

## 霧島山新燃岳 2011 年 2 月の放熱率と H<sub>2</sub>O 放出率

Heat and H<sub>2</sub>O Discharge Rate at the Shinmoedake Volcano in February 2011

福井敬一<sup>1</sup>, 寺田暁彦<sup>2</sup>

Keiichi FUKUI<sup>1</sup> and Akihiko TERADA<sup>2</sup>

(Received July 23, 2012; Accepted September 10, 2013)

**ABSTRACT:** The heat discharge rate (Q) and H<sub>2</sub>O discharge rate (W) at Shinmoedake, the Kirishimayama volcano group in February 2011 was evaluated using the plume rise method from the image data of a monitoring video camera. On February 1, Q and W were 16 GW and  $3.4 \times 10^5$  ton/day, respectively. These values are as large as the values measured at the beginning of the gigantic degassing stage of the 2000 Miyakejima eruption. Q and W rapidly decreased, and on February 26 they were 43 MW and 900 ton/day. The weight ratio of H<sub>2</sub>O/SO<sub>2</sub> decreased from 40 to 1 in this period. This change was possibly caused by the disappearance of the aquifer due to the large thermal activity.

### 1 はじめに

霧島山は鹿児島、宮崎県境に位置する 20 数個の火山からなる火山群で、有史後は主に御鉢と新燃岳で噴火を繰り返しており、気象庁が常時火山観測を開始した 1962 年より、地震観測や噴煙の観測等を実施している火山である。1994 年 2 月には新燃岳の南約 7.6km の猪子石 (いのこいし) に高感度カラービデオカメラが設置され、御鉢および新燃岳両火山の観測が行われるようになった。2010 年 3 月には猪子石のカメラは 2 台に増設され、新燃岳、御鉢各々別個に常時観測できる体制となった (Fig. 1)。

新燃岳では 1991 年のごく小規模な噴火の後、火山活動は比較的静穏に経過していたが、2005 年頃から山頂部での膨張変動 (気象研究所地震火山研究部, 2008; 高木・他, 2011), 2006 年 2 月 1 日に傾斜変動を伴う火山性微動が観測され (福井, 2010), その後、2008 年 8 月、2010 年 3~7 月に新燃岳で水蒸気噴火を繰り返し、2011 年 1 月には約 300 年ぶりとなるマグマ噴火を開始した (福岡管区気象台・鹿児島地方気象台, 2013; Kato and Yamasato, 2013)。

2011 年 1 月 19 日に小規模なマグマ水蒸気噴火が

発生し、1 月 26 日から 27 日まではほぼ連続的に火山灰を放出する準プリニー式噴火を発生させた。1 月 28 日には新燃岳火口中央に溶岩が出現しているのが確認され、2 月 1 日頃まで溶岩蓄積が継続し火口を満たすまでになった。1 月 28 日から 3 月 1 日の

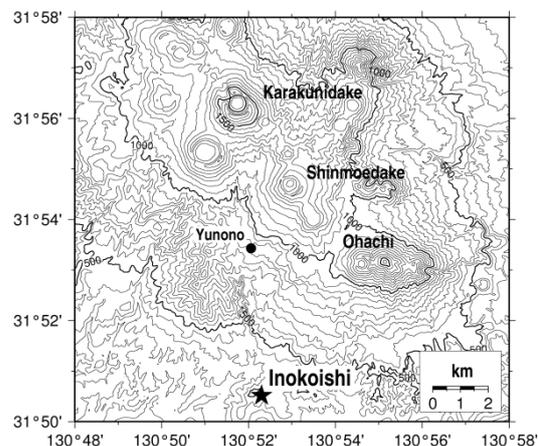


Fig. 1 Topographic map of the Kirishimayama volcano group. The star symbol indicates the monitoring video camera site at Inokoishi. Yunono is one of the acoustic stations.

