



九州の火山地質学

# テフラ層序からみた霧島火山新燃岳 2011 年噴火の推移

宮 緑 育 夫  
花 田 大 輔  
新 美 洋  
小 林 哲 夫

**Tephrostratigraphic constraints on sequence of the 2011 Shinmoedake eruption at Kirishima Volcano, Japan**

**Yasuo Miyabuchi • Daisuke Handa • Hiroshi Niimi • Tetsuo Kobayashi**

みやぶち やすお : 熊本大学教育学部  
はなだ だいすけ : 南大隅町立第一佐多中学校  
にいみ ひろし : 九州沖縄農業研究センター  
こばやし てつお : 鹿児島大学大学院理工学研究科

霧島火山新燃岳の 2011 年噴火はわが国で近年発生した噴火の中で最大規模のものであった。この噴火は準プリニー式噴火から火口内での溶岩流出、さらにブルカノ式噴火へと推移した。本論ではテフラ層序学的研究によって明らかになった 2011 年新燃岳噴火活動の特徴について述べる。

## 1. はじめに

テフラ層序学的研究は火山噴火史解明を目的に行われることが多い<sup>[1, 2]</sup>が、現在発生している噴火活動の推移を明らかにする上でも有効な手段である<sup>[3, 4]</sup>。霧島火山新燃岳の 2011 年 1 月～8 月噴火は、わが国で最近 10 年間に起こった噴火の中で最大規模のもので、火口から 20 km を超える地域にまでテフラを飛散させるなど、周辺域に多大な影響を及ぼした。筆者らは、この噴火の発生直後から現地調査を開始し、テフラの分布や量、粒度組成、構成物質について明らかにした<sup>[5]</sup>。本論では、テフラの産状や層序などから推定される噴火推移について報告する。

## 2. 新燃岳 2011 年噴火の概要

霧島火山群のほぼ中央部に位置する新燃岳は安山岩質の成層火山で、山頂部に直径 800 m、深さ 180 m の火口を有している<sup>[6]</sup>。この火山は約 10.4 ka (較正暦年代、以下同様) の瀬田尾軽石の噴出でその活動を開始し<sup>[7]</sup>、その後も 5.6 ka の前山軽石の噴出<sup>[8]</sup>などの活動が認められている。1716～1717 年に起こった享保噴火は新燃岳における最大規模の噴火として知られており、火口の東方に降下軽石堆積物をもたらすとともに、火砕流も発生し、現在の山体の大部分はこの享保噴火によって形成されたと考えられている<sup>[9]</sup>。1959 年 2 月にも水蒸気爆発が発生し、西側斜面には長さ 500 m の割れ目火口が形成された<sup>[10]</sup>。

新燃岳では 2008 年 8 月から複数回の水蒸気噴火が起こっており<sup>[11]</sup>、国土地理院の GPS 観測によって 2009 年 12 月からは新燃岳の北西を圧力源とする山体膨張が認められた。2011 年の噴火活動は 1 月 19 日の小規模なマグマ水蒸気噴火によ



図1 霧島火山新燃岳における準プリニー式噴火 (2011年1月27日16時44分に新燃岳南西3 km付近から撮影).

て開始し、南東へ60 km離れた宮崎県日南市でも降灰が観測された<sup>[12]</sup>。1月26日7時31分に始まった小規模噴火は、14時49分に準プリニー式噴火に特徴づけられる本格的なマグマ噴火へと移行した。同日夕刻の噴煙高度は目視観測で火口縁上2000 mとされているが、気象レーダーによる噴煙エコー解析では8.3~8.5 kmに達したことがわかっている<sup>[13]</sup>。この準プリニー式噴火は強弱を繰り返しながら、1月27日朝まで続いた。同日15時41分に振幅40 Paの空振を伴う最初の爆発的噴火が発生し(図1)、噴煙高度は8.4 kmに達している<sup>[13]</sup>。なお、霧島火山においては、爆発地震を伴って湯之野空振計(新燃岳南西2.7 km)で20 Pa以上の空振を観測した場合に爆発的噴火と定義されている<sup>[12]</sup>ため、1月26日~27日の準プリニー式噴火は爆発的噴火とされていない。

