

霧島火山新燃岳 2011年準プリニー式噴火における  
降下火砕堆積物の粒度変化

入山 宙\*・寅丸敦志\*\*

(2013年12月12日受付, 2015年6月25日受理)

Stratigraphic Variations in Grain-size Characteristics of Pyroclastic Fall Deposits  
During the 2011 Subplinian Eruptions of Shinmoedake, Kirishima Volcano, Japan

Yu IRIYAMA\* and Atsushi TORAMARU\*\*

Shinmoedake volcano, one of the eruption centers of the Kirishima volcano group in SW Japan, exhibited three subplinian eruptions in January 2011. This series of eruptions were well observed, and almost all the relationships between the eruption times and pyroclastic fall deposits have already been reported. However, stratigraphic boundary of the first and the second subplinian eruptions remained unclear. In order to distinguish the deposits into two sections corresponding to these two subplinian eruptions, we carried out grain size analysis with higher time resolution. We collected samples at 3 localities, Takachiho-gawara (Tg: 2.7 km SE), Miike elementary school (Mk: 7.9 km SE), and Natsuo elementary school (Nt: 11.3 km SE). Our measurements of stratigraphic  $Md\phi$  variations show two clear peaks at Tg ( $Md\phi$ : -3.4~-1.2) and Mk ( $Md\phi$ : -1.0~-1.5), but only one gentle peak at Nt ( $Md\phi$ : -0.7~+1.5). At all localities,  $Md\phi$  peaks appear at almost the same stratigraphic position, and the farther the distance from the vent is, the finer the peak  $Md\phi$  values is. Assuming that a single plinian eruption makes a single  $Md\phi$  peak through the deposit, we inferred that our analyzed deposits correspond to the first two subplinian eruptions (the thickness ratio of the first and the second subplinian deposits is 7:3~6:4). We found that dominant grain sizes vary with time from fine at the initial stage, coarse at the climax, and fine during the final stages of a single subplinian eruption deposit. Pyroclastic fall deposits were subjected to the compaction effect for one year after deposition.

**Key words:** Shinmoedake volcano, Kirishima volcanoes, pyroclastic fall deposit, stratigraphic variation of grain-size distribution

## 1. はじめに

プリニー式噴火は数時間から1日程度継続するが、噴煙高度(噴火強度)に時間変化があることが、最近の連続的なレーダーエコー解析や画像解析によって観測されている(例えば、新堀・福井, 2012a, b)。一方、プリニー式噴火によって形成された降下火砕堆積物には、正級化や逆級化、およびそれらの繰り返しが見られることがあり、こうした粒径の変化は噴火強度の変化として解釈さ

れてきた(例えば、Carey and Sigurdsson, 1987; Walker, 1980)。しかし、噴火が科学的に観察および観測されている場合でも、野外で観察される堆積物と個々の噴火イベントを対応付け、堆積物の鉛直変化と噴火強度の時間変化を対比することは時として困難である。

霧島火山新燃岳2011年噴火では、形成された降下火砕堆積物は様々な観測データから噴火の日時、準プリニー式噴火やプルカノ式噴火の回数や噴火継続時間、噴

\*〒812-0053 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1  
九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻  
Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate  
School of Sciences, 33 Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki,  
Higashi-ku, Fukuoka 812-8581, Japan.

\*\*〒812-0053 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1  
九州大学大学院理学府地球惑星科学部門

Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of  
Sciences, 33 Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-  
ku, Fukuoka 812-8581, Japan.

Corresponding author: Yu Iriyama  
e-mail: iriyama.yu.808@s.kyushu-u.ac.jp

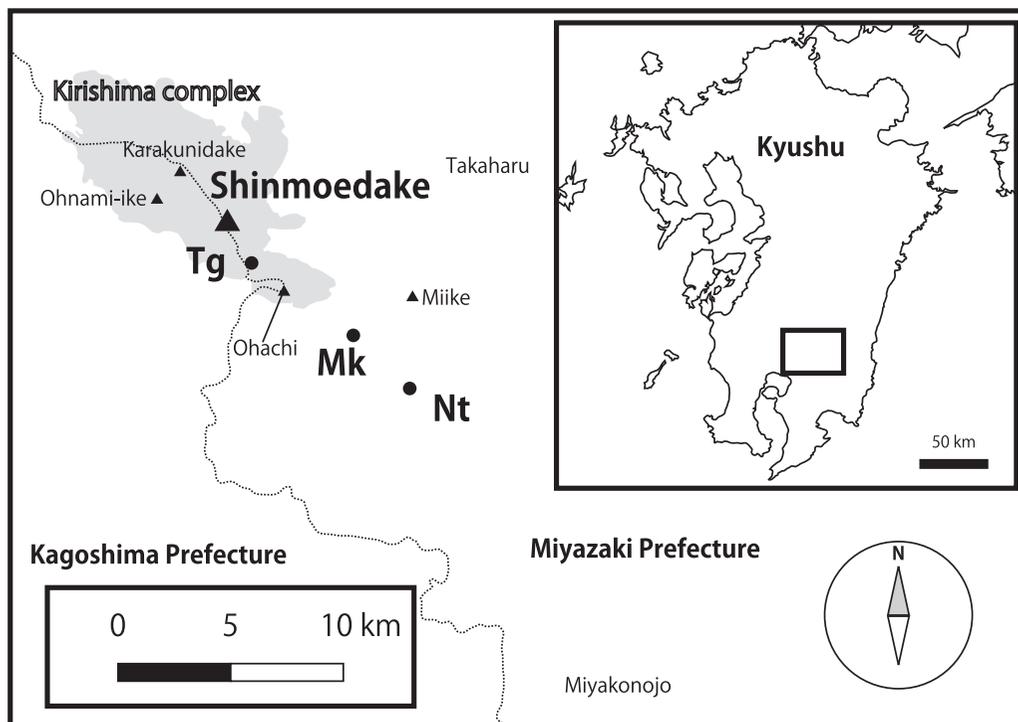


Fig. 1. Index map of Shinmoedake volcano at Kirishima volcanoes, Japan, and sampling sites of the 26–27 January 2011 pyroclastic fall deposits. Tg: Takachiho-gawara (2.7 km SE), Mk: Miike elementary school (7.9 km SE), Nt: Natsuo elementary school (11.3 km SE).

煙高度の時間変化等の観測事実が詳細にわかっている。また、噴火と同時あるいは噴火の直後に詳細に現地調査が行われているため、噴出物と噴火日時の対応関係がほぼ解明されている（例えば、Maeno *et al.*, 2014; Miyabuchi *et al.*, 2013; Nakada *et al.*, 2013）。一連の噴火によって形成された降下火砕堆積物の層序学的な先行研究のうち、Miyabuchi *et al.* (2013) は、噴火ごとに堆積層を分離し、各々の粒度や構成物組成について分析を行った。この中で、新燃岳 2011 年噴火で生じた噴出物の大半を占める 1 月 26 日と 27 日午前の 2 回の準プリニー式噴火の降下火砕堆積物である Unit 2 を相対的な粒度の違いから 3 層 (Unit 2L, Unit 2M, Unit 2U) に分離して分析が行われている。一方、火口近傍域以外では降下火砕堆積物中に 2 回の準プリニー式噴火の時間間隙に対応する境界が明確でないため、層序学的には堆積物を 2 回の準プリニー式噴火に対応した 2 層の降下火砕堆積物に分離することは困難である。

不明瞭である 2011 年 1 月 26 日と 1 月 27 日午前に生じた 2 回の準プリニー式噴火で形成された降下火砕堆積物の境界を明らかにすることは、先行研究との対応関係