<sup>1</sup> 地磁気観測所観測課, Observations Division, Kakioka Magnetic Observatory

<sup>2</sup> 東京工業大学火山流体研究センター草津白根火山観測所, Kusatsu-Shirane Volcano Observatory, Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

期間には爆発的噴火も起こした。その後、2011 年 9 月まで、噴火を繰り返した（福岡管区気象台・鹿児島地方気象台, 2013 ; Kato and Yamasato, 2013）。

前述した猪子石に設置された 2 台のビデオカメラのうち、御鉢用のカメラ（以下、御鉢カメラ）は 2011 年 1 月 26 日の噴火開始以降、広角の映像を取得できるように画角等の設定が変更され、高さ 4000m 程度までの噴煙を観測できるようになった。さらに、新燃岳の南西約 21km の鹿児島航空測候所にも超高感度カラーカメラが設置され、高さ 20km 程度までの噴煙の全体像を観測できるよう監視体制が強化された。これら以外にも霧島山東北東方向の高原町、北北東方向の小林市にも監視カメラが設置され、韓国岳山頂には新燃岳火口を監視するためのカメラも設置された。

ここでは御鉢カメラ映像から求めた 2011 年 2 月に新燃岳の噴煙活動によって放出された熱エネルギーと H<sub>2</sub>O 量について報告する。Fig. 2 に噴煙活動と噴火活動の時間推移を示したが、今回解析対象とした期間は爆発的噴火を繰り返していた期間に当たる。なお、この図では白色もしくは乳白色の噴煙の高さを灰色の棒グラフで、有色噴煙の高さを黒色の棒グラフで示している。図上部の灰色の三角印は噴火（2011 年 1 月 26 日から 3 月は噴煙高度が概ね 1000m 以上のもの）を、赤色の三角印は爆発的噴火（爆発地震を伴い、新燃岳の南西約 2.8km の湯之野にお

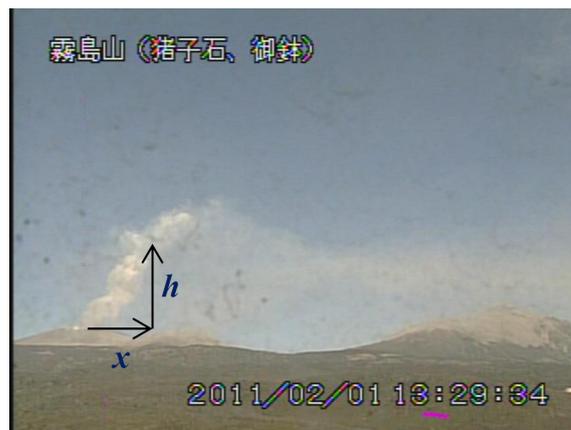


Photo 1 An example of an analyzed image from the Ohachi camera (13:29:34 (JST), February 1, 2011).

る空振計で 20Pa 以上の空振を観測した噴火)を示している。

## 2 観測データと解析方法

御鉢カメラで 2 秒毎に取得された映像データのうち白色の噴煙に対し、Briggs (1969) による煙の上昇形態と浮力との関係式を応用した鍵山 (1978) の方法 (plume rise 法) を適用し、火山ガスとして放出されている熱量を見積もった。なお、1 月 26 日から 31 日にかけての噴煙活動については火山灰が含まれた有色噴煙として観測されており、火山ガスとし