1月28日の東京大学地震研究所による航空機観測では、新燃岳火口内に溶岩が出現し、南西斜面には火砕流の流下が確認された<sup>[14]</sup>。火口内の溶岩は1月30日に直径500 mにまで広がり、頂部は火口縁とおおよそ同じ高さにまで達し、溶岩のほぼ中央部からは複数の噴気が認められた。2月1日には規模の大きなブルカノ式噴火が発生し<sup>[15]</sup>、火口南西3.2 km地点まで0.7×0.5 mの大きさの噴石を飛散させるとともに、振幅458 Paに達する空振により8 km離れた地点の建物や乗用車の

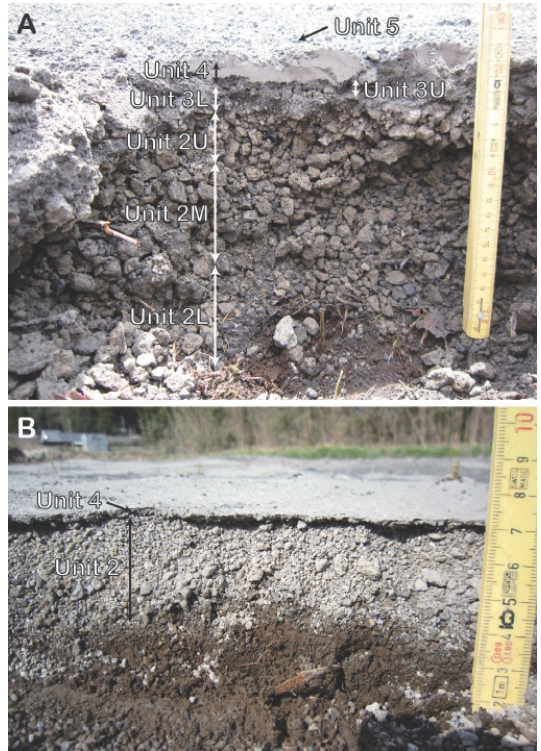


図2 新燃岳2011年噴出物とユニット区分。(A)新燃岳火口から南東2.7 km地点。(B)東南東10.9 km地点。

ガラスが割れる被害が認められた。その後も溶岩で満たされた山頂火口内でブルカノ式噴火が頻発したが、2月9日から噴火は断続的となった。

3月13日には最大規模のブルカノ式噴火が発生し、南東方向へ火山灰を飛散させ、太平洋岸でも降灰が観測された。その後は間欠的な小規模噴火が認められ、8月31日に最後の噴火が起こって9月7日まで続き、火口南西20 km付近にまで達する降灰が観察された。

### 3. テフラの層序・分布・特徴

以上述べたような一連の噴火活動により、霧島火山の南東方を中心とした地域に噴出物(降下テフラ)が堆積した。新燃岳南東2.5~3 km地点(高千穂河原周辺)において、2011年噴出物は5つのユニット(下位よりユニット1~5)に区分することができた。ユニット1は1月19日噴出物