を理解する上で重要である。本論文では新燃岳 2011 年噴火で生じた降下火砕堆積物について、初めに粒度と堆積構造の層序変化を定性的に記載する。次に先行研究と比較を行うことで 1 回目および 2 回目の準プリニー式噴火により形成された堆積物を抽出し、粒度分析により定量的な粒度の層序変化を求める。最後に噴火イベントと降下火砕堆積物の同定を行い、噴出物輸送プロセスの観点から粒度の層序変化の要因について考察を行う。

## 2. 地質概要

新燃岳 (1420.8 m asl) は九州南部の霧島火山群に含まれる安山岩質火山である (Fig. 1)。霧島火山群は東西 30 km、南北 25 km に広がり、2 つのカルデラを覆う 25 以上の成層火山やマールから成る (井村, 1994; 井村・小林, 2001)。霧島火山群の火山活動は約 600 ka のカルデラ形成を伴う噴火から開始し、約 330 ka 以降の多様な様式の噴火活動 (プリニー式噴火、ブルカノ式噴火、ストロンボリ式噴火、水蒸気噴火) によって現在の火山群を形成した (井村・小林, 2001; Nagaoka and Okuno, 2011)。新燃岳では、1716 年から 1717 年にかけてプリニー式噴火

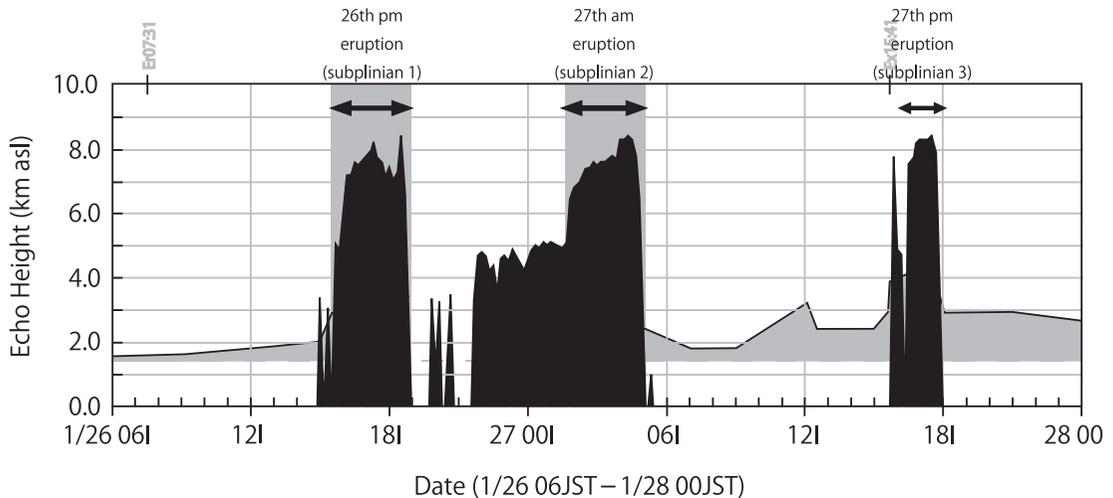


Fig. 2. Temporal variation of column height observed by echo sounding (Shimbori and Fukui, 2012a).

が生じ、噴出量は DRE 換算で約  $0.07 \text{ km}^3$  と見積もられている (井村・小林, 1991)。その後新燃岳では、1822 年、1959 年、1991 年に小規模な水蒸気爆発が生じている。また、2008 年 8 月 22 日の噴火以降、2009 年 11 月 15 日や 2010 年 3 月から 7 月にかけて間欠的な水蒸気爆発が生じている (下司・他, 2010)。

### 3. 新燃岳 2011 年噴火

新燃岳 (Fig. 1) は、2011 年 1 月 19 日にマグマ水蒸気爆発とみられる噴火を起こした (福岡管区気象台・鹿児島地方気象台, 2012)。噴火活動が活発化した 2011 年 1 月 26 日には噴煙拡大の主軸を火口から南東方向に持つ準プリニー式噴火 (SP1) が発生した。27 日の未明に噴煙拡大の主軸を火口から南東方向に持つ 2 回目の準プリニー式噴火 (SP2) を起こした後に、15 時 41 分に 1 回目のブルカノ式噴火が起こった直後に噴煙拡大の主軸を火口から南南東方向に持つ 3 回目の準プリニー式噴火 (SP3) が発生した。その後、溶岩を穏やかに噴出して火口内に溶岩を蓄積させながら、ブルカノ式噴火を 2011 年 9 月 7 日まで断続的に起こした。なお、本論文の SP1 から 3 は各々 Maeno *et al.* (2014) の 26 pm, 27 am, 27 pm に対応する。

噴火による噴出量は SP1 と SP2 をあわせて  $15\text{--}34 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Maeno *et al.*, 2014), SP3 が  $5.0\text{--}7.6 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Maeno *et al.*, 2014), また、火口内溶岩が  $1.43 \times 10^7 \text{ m}^3$  (佐々木・他, 2011) と報告されている。3 回の準プリニー式噴火のマグマ噴出率はいずれも  $1\text{--}2 \times 10^6 \text{ kg/s}$  であった (Maeno *et al.*, 2014)。また、噴火中の地殻変動量から

推定された新燃岳周辺の体積変化量は SP1 と SP2 で同等である (Kozono *et al.*, 2013)。

3 回の準プリニー式噴火はそれぞれ、噴煙柱高度 (新堀・福井, 2012a, b), 噴出率 (Ueda *et al.*, 2013) の時間変化の観点から、1 回の噴火で 1 つのみピークを持つ噴火であることが示唆されている。新堀・福井 (2012a; Fig. 2) によると、SP1 は 2011 年 1 月 26 日 15:30 頃から噴煙が最大で火口から約 7 km の高さまで急激に上昇し、約 2 時間半後に噴火が終了した。SP2 は 26 日 21:30 頃から約 4 時間にわたり火口から約 3 km の高さの噴煙を上げた後、27 日 02:30 頃から噴煙が最大で火口から約 7 km の高さまで急激に上昇し、その約 2 時間半後に噴火が終了した。SP3 は 27 日 15:41 にブルカノ式噴火が起きた後、16:30 頃から噴煙が最大で火口から約 7 km の高さまで急激に上昇し、その約 1 時間半後に噴火が終了した。

赤外画像 (気象庁ホームページ<sup>1</sup>) から、火口直上 (九州上空) で、2011 年 1 月 26 日 17:00~19:00 は  $10\text{--}20$  度、2011 年 1 月 26 日 23:00 から 27 日 03:00 は約  $20$  度、2011 年 1 月 27 日 04:00~05:00 は約  $40$  度の扇型の噴煙の広がりが観測された。SP1 と SP2 の扇状に広がる噴煙の中心角を比較すると、SP1 の方が SP2 に比べて噴煙がなす扇型の中心角が小さいことが読み取れる (Fig. 3)。

新燃岳 2011 年準プリニー式噴火の噴出物は、茶色、灰色、白色の軽石からなる。これらの軽石の見かけ密度は  $1.0\text{--}1.4 \text{ g/cm}^3$  (平均密度は、SP1 と SP2 あわせて  $1.1 \text{ g/cm}^3$ , SP3 で  $1.2 \text{ g/cm}^3$ ) である (Miyabuchi *et al.*, 2013)。

<sup>1</sup> [http://www.jma-net.go.jp/msc/gallery/image\\_gallery/VolAsh20110126\\_i.html](http://www.jma-net.go.jp/msc/gallery/image_gallery/VolAsh20110126_i.html)