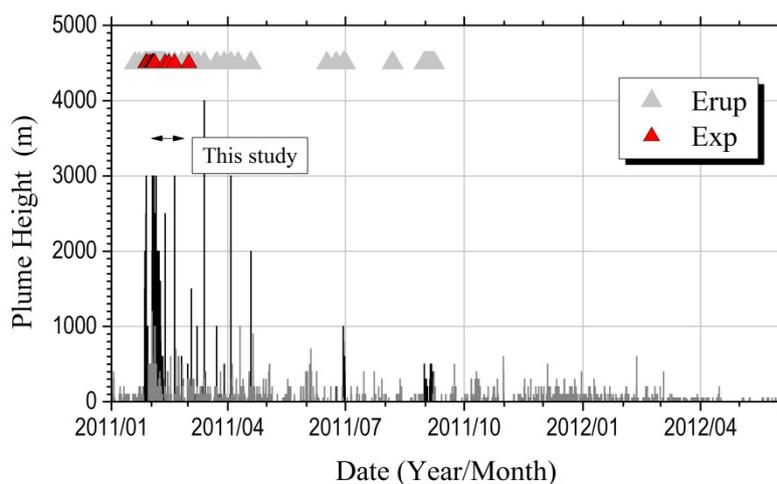


Fig. 2 Temporal change of the volcanic plume height of Shinmoedake (according to observations by Kagoshima Local Meteorological Observatory and Fukuoka District Meteorological Observatory). Black and gray bars respectively indicate the height of colored plumes from the eruption and white or light white plumes. Triangles indicate the occurrence of explosions (▲) and eruptions (▲).

て放出される量 (H<sub>2</sub>O 放出率) の評価ができないため解析対象としなかった。

Plume rise 法によると, 風速  $u$  の時, 噴出口からの水平距離  $x$  における噴煙の中心の高さが  $h$  であった場合, 放熱率  $Q$  は

$$Q = 2.8 \times 10^4 h^3 u^3 / x^2 \quad (1)$$

から求められる。噴煙が噴出されてからの時間  $t$  を用いると, 風速が一定なら  $x = ut$  であるから,

$$Q = 2.8 \times 10^4 h^3 u / t^2 \quad (2)$$

となる。今回の解析では  $h$  と  $t$  の関係を計測し, (2) 式から放熱率を求めた。風速  $u$  は時間差  $\Delta t$  の二枚の画像において噴煙上の特徴的な点を追跡し, その水平移動距離  $\Delta x$  を計測することで求めた。

$$u = \Delta x / \Delta t \quad (3)$$

噴煙の上昇形態や風速の計測において噴煙の流向の影響を避けるため, 監視カメラの視線方向と直交する西風または東風の日を解析対象とし, 噴煙の色が識別できる日中, 概ね 1 時間ごとに 3 つの噴煙を選んで計測した。Photo 1 に解析した画像例を示す。

### 3 2011 年 2 月の噴煙活動による放熱率の時間変化

Fig. 3, Table 1 に解析結果を示す。H<sub>2</sub>O 放出率  $W$  は,

$$W = Q / H \quad (4)$$

で求めた。ここで,  $H$  は 1 気圧, 800°C における過熱蒸気のエンタルピー (4.16MJ/kg) である。東宮・他 (2011) によると 1 月 26~27 日の準プリニー式噴火前に高温マグマが混合し 950~1030°C のマグマ温度となったが, 2 月の噴火では高温マグマの注入はなく, 約 880°C の低温マグマのみが関与した噴火であった。このことから, ここでは過熱蒸気のエンタルピーとして 800°C における値を用いた。

2 月 1 日の日平均放熱率は 16GW (最大 58GW) に達した。この値は三宅島 2000 年噴火の大量脱ガス活動初期における放熱率 (2000 年 9 月 26 日の日平均放熱率 24GW (福井, 2006)) に匹敵する大変大きな値である。この後, 放熱率は減少し 2 月 5 日以降, 1 GW 前後で推移した。その後, 18 日以降は衰退傾向が顕著となり, 26 日には日平均 43MW まで減少した。三宅島 2000 年噴火では, 最初の 1 年間で約 10GW から 1GW へと 1 桁減少した (福井, 2006)。また, 有珠山 2000 年噴火では, マグマ供給が停止したとされるまでの最初の 1 ヶ月間で約 2GW から約 0.4GW へと約 1/5 に減少した (福井, 2003), 一方,