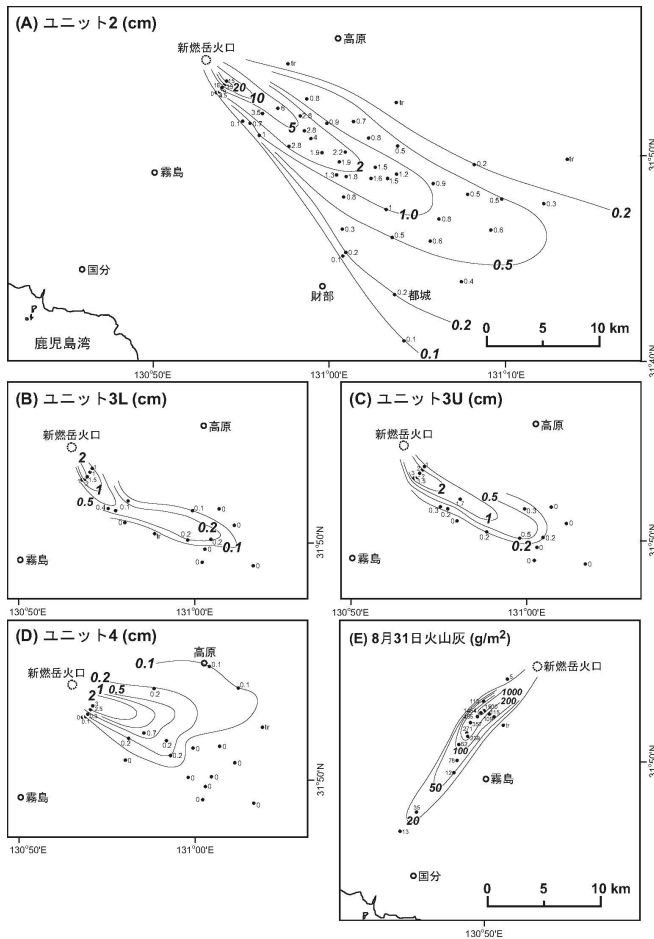


図3 新燃岳2011年テフラ各ユニットの分布 (Miyabuchi et al., 2013)<sup>[5]</sup>.

と考えられ、層厚 0.5 cm 以下の灰色降下火山灰である。全体的に淘汰の良い細粒火山灰であり、総量は 60,000 トンと見積もられている [16]。

ユニット 2 は 1 月 26 日午後から 27 日朝にかけての準プリニー式噴火による降下軽石堆積物で、2011 年噴出物の主体をなすテフラである。高千穂高原周辺では 4.5 ~ 25 cm の層厚を有しており、3 つのサブユニット（下位よりユニット 2L, 2M, 2U）に細分することができた（図 2A）。ユニット 2 に含まれる軽石は比較的発泡が良く、ガラスビーズ法 [17] によって測定した軽石の密度は 1.0 ~ 1.3 g/cm<sup>3</sup>（平均 1.1 g/cm<sup>3</sup>）であった。このユニットの最下部（2L）は、上位に比べて細粒で淘汰が良く、中央部（2M）は最も粗粒であることが特徴

である。火口から 7 km を超える遠方域では、ユニット 2 は単一の淘汰の良い降下軽石堆積物となり、複数のサブユニットに区分することはできない（図 2B）。他のユニットと異なり、ユニット 2 は火口から 20 km 以上の遠方まで追跡することが可能で、新燃岳南東 27 km の宮崎県都城でも 0.2 cm 程度の層厚を有しており（図 3A）、宮崎市（東方 55 km）や鹿児島県志布志市（南南東 50 km）にまで分布することが確認されている [12, 18]。気象レーダーによって観測された 8.5 km という噴煙高度 [13] は準プリニー式としてはそれほど大きいものではないが、噴煙は強い北西季節風に流されたため、ユニット 2 堆積物は主軸に沿って非常に細長い分布をしている（図 3A）。

ユニット3は、1月27日15時41分の爆発的噴火に伴う堆積物で、さらに下部(3L)と上部(3U)に分けられる。ユニット3Lは層厚2cm以下で、黒色粗粒火山灰を主体とする淘汰の良い堆積物である。このユニットの分布主軸は火口から7km付近までは南東方向であるが、さらに以遠では東南東方向へと変化している(図3B)。ユニット3Uは黄灰色軽石片からなり、火口から同じ距離ではユニット2噴出物よりも粗粒であるが、軽石片の密度は $1.0\sim 1.4\text{ g/cm}^3$ (平均 $1.2\text{ g/cm}^3$ )とユニット2のそれと大差はない。この堆積物は南東から東南東方向へ伸びる主軸をもって分布している(図3C)。

ユニット4噴出物はシルト以下の粒子が50%以上を占める細粒な灰白色火山灰で(図2)、1月28日~29日頃にかけて堆積したものと推察され、新燃岳から東南東方向を中心に確認された(図3D)。ユニット5は2月以降に発生した複数回のブルカノ式噴火による堆積物であり、筆者らが観察したものの大部分は3月13日噴出物(最大規模のブルカノ式噴火堆積物)と考えられる。この堆積物は中粒砂から粗粒砂を主体としており、灰色の新鮮な安山岩質岩片(密度: $1.6\sim 2.4\text{ g/cm}^3$ )が大部分を占め、スコリアも明瞭に含まれていることが特徴である。

