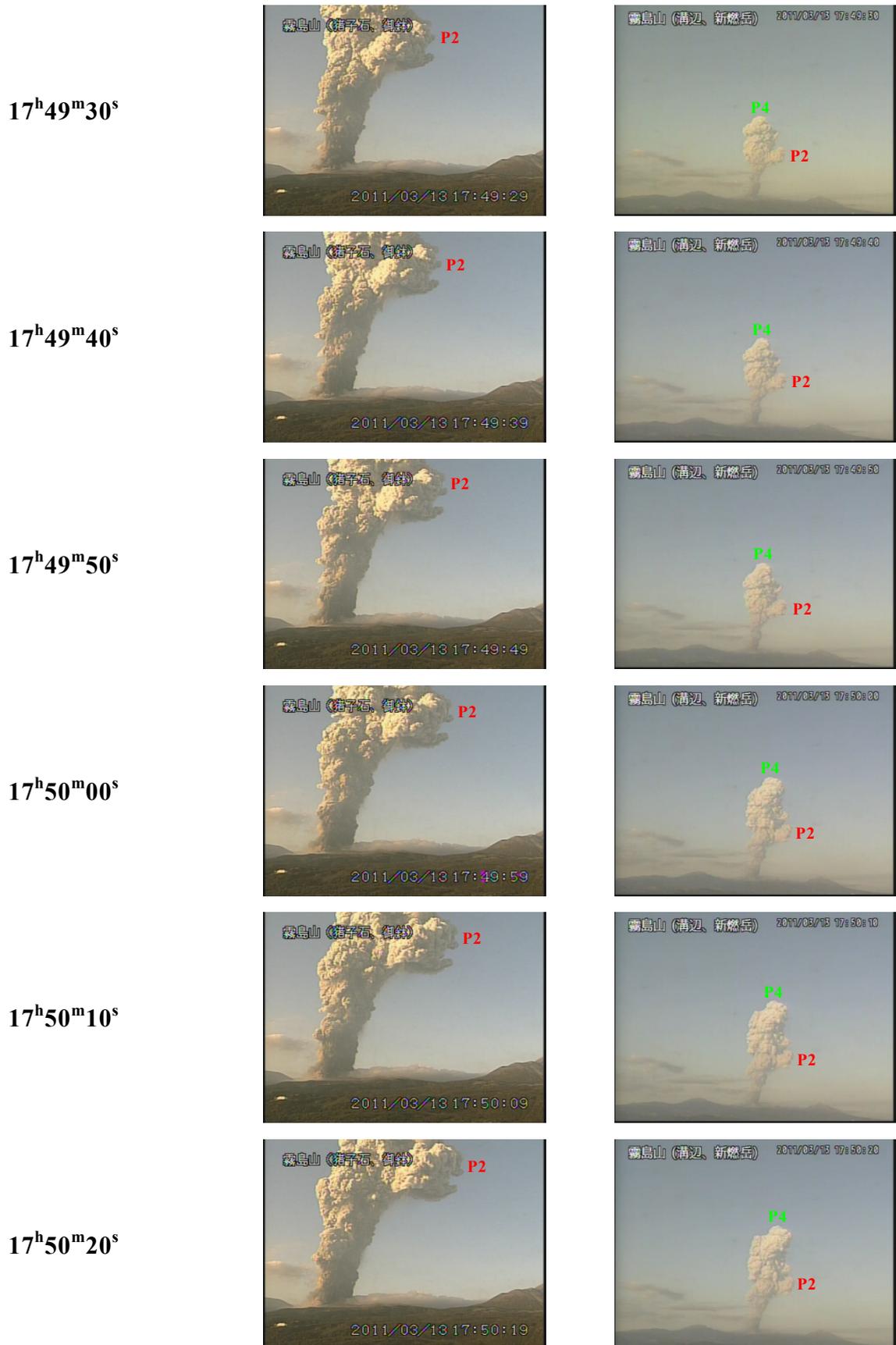


図 7 つづき. 17 時 49 分 30 秒から 17 時 50 分 20 秒 (10 秒間隔).