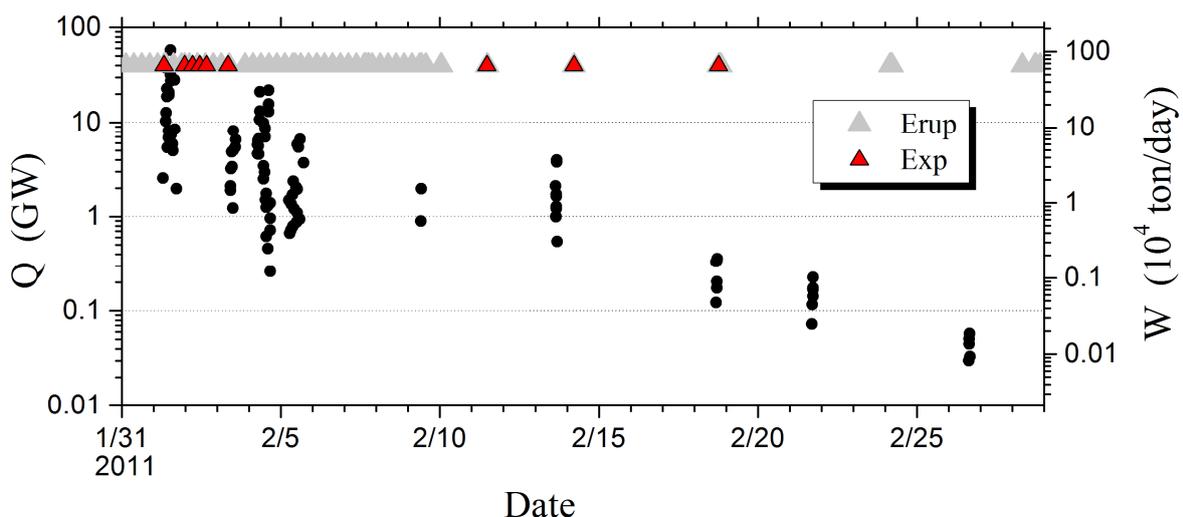


Fig. 3 Temporal variation of heat discharge rate ( $Q$ ) and H<sub>2</sub>O discharge rate ( $W$ ) at Shinmoedake in February 2011.  $W$  was calculated from  $Q$  and the enthalpy of superheated water vapor at 1 atm., 800 °C (4.16MJ/kg).

Table 1 Heat discharge rate ( $Q$ ) and H<sub>2</sub>O discharge rate ( $W$ ) at Shinmoedake estimated by the plume rise method.

Date	$Q$ (mean) [GW]	$Q$ (max) [GW]	$Q$ (min) [GW]	$W$ (mean) [kton/day]	Number of Data
Feb. 2011					
1	16.2	57.8	2.0	337	23
3	4.2	8.2	1.2	87	10
4	6.1	21.9	0.26	127	29
5	2.5	6.6	0.67	52	18
9	1.4	2.0	0.90	29	2
13	1.8	4.0	0.54	37	12
18	0.25	0.36	0.12	5.2	6
21	0.15	0.22	0.073	3.1	6
26	0.043	0.058	0.030	0.9	5