筆者らは8月31日~9月7日噴火に伴う噴出物の調査も行った。この堆積物は、灰色の細粒火山灰からなり、大部分は8月31日に飛散したものである。上述したユニット1~5(火口から南東方を中心に分布)と異なり、8月31日噴出物は南西方向を主軸とし、新燃岳火口から20km付近まで分布することがわかった(図3E)。このユニットは小規模であるため、層厚を測定することができなかったが、単位面積あたりの堆積重量データから、噴出量は6500トン程度と見積もられた。

新燃岳2011年噴出物の等層厚線図をもとにFierstein and Nathenson (1992) [19]の方法を使用して、ユニットごとの噴出量を計算した結果、ユニット2は $0.0053\text{ km}^3$ 、ユニット3Lは $0.00018\text{ km}^3$ 、ユニット3Uは $0.00049\text{ km}^3$ 、ユニット4は $0.00058\text{ km}^3$ となり、ユニット2の噴出量は他の

ユニットに比べて1桁大きいことがわかった。しかしながら、筆者らが見積もったユニット2の噴出量は他の報告[14, 18, 20, 21]よりも1桁小さい。これは筆者らが2.5km以内の火口近傍域の堆積物を考慮していないためと考えられる。

#### 4. テフラの構成物質

新燃岳2011年噴出物の代表的な試料を乾燥後に $-5\phi\sim 5\phi$ ( $1\phi$ 間隔)のふるいを用いて分離した。それぞれのユニットの構成物を明らかにするために、 $4\phi$ ( $1/16\text{ mm}$ )より粗粒な各画分を実体顕微鏡下で観察した。それらの観察の結果、2011年噴出物は軽石片、スコリア片、岩片、鉍物片からなることがわかった。また、軽石片は灰白色(5Y7/1; マンセル方式の標準土色帖による色調)・縞状・黄白色(2.5Y5/1)・灰色(5Y5/1)という5種類の色調の粒子に細分された。岩片は結晶化や変質の程度により、新鮮なガラス質溶岩片、結晶化の進んだ新鮮な溶岩片、変質岩片に区分された。結晶片は斜長石・輝石・かんらん石・磁鉄鉍の単体結晶のほか、それらが融合したものやガラスが付着したのも認められた。各ふるい画分の200個以上の粒子を観察して、構成物の割合を算出した。

新燃岳2011年噴出物の構成物は粒径画分によって異なっていた(図4A)。ユニット1や3Lを除くと、 $0\phi$ ( $1\text{ mm}$ )より粗粒な粒子の大部分は軽石片からなり、 $-1\phi$ ( $2\text{ mm}$ )より細粒な画分には多量の岩片が含まれていた。鉍物片は $-2\phi$ ( $4\text{ mm}$ )より細粒な画分に認められ、より細粒な部分ほど割合が高くなっていた。一方、ユニット1と3Lではすべての粒径画分で岩片が主要構成物であった。

粒度分析結果と各ふるい画分の構成物割合(図4A)を組み合わせて、新燃岳噴出物それぞれのユニット全体の構成物割合を求めた(図4B)。テフラの構成物は降下ユニットによって異なり、時間的な変化が認められた。ユニット1堆積物では、岩片が77%(新鮮な岩片58%、変質岩片19%)と大部分を占めていたが、軽石片は13%と少なかった。

ユニット2下部(2L)噴出物の大部分は岩片(52%)と軽石片(41%)で構成されており、ユニッ

(A)