## A: 2011/01/26

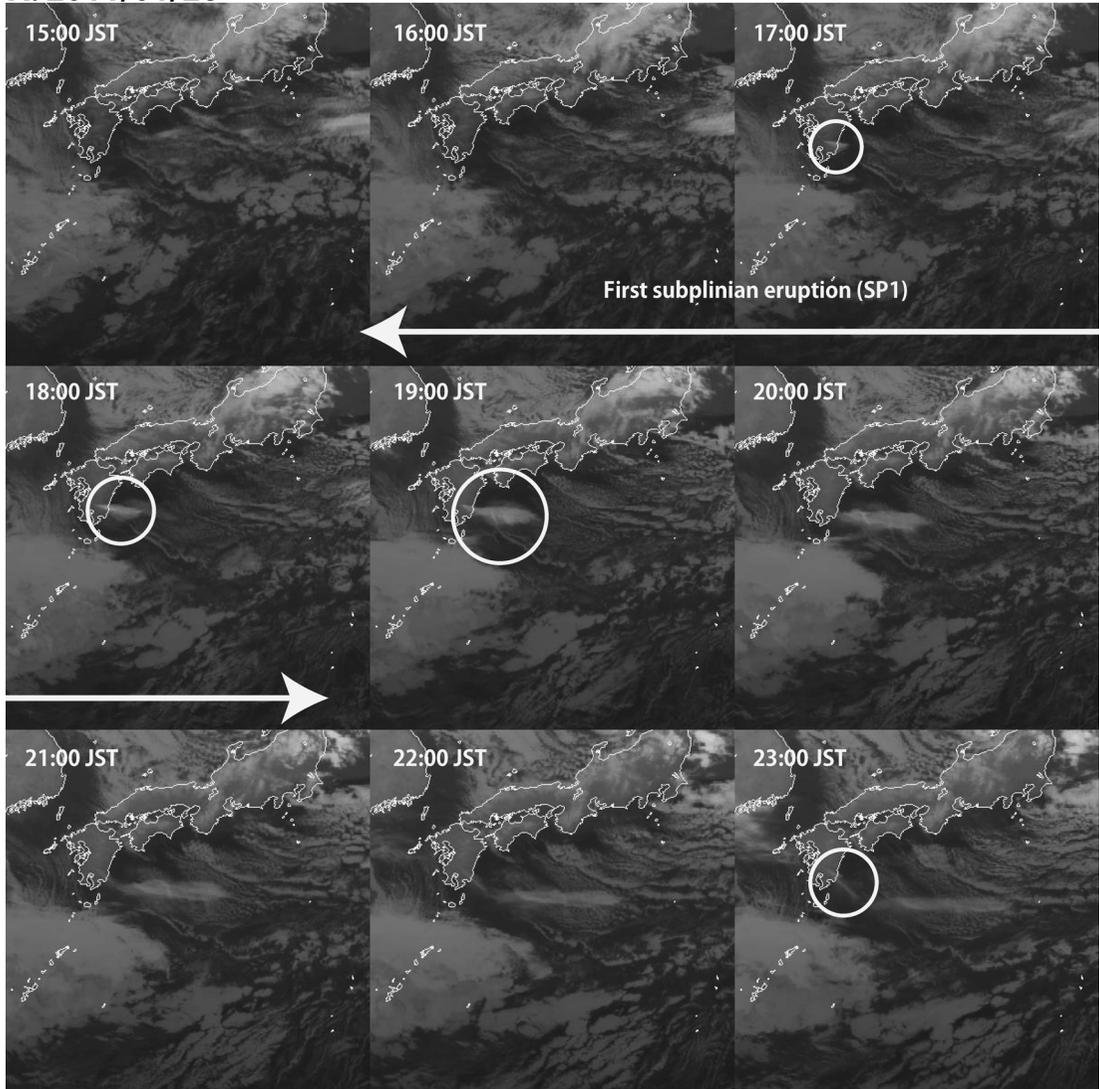


Fig. 3. Satellite images of the 2011 Shinmoedake subplinian eruptions (JMA data). Fig. 3A: 15:00 (JST)~23:00 on 26<sup>th</sup> January. Fig. 3B: 00:00~08:00 on 27<sup>th</sup> January. Circles show expanding eruption ash cloud from the vent. First and second subplinian eruptions are shown in Figs. 3A and 3B respectively. The expanding center angle of first subplinian eruption above the vent is smaller than that of second subplinian eruption.

Miyabuchi *et al.* (2013) は、新燃岳 2011 年噴火の噴出物について噴火時系列に応じた Unit に細分した。3 回の準プリニー式噴火の堆積物に着目すると、1 月 26 日 (SP1) および 1 月 27 日午前 (SP2) の噴火は Unit 2 に、1 月 27 日午後 (SP3) の噴火は Unit 3 にそれぞれ対応する。その中で、Unit 3 下部 (Unit 3L) は黒色粗粒火山灰層からなり、SP3 初期に形成されたことが報告されている。

Maeno *et al.* (2014) は、Unit 2 中で軽石の見掛け密度が 6 % ほど上昇する層位を SP1 と SP2 の境界と対応付けたが、詳細な検討は行っていない。

#### 4. 現地観察結果

本研究では、新燃岳 2011 年噴火直後の 2011 年 1 月 28 日から 30 日、噴火から約 1 年後の 2012 年 3 月 13 日お

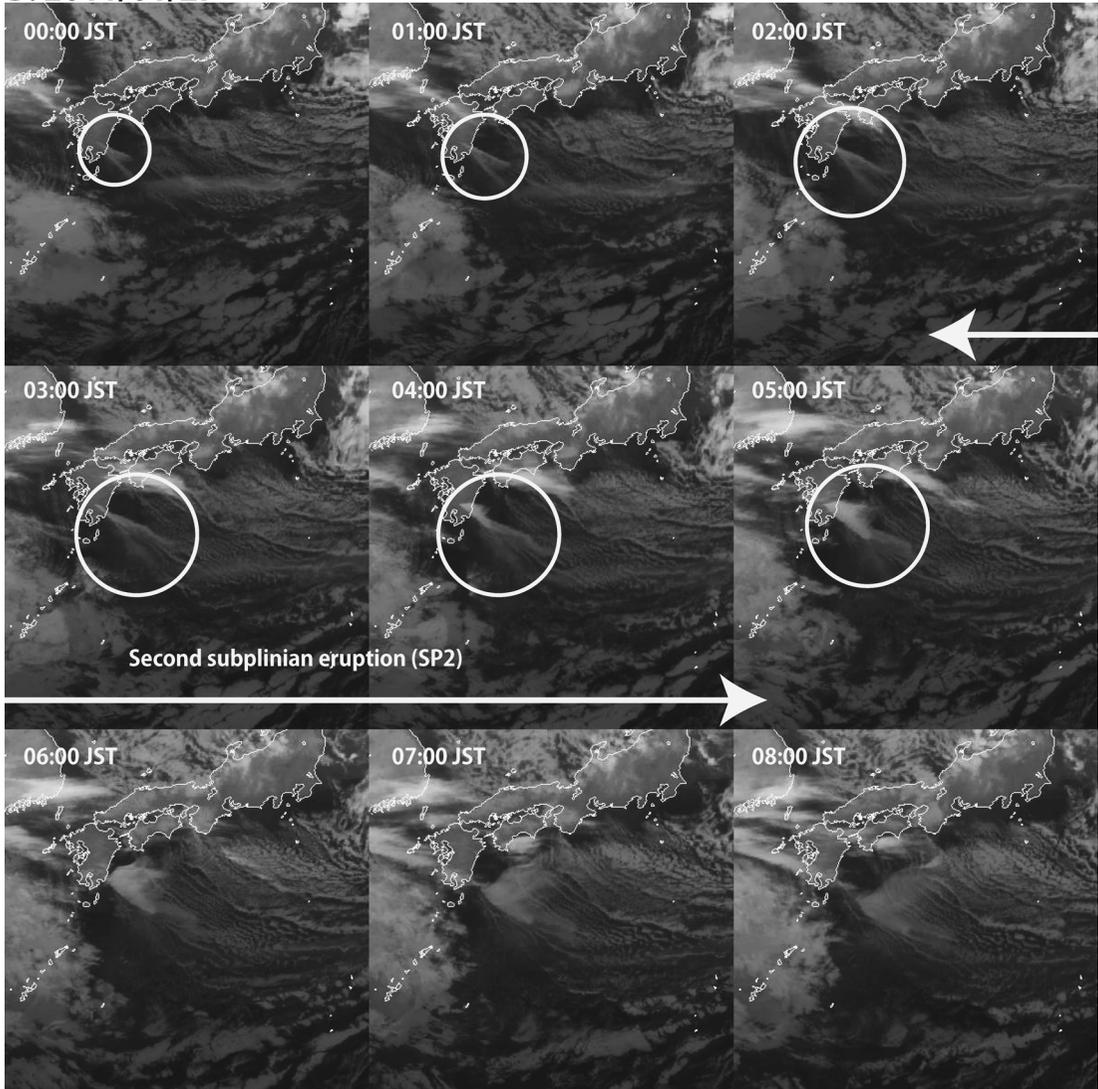
**B: 2011/01/27**

Fig. 3. Continued.