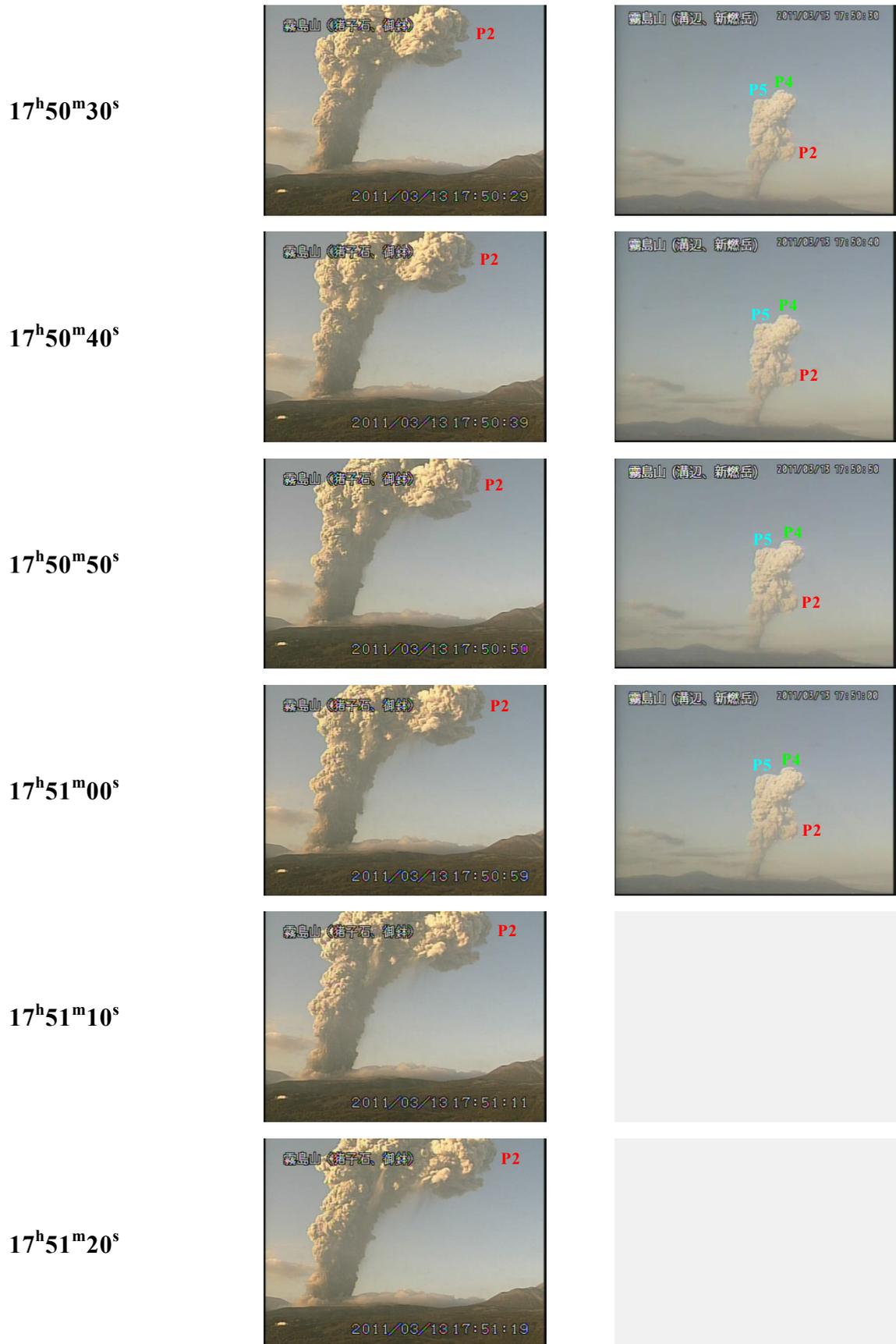
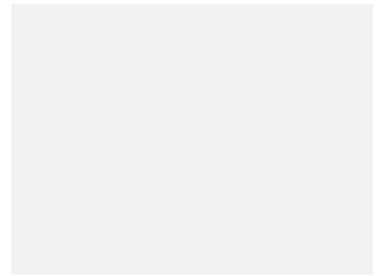
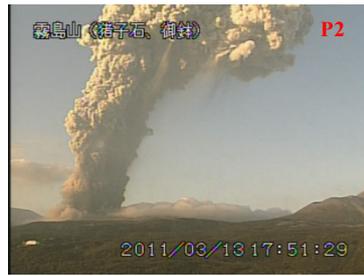
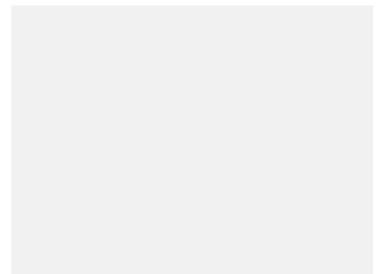


図 7 つづき. 17 時 50 分 30 秒から 17 時 51 分 20 秒 (10 秒間隔).