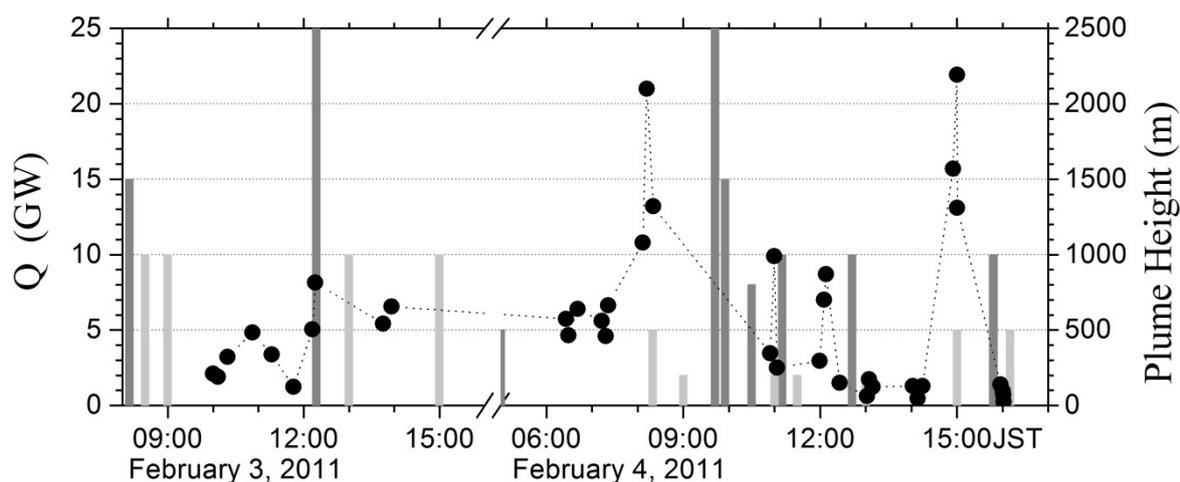


Fig. 4 Temporal variation of heat discharge rate  $Q$  (solid circles) and volcanic plume height (bars) at Shinmoedake on February 3 and 4, 2011. Gray and light gray bars respectively indicate the height of grayish white plumes and white or light white plumes.

今回の新燃岳の活動では1ヶ月間で2桁も放熱率が減少し、噴煙活動の低下率が大変大きかった。この大きな変動は、4章で述べるように、初期の活発な火山活動によって帯水層がなくなり、H<sub>2</sub>O放出率が大きく減少したことに関係していると考えられる。2月5日頃に放熱率の減少傾向が低下した時は、爆発的噴火の発生頻度が減少し、ハーモニック微動の発生がおさまった時期（福岡管区気象台・鹿児島地方気象台, 2013; Kato and Yamasato, 2013）に対応してい

る。2月中旬に放熱率の減少傾向が顕著になった時期に対応しては、他の観測データに特段変化は認められない。

2月1日から5日の噴気活動は数時間程度の時間スケールで大きく変動している、その変動幅は1~2桁に及んだ。Fig. 4に2月3日、4日の詳細な時間変化を示す。2月3日12h15mの噴火の前、11h頃から放熱率が減少しているが、この変化の様子は森・鹿児島地方気象台（2011）が報告した噴火前のSO<sub>2</sub>放

Table 2 Summary of temporal change of discharge rates and components of volcanic gases in 2011.

Date	H <sub>2</sub> O discharge rate [kton/day]	SO <sub>2</sub> discharge rate [kton/day] <sup>*1</sup>	H <sub>2</sub> O/SO <sub>2</sub> (weight ratio)	SO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> S (weight ratio) <sup>*2</sup>
Feb. 1	340	8.8	38	
late Feb.	0.89	0.77 - 1.3	0.7 - 1.2	
Mar. 15		0.48		15 ± 3
May 18		0.2	160 ± 60 <sup>*2</sup>	1.5 ± 0.2

<sup>\*1</sup> after Mori and Kato (2013), <sup>\*2</sup> calculated from Shinohara (2013)

出率の減衰の様子と一致している。また、2月4日の8h20m頃や、11h頃、15h頃の放熱率の変化を見ると、顕著な火山灰放出があった頃に増大しているようにも見えるが、放熱率を計測できたケースに限られており、はっきりとしたことは分からない。今後、映像データを精査した上で、放熱率の計測例を増やし、森・鹿児島地方気象台(2011)が示した、噴火前の火山ガス放出活動の減衰との対応を含め、放熱率の時間変化と火山活動との関係を検討する必要がある。