よび、約1年半後の2012年8月14日と8月25日に現地調査を行った。調査地域はすべて、2011年1月26日および27日に発生した準プリニー式噴火の主軸方向(火口から南東方向から南南東)である (Fig. 1)。

噴火直後の2011年1月28日から30日に、火口から7~11kmの地域で調査を行った。どの調査地点においても、降下火砕堆積物の粒径と構成粒子の色に関して特徴的な層序変化が観察された (Fig. 4A, B, E)。降下火砕堆積物の最下部には細かな粒子が堆積しており、黒色粒子が多く見られた。降下火砕堆積物下部では上方粗粒化

がみとめられ、黒色粒子の割合は減少し、灰色軽石が大半を占めるように変化した。一方上部では上方細粒化がみとめられ、最上部には明瞭な細粒火山灰層が形成されていた。

2012年3月13日に、前回の調査と同様に火口から7~11kmの地域で調査を行った。同地域では、堆積物があらかじめ除去されており、観察が出来たのはあまり人の立ち入らない場所に限られた。そのような場所では、前述の堆積構造が概ね保存されていたが、全体的に層厚が減少し、最上部に存在していた細粒火山灰の層の存在自

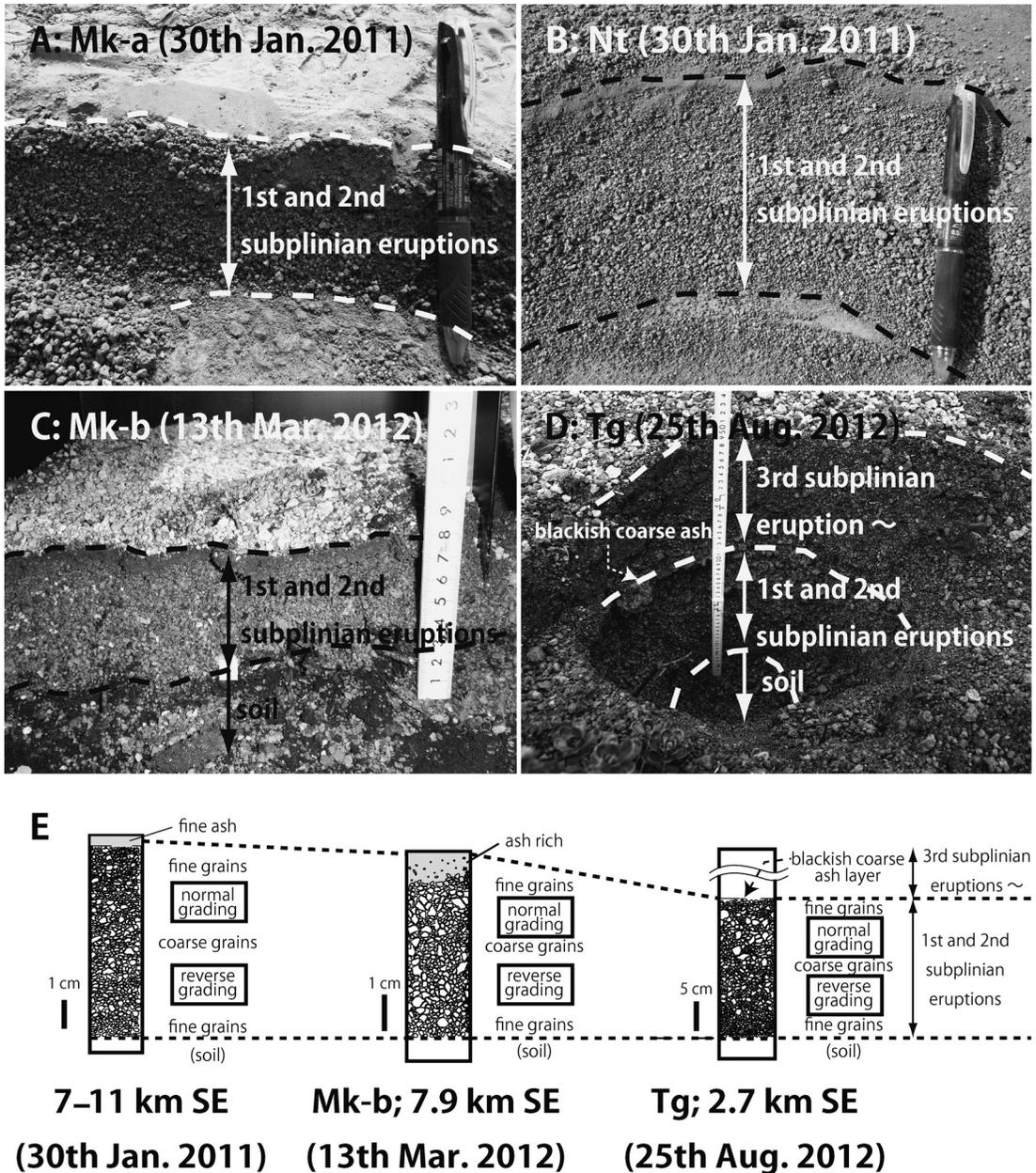


Fig. 4. Photographs of the 2011 Shinmoedake eruption deposits. A: Pyroclastic fall deposits at locality Mk-a (7.9 km SE). B: Pyroclastic fall deposits at locality Nt (11.3 km SE). C: Pyroclastic fall deposits at locality Mk-b (7.9 km SE). D: Pyroclastic fall deposits at locality Tg (2.7 km SE). Corresponding stratigraphic columns are shown in the left (A or B), the middle (C), and the right (D) of Fig. 4E.

体が不明瞭となる一方、堆積物上部の粗粒粒子の粒間に細粒粒子が多く認められた (Fig. 4C, E).