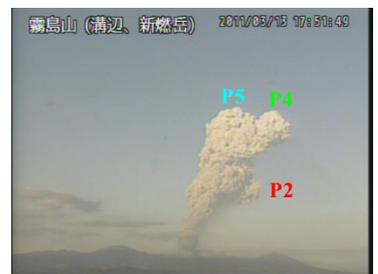
17^h51^m30^s



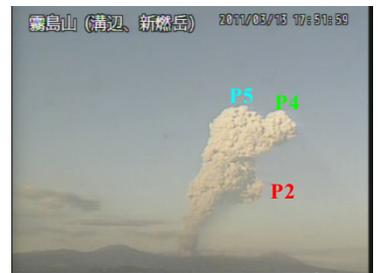
17^h51^m40^s



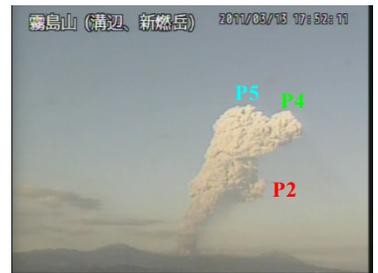
17^h51^m50^s



17^h52^m00^s



17^h52^m10^s



17^h52^m20^s

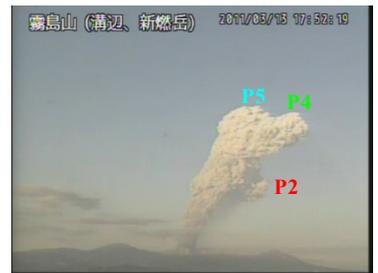
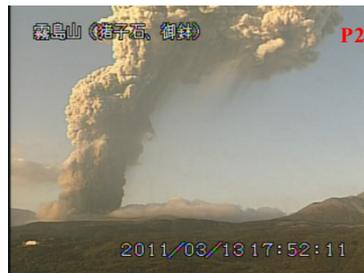


図 7 つづき. 17 時 51 分 30 秒から 17 時 52 分 20 秒 (10 秒間隔).