#### 4 H<sub>2</sub>O/SO<sub>2</sub>比と帯水層

2月1日のH<sub>2</sub>O放出率は34万トン/日であったが、この日、東京大学によって測定されたSO<sub>2</sub>放出率は8800トン/日(Mori and Kato, 2013)であり、H<sub>2</sub>O/SO<sub>2</sub>重量比は約40(モル比では約160)となる。この値は三宅島2000年噴火時のH<sub>2</sub>O/SO<sub>2</sub>重量比、約3~10(Matsushima, 2005; 福井, 2006)と比べ大きな値となっている。一方、2月下旬から3月初めにかけては気象庁によりSO<sub>2</sub>放出率として1000トン/日前後の値が得られており、この時期のH<sub>2</sub>O/SO<sub>2</sub>重量比は1程度の値となる。Shinohara(2013)が無人飛行機によって2011年5月18日に観測した火山ガス組成からH<sub>2</sub>O/SO<sub>2</sub>重量比を求めると160±60となり、今回の結果と比べ1~2桁大きな値となっている。この日のSO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比はモル比で0.8、一方、3月15日の測定によるとSO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比は8であった(この日、H<sub>2</sub>Oは計測できず)。3月から5月にかけてのSO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比の減少は火山活動の低下に伴いSO<sub>2</sub>量が減少したためであり、この期間のH<sub>2</sub>O/SO<sub>2</sub>比が増大した一因と考えられる。

活動初期にH<sub>2</sub>O/SO<sub>2</sub>が大きく、その後小さくなる時間変化の様子は三宅島2000年噴火に伴う大量脱ガスの際にも観測されている(福井, 2006)。新燃岳においても三宅島と同様に、活動初期の段階では帯水層が存在し、H<sub>2</sub>O放出率が高かったが、その後、活発な噴火活動により帯水層がなくなり噴煙中の地下水起源の水が減ったことによりH<sub>2</sub>O/SO<sub>2</sub>比が小さくなったと考えられる。火山灰の分析によって6月には帯水層が回復したと考えられている(Suzuki et al., 2013)が、3月から5月にかけてH<sub>2</sub>O/SO<sub>2</sub>比が増大したことにはSO<sub>2</sub>量の減少のみならず、このことも関係していると考えられる。

#### 5 まとめ

2011年霧島山新燃岳噴火活動初期2011年2月の噴煙活動による放熱率とH<sub>2</sub>O放出率を、気象庁監視カメラ映像データからPlume rise法により求めた。2月1日の放熱率は16GW、H<sub>2</sub>O放出率は約34万トン/日と2000年三宅島噴火の大量脱ガス活動初期の値に匹敵するものであった。2月26日の放熱率は43MW、H<sub>2</sub>O放出率は900トン/日と1ヶ月で2桁も減少した。2000年三宅島噴火活動では放熱率は1年をかけ1桁減少し、2000年有珠山噴火活動では1ヶ月で1/5になったが、今回の放熱率の減衰の仕方はこれらのケースと比較し、非常に大きい。H<sub>2</sub>O放出率と気象庁および東京大学大学院理学研究科が測定したSO<sub>2</sub>放出率からH<sub>2</sub>O/SO<sub>2</sub>重量比を求めると、2月1日は約40で、2月下旬には1程度にまで減少した。この期間のH<sub>2</sub>O放出率やH<sub>2</sub>O/SO<sub>2</sub>比の減少は活発な噴火活動により帯水層がなくなり、噴煙中の地下水起源の水が減ったことによると考えられる。

放熱率は数時間のうちに 1~2 桁変動することがあり、この変動の様子は噴火などの火山灰放出活動と関係しているように見えるが、今後、放熱率の計測事例を増やし、火山活動との対応関係を調査する必要がある。