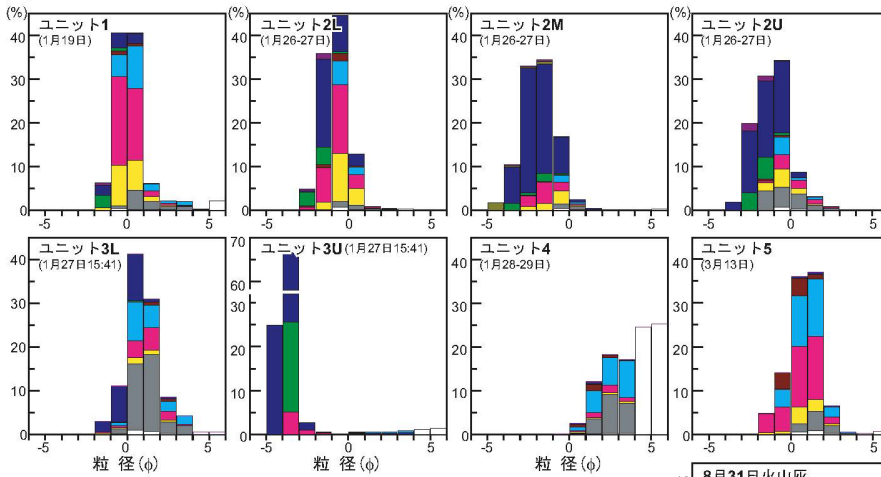
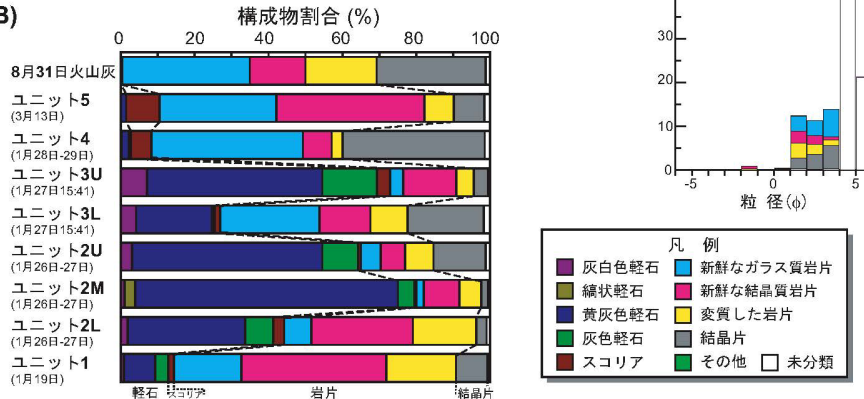


図4 2011年新燃岳噴出物の粒度組成と構成物質 (Miyabuchi et al., 2013<sup>[5]</sup>を 改 変)。 (A) 各ユニットの粒度組成と構成物。ユニット 1, 2L, 2M, 2U, 3U, 4 は新燃岳南東 2.8 km地点, ユニット 3Lは南東 13.4km地点, ユニット 5 は南東 7.8 km地点, 8月 31日火山灰は南西 6.2 km地点の試料。 (B) 構成物質の時間的变化。

(B)



ト 2 中央部 (2M) で軽石の割合はもっとも高く、80%に達していた。縞状軽石はユニット 2 中央部だけで確認された。ユニット 2 上部 (2U) での軽石片の割合は 64%と中央部よりも低くなっていた。ユニット 3L では、軽石片の割合がユニット 2 に比べて減少し (25%), 岩片の割合が 51%と高くなっていた。一方、ユニット 3U においては再び軽石片の割合が増加していた (69%)。また、ユニット 1 から 3U にむかって、灰白色軽石片が増加する傾向が認められた (図 4B)。

ユニット 3U とユニット 4 の間で、構成物に大きな違いが観察された。ユニット 4 噴出物は、軽石片がわずかに含まれるものの (3%), 大部分は岩片 (52%) と結晶片 (39%) で構成されていた。ユニット 5 では岩片の割合がさらに増加した

(80%)。スコリアはユニット 1~5 の各ユニットに含まれていたが、その割合は時間とともに漸増していた (ユニット 1 で 2%, ユニット 5 で 9%)。一方、8月 31日火山灰には軽石片は含まれず、岩片 (69%)・結晶片 (30%)・スコリア (<1%) からなり、ユニット 1 と同程度の変質岩片 (19%) が認められた。

### 5. テフラ層序と構成物質の変化からみた 2011 年新燃岳噴火の推移

周辺域のテフラ層序と構成物の時間的变化から、霧島火山新燃岳 2011 年噴火の推移は次のように推定される。一連の噴火活動は 1 月 19 日の小規模噴火で始まった。このイベントでは岩片に富む (噴出物全体の 77% を占める) 細粒火山灰 (ユニッ