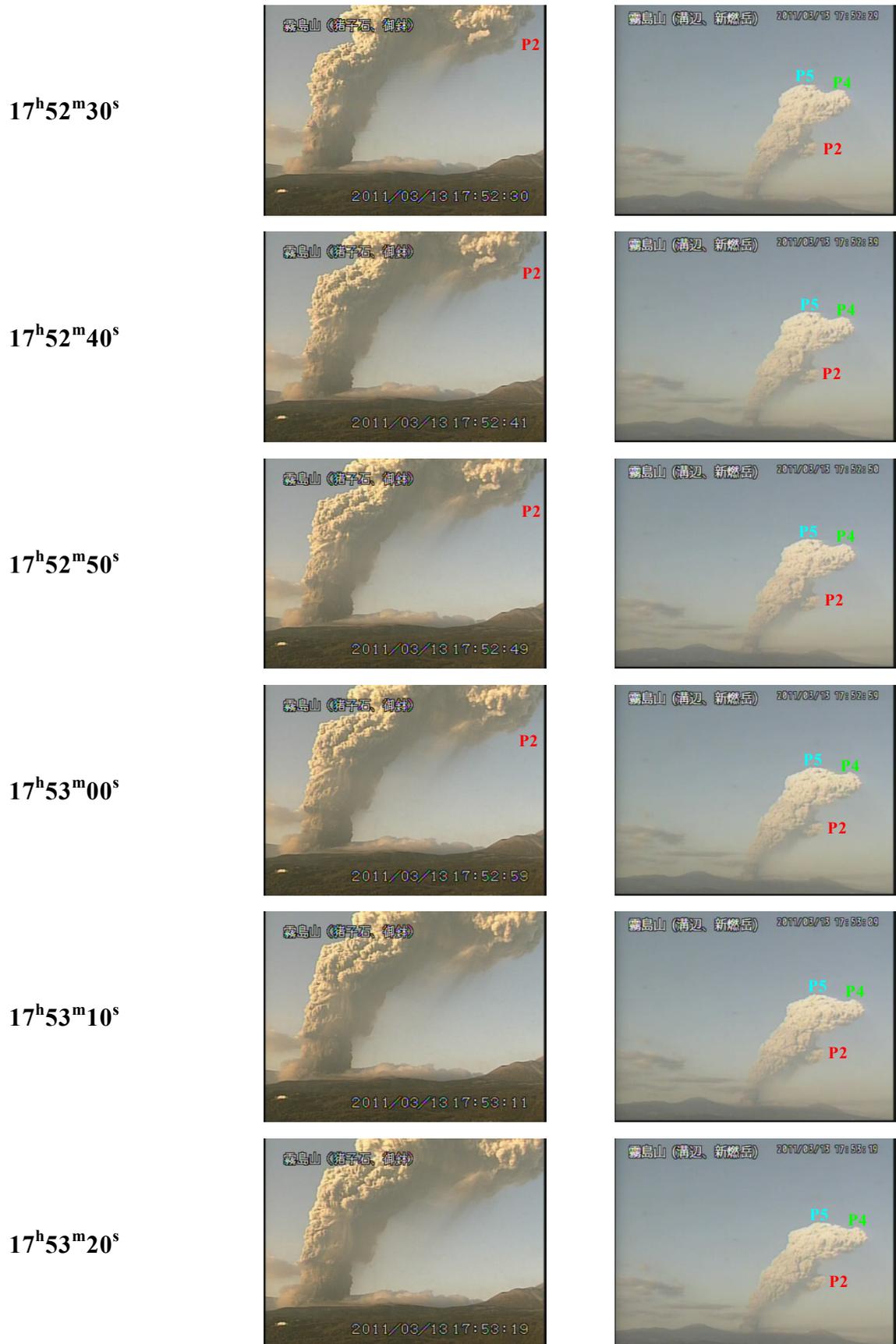
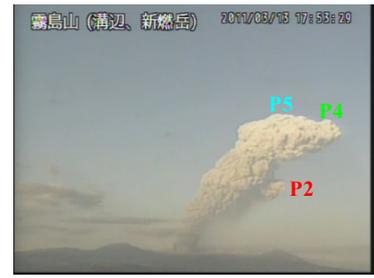
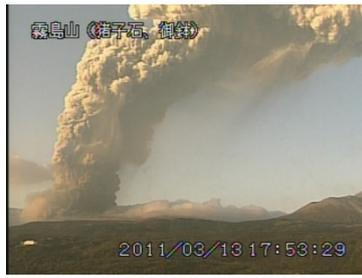


図7つづき. 17時52分30秒から17時53分20秒(10秒間隔).

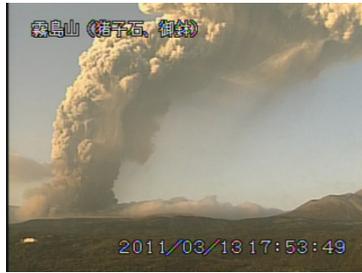
17^h53^m30^s



17^h53^m40^s



17^h53^m50^s



17^h54^m00^s



図 7 つづき. 17 時 53 分 30 秒から 17 時 54 分 00 秒 (10 秒間隔).



図7つづき. 17時55分00秒から18時00分00秒(1分間隔).

18^h05^m00^s



18^h10^m00^s



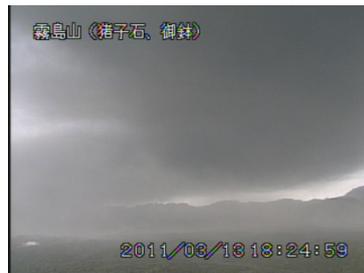
18^h15^m00^s



18^h20^m00^s



18^h25^m00^s



18^h30^m00^s

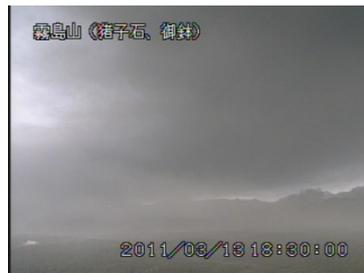


図 7 つづき. 18 時 05 分 00 秒から 18 時 30 分 00 秒 (5 分間隔).