長い期間の放熱率、H<sub>2</sub>O 放出率の時間推移を求め、SO<sub>2</sub> など他の火山ガス成分の時間変動の様子と対比させることにより、新燃岳の脱ガス活動について理解を深めるとともに、2000 年有珠山噴火や 2000 年三宅島噴火等の脱ガス活動との比較研究を進めることにより、脱ガス活動の変動要因を解明し、推移予測へと発展させることができるであろう。

### 謝辞

監視カメラ映像データの利用に際しては福岡管区気象台火山監視・情報センターの協力を頂きました。札幌管区気象台宮村淳一氏と一名の匿名の査読者、内藤宏人編集長からの適切なご指摘は、本稿を改善する上で大変有益でした。記して感謝の意を表します。

### 文献

- 鍵山恒臣 (1978): 火山からの噴気による熱エネルギーと H<sub>2</sub>O の放出量—Plume rise からの推定—, 火山, **23**, 183-197.
- 気象研究所地震火山研究部 (2008): 霧島山における GPS 観測, 気象研究所技術報告第 53 号「火山活動評価手法の開発研究」, 144-154.
- 高木朗充・福井敬一・鬼澤真也・山本哲也・加藤幸司・近澤 心・藤原健治・坂井孝行 (2011): 2011 年霧島山新燃岳噴火前の山頂地殻変動, 日本火山学会講演予稿集 2011 年度秋季大会予稿集, 119.
- 東宮昭彦・斉藤元治・下司信夫・宮城磯治 (2011): 新燃岳 2011 年噴火直前の高温マグマ注入過程: 磁鉄鉱に着目した解析, 日本火山学会講演予稿集 2011 年度秋季大会予稿集, 31.
- 福井敬一 (2003): 噴煙活動の解析. 気象庁技術報告第 124 号「平成 12 年 (2000 年) 有珠山噴火調査報告」, 32, 37-44.
- 福井敬一 (2006): 放熱量観測. 気象庁技術報告第 128 号「平成 12 年 (2000 年) 三宅島噴火及び新島・神津島近海の地震活動調査報告」, 115-121.
- 福井敬一 (2010): 2006 年 1 月 1 日 07 時 44 分霧島山新燃

岳で発生した火山性微動に対応した傾斜変動, 火山噴火予知連絡会会報, **100**, 122-125.

福岡管区気象台・鹿児島地方気象台 (2013): 2011 年霧島山新燃岳の噴火活動, 験震時報, **77**, 65-96.

森 俊哉・鹿児島地方気象台 (2011): 新燃岳 2011 年噴火における二酸化硫黄放出率の推移, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集, SVC070-P14.

Briggs, G. A. (1969): Plume Rise, USAEC Critical Review Series, TID-25075, National Technical Information Service, Springfield, VA., 81pp.

Kato, K. and H. Yamasato (2013): The 2011 eruptive activity of Shinmoedake volcano, Kirishimayama, Kyushu, Japan—Overview of activity and Volcanic Alert Level of the Japan Meteorological Agency—, Earth Planets Space, **65**, 489-504.

Matsushima, N. (2005): H<sub>2</sub>O emission rate by the volcanic plume during the 2000–2002 Miyakejima volcanic activity, Geophys. Res. Lett., **32**, L14307, doi:10.1029/2005GL023217.

Mori, T. and K. Kato (2013): Sulfur dioxide emissions during the 2011 eruption of Shinmoedake volcano, Japan, Earth Planets Space, **65**, 573-580.

Shinohara, H. (2013): Composition of volcanic gases emitted during repeating Vulcanian eruption stage of Shinmoedake, Kirishima volcano, Japan. Earth Planets Space, **65**, 667-675.

Suzuki, Y., M. Nagai, F. Maeno, A. Yasuda, N. Hokanishi, T. Shimano, M. Ichihara, T. Kaneko, and S. Nakada (2013): Precursory activity and evolution of the 2011 eruption of Shinmoe-dake in Kirishima volcano—insights from ash samples, Earth Planets Space, **65**, 591-607.

(編集担当 坂井孝行・長岡 優)