ト1)を噴出した。変質した岩片の割合はユニット1全体の19%程度であり、それらは火道周辺に存在していた変質した岩石に由来するものと考えられる。一方、新鮮な岩片の割合は58%で、それらは今回の噴火に関連する新しいマグマの一部が火道上部で固結したものであろう。また、軽石(13%)やスコリア(2%)といった発泡したマグマ物質も1月19日噴出物には含まれており、ユニット1全体に占める本質物質の割合は70%程度であった。

1月26日7時31分に開始した噴火は14時49分にマグマ噴火へと移行して、高度8.5kmにまで達した噴煙<sup>[13]</sup>は南東方向へと流れ、この夕方からの噴火により降下軽石を主体とするユニット2噴出物をもたらされた。ユニット2下部には軽石以外に、火道上部で固結していたマグマに由来すると考えられる新鮮な岩片が52%程度含まれていた。ユニット2中央部は2011年新燃岳噴出物の主体をなすテフラであり、軽石の割合が構成物全体の8割を占めていて、多量の発泡したマグマが1月26日~27日噴火の最盛期に噴出したことがわかる。また、この最盛期噴出物(ユニット2中央部)にのみ縞状軽石が含まれている。ユニット2上部では結晶片の割合が増加することから、1月26日~27日噴火の末期には、マグマだまり中の結晶化の進んだ部分が噴出したと考えられる。なお、ユニット2噴出物をもたらした噴火は、分散度と破碎度の関係<sup>[22-24]</sup>からも準プリニー式噴火であったことが示されている<sup>[5]</sup>。

1月27日15時41分には2011年活動で最初の爆発的噴火が起こった。粗粒な降下火山灰であるユニット3L噴出物は、この15時41分噴火初期の堆積物であり、ガラス質溶岩片(27%)を主体とする多量の新鮮な岩片を含んでいた。筆者らは火口南東約3kmの高千穂河原で15時29分頃に新鮮な溶岩片(最大粒径1.3cm)が降下していることを確認している。こうした事実は、15時41分の爆発的噴火の直前に火道上部にあるマグマの一部が固結していたか、あるいは新燃岳火口内にすでに溶岩が存在していたことを示唆している。実際に溶岩が目視で確認されたのは1月28日である

が、1月27日夜にすでに火口内に最大径100mほどの溶岩が存在したことが陸域観測衛星だいち(ALOS)による画像解析で判明している<sup>[25]</sup>。こうした観測結果も15時41分噴火の前に火口内に溶岩が存在していたことを支持している。火口内の溶岩がプラグの役割を果たしたために大きな空振を伴う1月27日15時41分の爆発的噴火が発生したのと考えられ、後述するようにユニット3L噴出物は3月13日噴出物(ユニット5:最大のブルカノ式噴火に伴う火山灰)と岩相が酷似することから、15時41分からの活動はブルカノ式噴火によって開始し、その後多量の降下軽石(ユニット3U)を放出する準プリニー式噴火へと移行したと推定されている<sup>[5,14]</sup>。

1月26日~27日噴火と1月27日15時41分噴火に伴う噴出物の主体は黄灰色~灰色の軽石であり、そのSiO<sub>2</sub>含有量は57~59wt.%と報告されている<sup>[26-29]</sup>。また2011年新燃岳テフラには灰白色軽石も含まれ、そのSiO<sub>2</sub>含有量は61~63wt.%とされている<sup>[26-29]</sup>。黄灰色~灰色軽石として噴出した安山岩質マグマ(SiO<sub>2</sub>含有量57~59wt.%)は、SiO<sub>2</sub>含有量62~63%の低温珪長質マグマとSiO<sub>2</sub>含有量53~54%の高温苦鉄質マグマの混合物と考えられている<sup>[29,30]</sup>。さらに、低温珪長質マグマは灰白色軽石として噴出したが、高温苦鉄質マグマは単独では噴出していないことがわかっている<sup>[28]</sup>。一連の噴火のトリガーとなった2種類のマグマの混合は、1月26日噴火の直前と考えられている<sup>[27-29]</sup>が、磁鉄鉱のゾーニングプロフィールからは噴火の数年前あるいはもっと以前から複数回起こっていたとも推測されている<sup>[29]</sup>。そのようにして生成された混合マグマは噴火前にマグマだまりの上部に存在し、2011年噴火の初期から黄白色軽石として多量に噴出したと考えられる。一方、低温側の単成分である灰白色軽石<sup>[27-29]</sup>の割合は、1月26日~27日噴火(ユニット2:2%)から1月27日15時41分噴火(ユニット3U:7%)に向かって増加していった。このことは、噴火の進行とともに発泡した低温マグマ(灰白色軽石)が吸い出されたことを意味している。