2012年8月14日および25日に、火口から2~3kmの地域で調査を行った。調査地域の堆積物の最下部には、

噴火以前に地表面を覆っていた植物の枝や茎が含まれていた。新燃岳2011年噴火の堆積物の最下部から上方に向かうにつれて粗粒化が進行し、最も粗粒な部分の上部に黒色の粗粒な火山灰層が観察され、その上部には再び

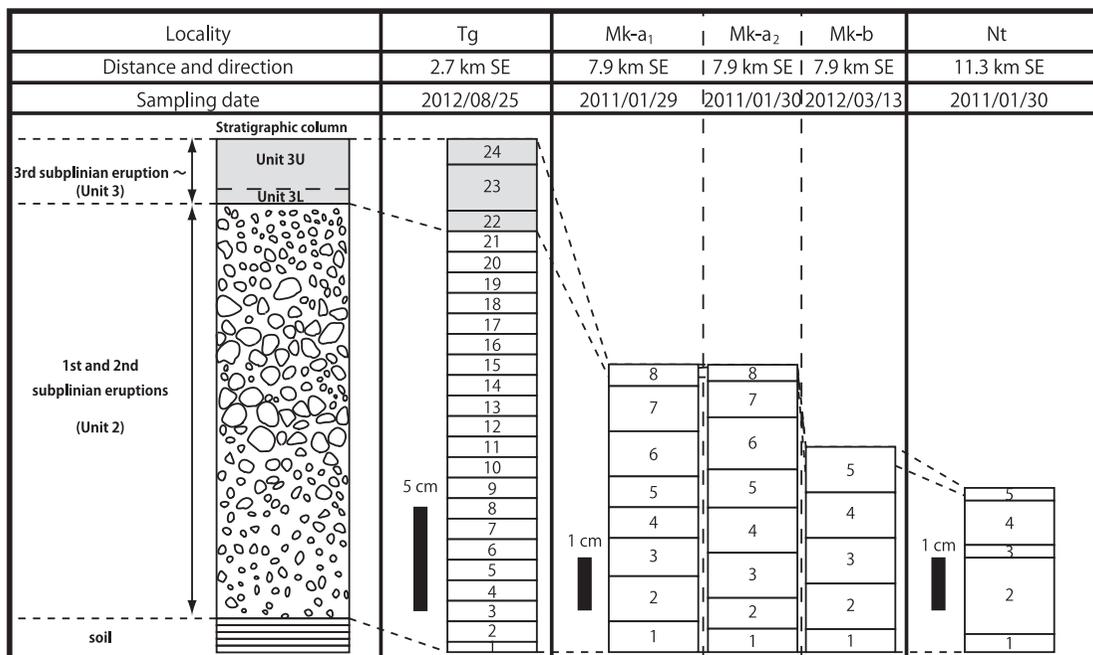


Fig. 5. Definitions and positions of separated layers in pyroclastic fall deposits of the 2011 Shinmoedake eruptions at Kirishima Volcanoes. The corresponding lines of the boundary between Unit 2 and Unit 3 include ambiguity due to sampling sections.

軽石層が存在していた。堆積物の最上部付近では、細粒な粒子が多く見られた (Fig. 4D, E)。

本研究では、降下火砕堆積物の粒度分布の垂直変化を詳しく解析するために、1枚の層を機械的に複数の区間に分けて連続的にサンプリングを行った (Fig. 5)。こうした手法を以下では連続サンプリング、また得られたサンプルを連続サンプルと呼び、次節ではそのサンプリング方法を詳述する。

### 5. サンプリング手法・結果

サンプリングは、火口から南東方向に延びる分布軸上の3地点で、2011年1月から2012年8月にかけて実施し、あわせて5つの連続サンプルが得られた。サンプリング地点および採取日は Figs. 1, 4, 5 に示した。

2011年1月の調査では、火口から7.9 km 地点の御池小学校で2箇所 (Mk-a<sub>1</sub>, Mk-a<sub>2</sub>; 層厚 7 cm)、火口から11.3 km 地点の夏尾小学校 (Nt; 層厚 4 cm) で連続サンプリングを行った。噴火から約1年経過した2012年3月の調査では、火口から7.9 km 地点の御池小学校 (Mk-b; 層厚 5 cm) で、噴火から約1年半経過した2012年8月の調査では、火口から2.7 km 地点の高千穂河原 (Tg; 層厚 25 cm) で同様に連続サンプリングを行った。なお、Mkの

サンプル名については、Mkの後に続く a は噴火直後、b は噴火から1年後というサンプリング時期を示す。Mk-aの後に続く下付の1は2011年1月29日のサンプルを、2は2011年1月30日のサンプルを各々示す。

連続サンプリングの方法は以下のとおりである。はじめに地面に垂直な面を切り出し、堆積物全体の層厚の測定を行った。堆積物の鉛直方向のコンタミネーションを防ぐため、最上部から順にブラシを用いて剥ぎ取るようにして厚さ方向に約1 cm 間隔のサンプリングを行った。下位層のサンプリングの際に上位層の堆積物が混入することを防ぐため、剥ぎ取る面積を小さくしながらサンプリングを行った。サンプリング面積は各層のサンプリング前に撮影した画像から計測した。

連続サンプリングの結果、Tgでは24層、Mk-a<sub>1</sub>およびMk-a<sub>2</sub>では8層、Mk-b および Nt では5層の連続サンプルを得た (Fig. 5)。また、サンプリングを行った最上面の面積は、Tgでは400 cm<sup>2</sup> (20 cm × 20 cm)、Mk-a<sub>1</sub>では500 cm<sup>2</sup> (25 cm × 20 cm)、Mk-a<sub>2</sub>では1200 cm<sup>2</sup> (60 cm × 20 cm)、Mk-b では500 cm<sup>2</sup> (25 cm × 20 cm)、Ntでは1200 cm<sup>2</sup> (60 cm × 20 cm) であった。また、連続サンプリングを行った各層の質量は、Tgでは119.2~428.8 g、Mk-a<sub>1</sub>では143.6~371.9 g、Mk-a<sub>2</sub>では86.2~896.3 g、Mk-b では

275.3~915.5 g, Nt では 69.9~443.0 g であった。

また、堆積物の経年変化を調べるため、火口から 7.9 km 離れた Mk-a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> と Mk-b の降下火砕堆積物の堆積物全体の質量および密度を計測した。測定方法は以下のとおりである。

はじめに、連続サンプルの各層を四角錐台と仮定し、連続サンプリング時に測定した各層の層厚および上面と下面の面積を用いて各層のサンプリング体積を算出した。測定によって算出したサンプルの体積を用いることにより、Mk-a<sub>1</sub>, Mk-a<sub>2</sub>, Mk-b の 3 サンプルの堆積物全体の単位面積当たりの質量および単位体積当たりの質量(堆積物の密度)を算出した。

堆積物密度計測の結果、単位面積当たりの質量は、Mk-a<sub>1</sub> で 5.4 g/cm<sup>2</sup>, Mk-a<sub>2</sub> で 5.4 g/cm<sup>2</sup>, Mk-b で 5.7 g/cm<sup>2</sup> という値がそれぞれ得られた。また、単位体積当たりの質量(堆積物の密度)は、Mk-a<sub>1</sub> で 0.8 g/cm<sup>3</sup>, Mk-a<sub>2</sub> で 0.8 g/cm<sup>3</sup>, Mk-b で 1.2 g/cm<sup>3</sup> という値がそれぞれ得られた。

## 6. 堆積物と噴火イベントの対応関係

先行研究でも、本研究でサンプリングを行った 3 地点で堆積物の層厚が測定されており、本研究の結果と一致する (Maeno *et al.*, 2014; Miyabuchi *et al.*, 2013; Nakada *et al.*, 2013)。Miyabuchi *et al.* (2013) の地点名と対比すると、Tg が Loc. 4, Mk が Loc. 8, Nt が Loc. 7 および Loc. 22 に対応する。これらの地点で先行研究の層序区分が概ね妥当であると判断したが、Miyabuchi *et al.* (2013) が SP2 よりもあとの噴出物と判断した最上部の細粒火山灰層については、SP2 に含まれる可能性があるかと判断した。Tg の Layer 22 が Miyabuchi *et al.* (2013) で記載されている黒色粗粒火山灰 (Unit 3 L) を含むこと (Figs. 4, 5) を踏まえ、本研究では Miyabuchi *et al.* (2013) の定義する Unit 2 および最上部の細粒火山灰層 (Tg の Layer 21~1, Mk および Nt) について詳細な分析を行い、噴火イベントとの関連について考察する。