遠望カメラ画像による噴煙高度の把握とマグマ噴出率の推定

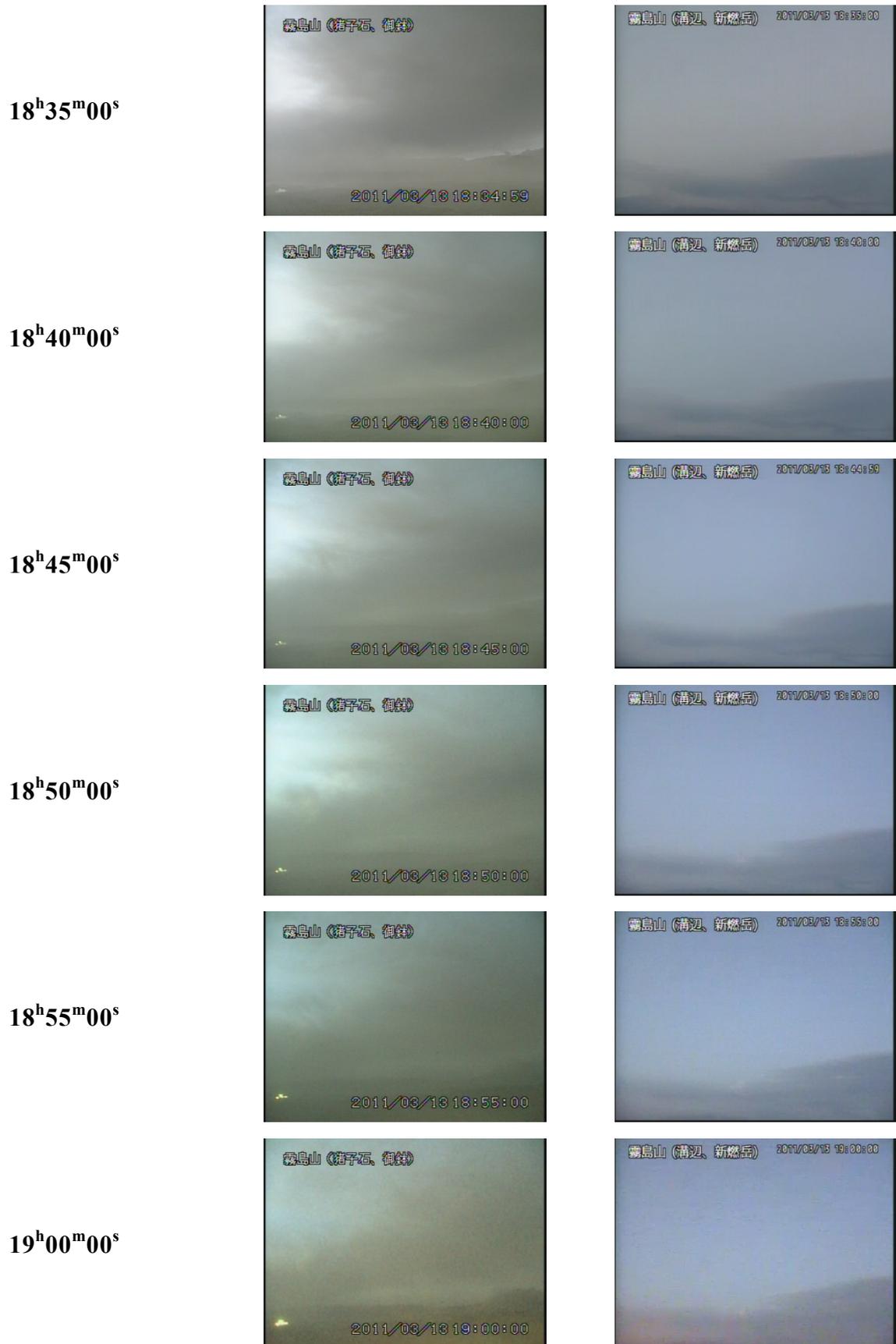


図 7 つづき. 18 時 35 分 00 秒から 19 時 30 分 00 秒 (5 分間隔).