## 7. 粒度分析手法と結果

各地点の各層の降下火砕堆積物の連続的な層序変化を調べるために粒径の粒度分析を行った。粒度分析に先立ち、サンプルは 110 °C で約 12 時間乾燥させた。各地点の各層のサンプルは  $-6\phi$  から  $2\phi$  の範囲 ( $1\phi$  間隔) でふるいを用いた。1つのふるいを用いる際、1分以上手動で振動を与えながら上下方向および水平方向に動かし、試料がふるいの全面に広がるように注意しながら乾式粒度分析を行った。得られた粒度分布から、Inman (1952) に基づいて  $Md_\phi$  と  $\sigma_\phi$  を算出した。その結果、連続サンプルの  $Md_\phi$  と  $\sigma_\phi$  の値は Fig. 6 に示す値が得られ

た。また、降下火砕堆積物中の  $Md_\phi$  と  $\sigma_\phi$  の値の鉛直変化は Fig. 7 に示す結果が得られた。

火口から 2.7 km 地点の Tg では、 $Md_\phi$  は  $-3.4 \sim -1.2$  の範囲で変化する 2 つのピーク (Fig. 7A 中矢印部分) が見られた。Tg の  $\sigma_\phi$  は 0.7~2.1 の値が得られ、中央部付近で  $\sigma_\phi$  は極大値をとることがわかる (Fig. 7A 丸部分)。

火口から 7.9 km 地点の Mk では、Tg ほど明瞭ではないものの、 $Md_\phi$  に類似した 2 つのピークが見られた (Fig. 7B 中矢印部分)。Mk-a<sub>1</sub> では、 $Md_\phi$ :  $-1.0 \sim 0.6$ ,  $\sigma_\phi$ :  $0.7 \sim 1.3$  の範囲の値が、Mk-a<sub>2</sub> では、 $Md_\phi$ :  $-1.0 \sim 1.5$ ,  $\sigma_\phi$ :  $0.4 \sim 1.2$  の範囲の値が、Mk-b では、 $Md_\phi$ :  $-1.3 \sim -0.3$ ,  $\sigma_\phi$ :  $0.7 \sim 1.1$  の範囲の値が各々得られた。また、Mk では Tg に比べて  $Md_\phi$  の値が全体的に大きくなっているが、 $\sigma_\phi$  の値は同程度であることがわかる。噴火から約 1 年後にサンプリングを行った Mk-b では、Mk-a に比べて層厚が減少しているにもかかわらず、同じ層序では  $Md_\phi$  および  $\sigma_\phi$  ともに同等の値が得られた。

火口から 11.3 km の Nt では、 $Md_\phi$  は  $-0.7 \sim 1.5$  の範囲で Tg や Mk に比べて緩やかに変化し、1 つの小さなピークがみられた。また、 $\sigma_\phi$  は 0.3~1.1 の値が得られた (Fig. 7C)。

Miyabuchi *et al.* (2013) は、Tg に相当する Loc. 4 では  $Md_\phi$ :  $-1.86 \sim -0.80$ ,  $\sigma_\phi$ :  $0.83 \sim 1.10$ , Mk に相当する Loc. 8 では  $Md_\phi$ :  $-2.18 \sim -1.05$ ,  $\sigma_\phi$ :  $0.97 \sim 0.99$ , Nt に相当する Loc. 7 および Loc. 22 では  $Md_\phi$ :  $-0.71 \sim -0.15$ ,  $\sigma_\phi$ :  $0.72 \sim 0.86$  という値を報告しており、本研究で得た粒度分析結果と同等である。また、先行研究では SP1 および SP2 で形成された降下火砕堆積物中では 1 箇所のみ堆積物の粗粒化が報告されていたものに対し、本研究で長時間分解能の粒度分析を行うことにより、Tg および Mk の 2 地点では 2 回の堆積物の粗粒化が示された。

## 8. 考 察

### 8-1 調査地点間の粒度変化の比較

Unit 2 の粒度の層序変化を調査地点間で比較するために、Unit 2 の上限を 1, 下限を 0 とする規格化を堆積物に施して粒度の層序変化の比較を行った (Fig. 8)。調査地点間の粒度の層序変化位置を比較したところ、Tg では規格化層準の 0.64 付近で  $Md_\phi$  が極大 (粒径が極小) となる顕著な粒度の変化を示した。一方、Mk および Nt は粒度変化が Tg に比べて顕著でないが、 $Md_\phi$  が極大 (粒径が極小) となることから類似した粒度変化を示した。

Mk と Nt で粒度変化が Tg に比べて顕著ではない原因として、堆積物の層厚が小さく、層数が少ないため、Tg に比べて分解能が低くなったことが考えられる。また、火口からの距離が大きくなるにつれて  $Md_\phi$  の値が増加、

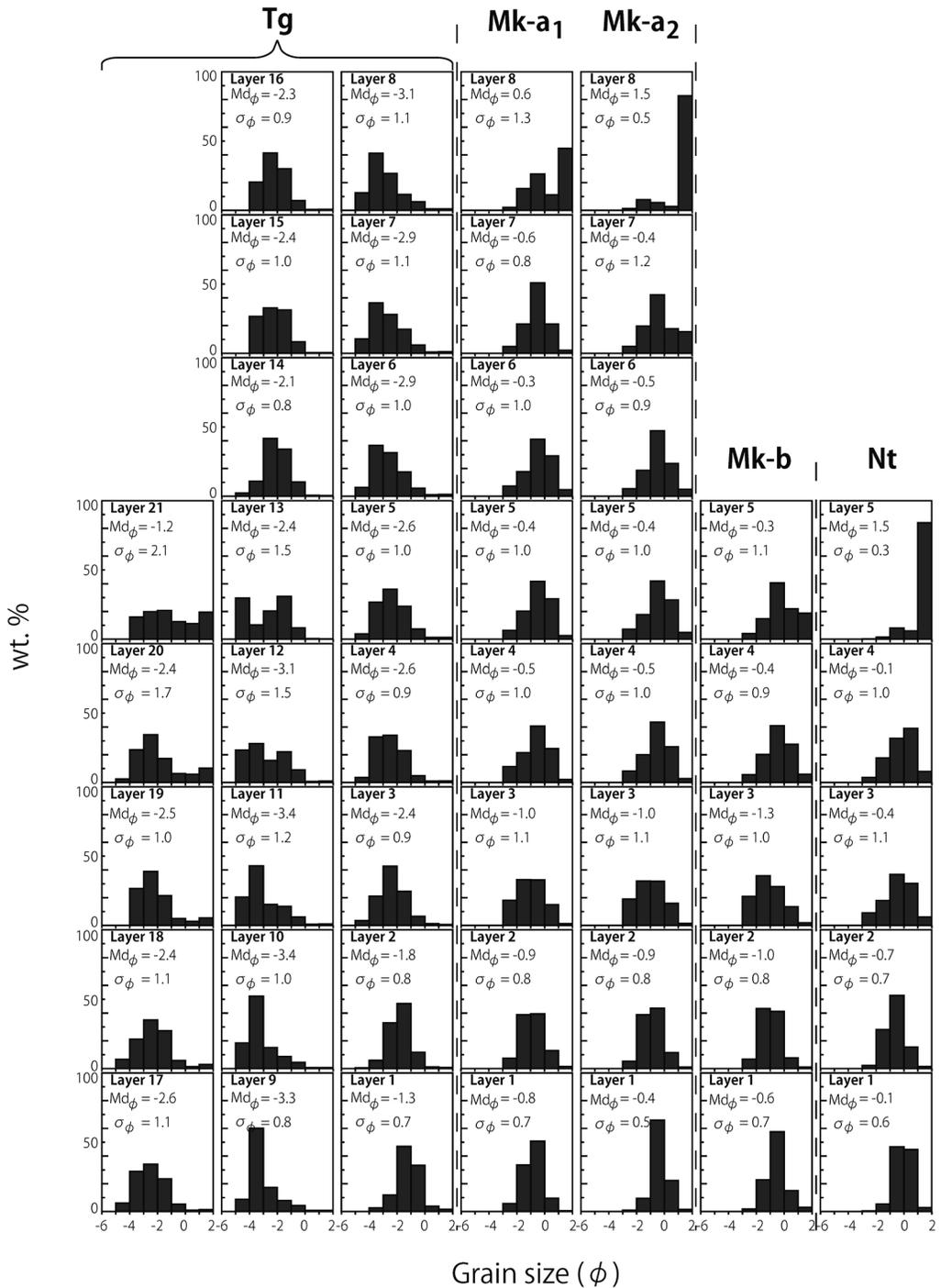


Fig. 6. Grain-size histograms coarser than  $2\phi$  of respective samples from the 2011 Shinmoedake deposits. Layer 22–24 samples are not analyzed because they are produced after 3<sup>rd</sup> subplinian eruption.