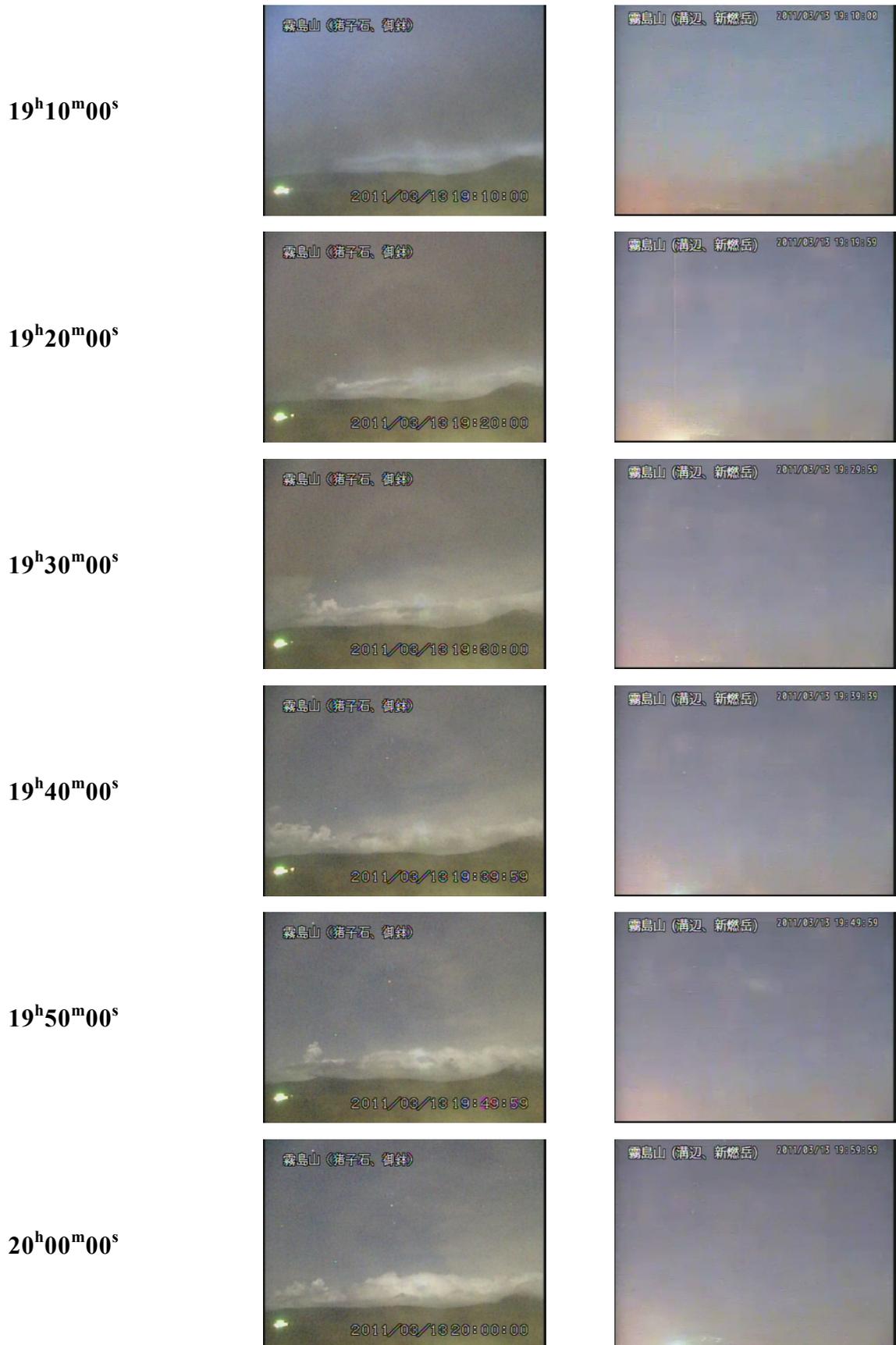


図 7 つづき. 19 時 10 分 00 秒から 20 時 00 分 00 秒 (10 分間隔).