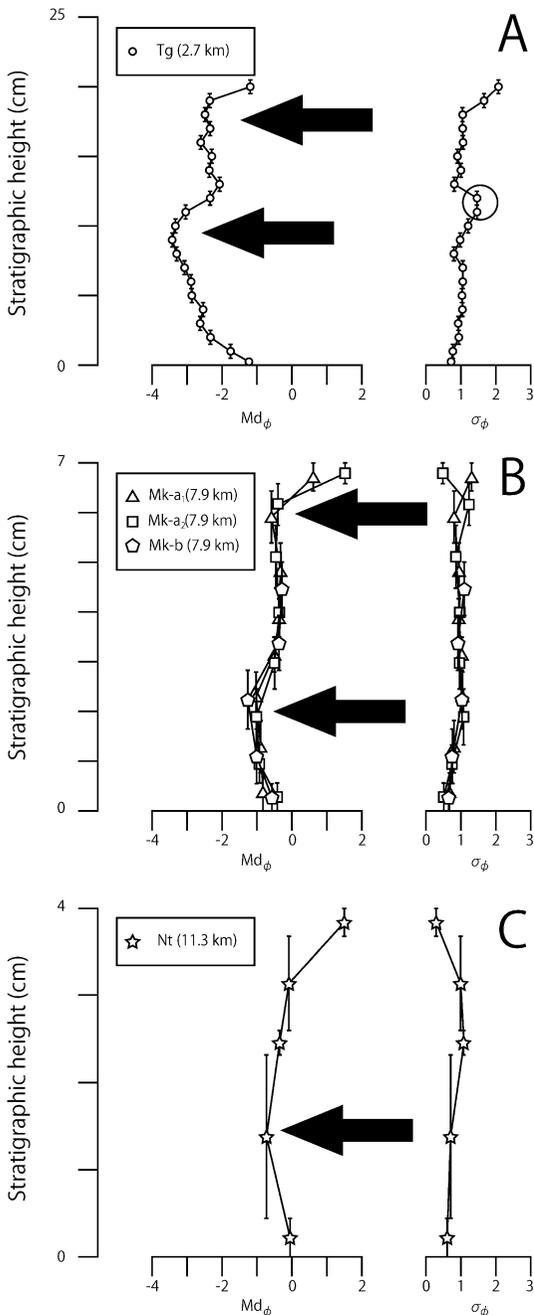


Fig. 7. Stratigraphic variations of  $Md_\phi$  and  $\sigma_\phi$  of the 2011 Shinmoedake eruption deposits. Characteristics of stratigraphic variations of  $Md_\phi$  show two peaks (positions of arrows) at Tg and Mk, and one weak peak at Nt, which corresponds to positions of materials consisting of coarsest grains. The circle in Fig. 7A corresponds to the peak position of  $\sigma_\phi$  at Tg.

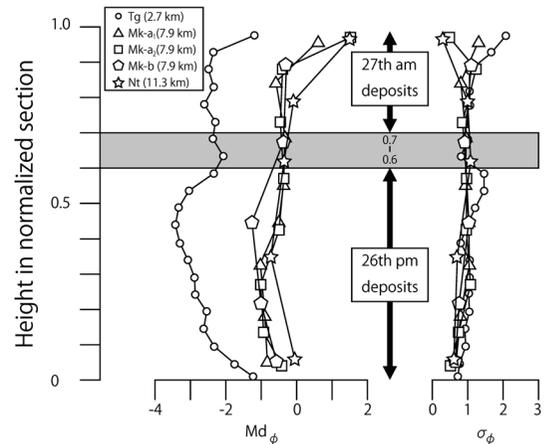


Fig. 8. Normalized stratigraphic variations in  $Md_\phi$  and  $\sigma_\phi$  of pyroclastic fall deposits associated with the 2011 Shinmoedake eruptions at Kirishima Volcanoes. The boundary between 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> subplinian eruptions is shown as gray-shaded area.

つまり細粒化が生じ、 $Md_\phi$ のとりうる範囲が小さくなっていることから、平均粒径が噴出物の輸送距離に依存して変化したことがわかる。

#### 8-2 1回の準プリニー式噴火における堆積物の粒度変化

得られた降下火砕堆積物中の粒度の層序変化を各観測事実と比較し、堆積物とSP1とSP2の各噴火イベントの対応関係について考察を行う。SP1とSP2は、噴煙の主軸方向 (Fig. 2)、噴煙柱高度 (新堀・福井, 2012 a, b; Fig. 2) および噴火中の地殻変動量から推定された新燃岳周辺の体積変化量 (Kozono *et al.*, 2013) が2回の噴火でほぼ同一である。このことから、堆積物の分布域がSP1とSP2で一致する場合、各地点における両噴出物の層厚は同程度と推定される。このように考えた場合、均質に見えるUnit 2の中央付近 (すなわち規格化層準0.5付近) にSP1とSP2の境界があると推測される。より詳細に見ると、赤外画像 (気象庁ホームページ<sup>1</sup>) から、火口直上 (九州上空) で扇状に広がる噴煙の中心角が2011年1月26日17:00~19:00は10~20度、2011年1月26日23:00から27日03:00は約20度、2011年1月27日04:00~05:00は約40度で観測され、SP1に比べて、SP2は噴煙が形成する火口を扇頂とした扇形の中心角が大きいことがわかる (Fig. 3)。この影響は、及川・他 (2013) で報告されているUnit 2のアイソマステータで見られる火口近傍東側の等値線図の広がりによって表れていると考えられる。噴出量が同じ場合、扇状の噴煙がSP1に比べてよ

り扇型の中心角が大きな SP2 では、特定の地点で堆積する噴出物の層厚は SP1 よりも小さくなると考えられる。ここで、堆積物の粒度変化 (Fig. 8) を見ると、SP1 と SP2 の堆積物の中央よりやや上部の規格化層厚 0.6-0.7 の位置に粒度変化の特徴的な境界が見られ、この境界が SP1 と SP2 による堆積物の境界と推定することができる。

噴火イベントと堆積物とを対応付けたことにより、SP1 と SP2 の各噴火によって生じた堆積物中の粒度の層序変化の様式が推定可能となる。Tg は、Miyabuchi *et al.* (2013) で Unit 3L と定義された SP3 のはじめに堆積した黒色粗粒火山灰層が存在するため、SP2 終了時に堆積した Unit 2 の最上部を認識することが可能である。このことから、Tg では粒度の層序変化の様式は SP1 と SP2 でほぼ共通し、1 回の噴火によって生じた噴出物は、初めに細粒粒子が堆積し、時間経過 (堆積の進行) に伴って粗粒化し、その後細粒化し、堆積プロセスが終了した、と考えられる。一方 Mk および Nt では、前述したように Mk-a および Nt の最上部に存在する細粒火山灰は、SP2 以降の噴出物を含む可能性があるため、厳密には SP2 の最後の部分のみ粒度は不明であるものの、全体としては Tg と類似した粒度の層序変化を示す。

### 8-3 堆積物の経年変化

火口から 7.9 km 離れた Mk-a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> と Mk-b の降下火砕堆積物のサンプリング時期には約 1 年の時間間隔があり、2 cm の層厚減少が認められ、最上部の細粒火山灰層は不明瞭になっていた。このような堆積物の見かけ上の変化をもたらした要因を調べるため、堆積物全体の質量および密度を比較することにより考察を行う。

Mk-a<sub>1</sub> および Mk-a<sub>2</sub> と Mk-b を比較した場合、1 年程度で約 2 cm の層厚減少が認められたにも関わらず、堆積物全体の単位面積当たりの質量はほとんど変化がなかった。また、Mk-b の堆積物全体の密度は、Mk-a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> に比べて大きい。このことから、堆積後約 1 年の時間間隔で堆積物の粒子間隙が減少したことが示唆される。また、Mk-a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> で見られた最上部の明瞭な細粒火山灰層が Mk-b では不明瞭になっていることから、細粒火山灰が堆積物内部へと移動し、粒子間隙へ充填されたことが考えられる。しかしながら、今回は繰り返し測定が行われていないため、今後の研究により測定の精度および粒子間隙の経年変化に関する議論の妥当性について検証を行う必要がある。

## 9. ま と め

新燃岳 2011 年噴火では 3 回の準プリニー式噴火が生じ、降下火砕堆積物が形成された。1 月 26 日と 27 日午前の 2 回の噴火イベントで形成された降下火砕堆積物に

対して高時間分解能での粒度分析を行った。その結果、新燃岳 2011 年噴火の 1, 2 回目の準プリニー式噴火の堆積物の鉛直方向の粒度変化の中で、火口からの距離に応じて降下火砕堆積物の Md<sub>φ</sub> の値が細粒側へシフトし、Md<sub>φ</sub> が 2 つまたは 1 つの粗粒化のピークを持つという類似性を示すことがわかった。最も時間分解能の高い火口から 2.7 km の高千穂河原においては、σ<sub>φ</sub> の値が 1 回の噴火で生じた降下火砕堆積物の最上部付近で上昇するという結果が得られた。得られた粒度変化を 2 回の噴火イベントと対応付けることで 2 回の噴火のイベント境界が推定され、各イベント中に細粒→粗粒→細粒 (逆級化→級化) と層序に応じて粒度が変化したと推定された。また、堆積物全体の層厚および重量の測定結果から、時間経過に伴って降下火砕堆積物は粒度の変化様式を保ちつつ粒子間隙が低下したことが示された。

## 謝 辞

東京大学の鈴木雄治郎助教には、火山噴出物の移動に関して、3 次元シミュレーションの結果からアドバイスをいただいた。産業技術総合研究所の古川竜太博士には、isopach maps のデータを提供していただいた。鹿児島大学の木下紀正名誉教授には、衛星画像を用いた噴煙の移流に関してアドバイスをいただいた。仙台管区気象台の吉開裕亮さん、九州大学の吉瀬毅さんには、現地調査の同行およびサンプリングの協力をしていただいた。九州大学の池田剛准教授、宮本知治助教、菅原雄博士 (現・土木研究所)、秋田大学の星出隆志助教、東京大学の市原美恵准教授には、研究に関する貴重な助言をいただいた。熊本大学の宮縁育夫准教授をはじめとする査読者の方々および火山編集委員の吉本充宏博士には、本論文を改定するにあたり大変貴重なご意見やご助言をいただいた。また、本研究の一部は故松本達郎名誉教授のご寄付による「松本達郎教授奨学資金」において実施された。本研究に関わっていただいた方々に対し、記して感謝の意を表す。

## 引用文献

- Carey, A. and Sigurdsson, H. (1987) Temporal variations in column height and magma discharge rate during the 79 A.D. eruption of Vesuvius. *Geol. Soc. Am. Bull.* **99**, 303-314.
- 福岡管区気象台・鹿児島地方気象台 (2012) 霧島山の火山活動解説資料 (平成 23 年 1 月)。火山活動解説資料 (平成 23 年 1 月)
- 下司信夫・宝田晋治・筒井正明・森 健彦・小林哲夫 (2010) 霧島火山 2008 年 8 月 22 日噴火の噴出物。火山, **55**, 53-64.
- 井村隆介 (1994) 霧島山の地質。東京大学地震研究所彙報, **69**, 189-209.

- 井村隆介・小林哲夫 (1991) 霧島火山群の最近 300 年の噴火活動. *火山*, **36**, 135-148.
- 井村隆介・小林哲夫 (2001) 霧島火山地質図 (5 万分の 1). 火山地質図 11, 地質調査所.
- Inman, D. L. (1952) Measures of describing the size distributions of sediments. *J. Sediment. Petrol.* **22**, 125-145.
- Kozono, T., Ueda, H., Ozawa, T., Koyaguchi, T., Fujita, E., Tomiya, A. and Suzuki, Y. J. (2013) Magma discharge variations during the 2011 eruptions of Shinmoe-dake volcano, Japan, revealed by geodetic and satellite observations. *Bull. Volcanol.* **75** : 695.
- Maeno, F., Nagai, M., Nakada, S., Burden, R.E., Engwell, S., Suzuki, Y. and Kaneko, T. (2014) Constraining tephra dispersion and deposition from three subplinian explosions in 2011 at Shinmoedake volcano, Kyushu, Japan. *Bull. Volcanol.* **76** : 823.
- Miyabuchi, Y., Hanada, D., Niimi, H. and Kobayashi, T. (2013) Stratigraphy, grain-size and component characteristics of the 2011 Shinmoedake eruption deposits, Kirishima Volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **258**, 125-145.
- Nagaoka, S. and Okuno, M. (2011) Tephrochronology and eruptive history of Kirishima volcano in southern Japan. *Quatern. Int.* **246**, 260-269.
- Nakada, S., Nagai, M., Kaneko, T., Suzuki, Y. and Maeno, F. (2013) The outline of the 2011 eruption at Shinmoe-dake (Kirishima), Japan. *Earth Planets Space*, **65**, 475-488.
- 及川輝樹・筒井正明・田島靖久・芝原暁彦・古川竜太・斎藤元治・池辺伸一郎・佐藤 公・小林知勝・下司信夫・西来邦章・東宮昭彦・宮城磯治・中野 俊・渡辺真人 (2013) 第 3 回火山巡回展霧島火山—ボラ (軽石) が降ってきた! 新燃岳の噴火とその恵み—, 地質調査総合センター研究資料集, **578**, 30-31, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 佐々木寿・磯部幸平・本間信一・阪上雅之・向山 栄・中田節也・小林哲夫・村上 亮 (2011) 霧島山新燃岳における斜め写真を用いた火口内溶岩の体積推定. 日本火山学会 2011 年秋季大会講演予稿集, 13.
- 新堀敏基・福井敬一 (2012a) 種子島・福岡レーダーで観測された 2011 年霧島山 (新燃岳) 噴火に伴う噴煙エコー頂高度の時間変化. 火山噴火予知連絡会会報, **108**, 189-196.
- 新堀敏基・福井敬一 (2012b) 種子島・福岡レーダーで観測された 2011 年霧島山 (新燃岳) 噴火に伴う噴煙エコー頂高度の時間変化 (その 2). 火山噴火予知連絡会会報, **109**, 173-178.
- Ueda, H., Kozono, T., Fujita, E., Kohno, Y., Nagai, M., Miyagi, Y. and Tanada, T. (2013) Crustal deformation associated with the 2011 Shinmoe-dake eruption as observed by tiltmeters and GPS. *Earth Planets Space*, **65**, 517-525.
- Walker, G.P.L. (1980) The Taupo pumice: product of the most powerful known (ultraplinian) eruption? *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **8**, 69-94.

(編集担当 吉本充宏)