新燃岳山頂火口内での溶岩流出は1月27日に始まり<sup>[25]</sup>、2月2日まで続いた。噴出した溶岩の総量は斜め空中写真の解析から $1.43 \times 10^7 \text{ m}^3$ と見積もられている<sup>[31]</sup>。1月28日～29日にかけては溶岩流出とともに細粒火山灰の噴出も起こり、火口から南東方向にユニット4噴出物をもたらした。ユニット4火山灰の構成物はユニット2や3Uとかなり異なっており、軽石の含有量が急減し(3%)、溶岩片(52%)と結晶片(39%)を主体としていた。とくに新鮮なガラス質溶岩片が多く(41%)、それは噴火直前に火口内で固結した溶岩に由来するものと考えられ、溶岩流出とともに非常に粉碎された溶岩片と結晶片を噴出したことが1月28日～29日噴火の特徴である。また、発泡した噴出物ではスコリアが主体となっていることも1月27日以前の噴火とは異なる点である。

2011年2月1日以降、溶岩で満たされた新燃岳火口内でブルカノ式噴火が頻発した。2月1日のブルカノ式噴火<sup>[15]</sup>では、火口南西3.2 km地点まで $0.7 \times 0.5 \text{ m}$ の大きさの噴石を飛散させるとともに、8 km離れた地点の建物や乗用車のガラスが割れる被害が認められた。2月9日以降、噴火回数は減少していったが、2月14日には北東16 km地点まで直径数 cmの火山礫を飛散させる噴火もあった。最大規模のブルカノ式噴火は3月13日に発生し、中砂から粗砂サイズの火山灰を主体とするユニット5噴出物を火口から南東方向の太平洋沿岸にまでもたらした。溶岩片が噴出物の80%(結晶化の進んだ岩片40%とガラス質岩片32%)を占めており、スコリア(9%)もユニット5噴出物には認められた。火山灰中のスコリアの割合は2011年2月から3月にかけて増加したという報告もある<sup>[32]</sup>。こうした構成物分析の結果は、3月13日噴火が溶岩片を噴出しただけでなく、マグマだまりから発泡した苦鉄質マグマも放出したことを示唆している。

2011年4月以降、新燃岳における噴火の頻度は一月あたり数回程度とかなり減少し、最後の噴火は8月31日～9月7日にかけて起こった。その最後の活動では約6500トンの細粒火山灰を火口か

ら南西方向に噴出したが、その火山灰中に発泡した物質はほとんど観察されなかった。8月31日火山灰は岩片が69%を占め、その大部分は新鮮なガラス質溶岩片であった(35%)が、変質した岩片も19%含まれていた。この変質岩片の割合は1月19日のユニット1噴出物と同じ程度である。4月以降、噴火回数が減少して、マグマは固結するとともに火道周辺では噴気や熱水によって変質作用も進んだのであろう。最後の8月31日噴火では新鮮な溶岩片と変質岩片と一緒に放出されたことが特徴である。

## 6. おわりに

霧島火山新燃岳における2011年噴火活動は、小規模なマグマ水蒸気噴火が始まり、その後、準プリニー式噴火から火口内での溶岩流出、さらにブルカノ式噴火へと推移し、同火山南東方向を中心とした地域にテフラを飛散させた。テフラ層序学的調査により、その主要噴出物は5つのユニットに区分され、各ユニットの構成物等の変化から噴火推移の詳細を読み取ることができた。

これまで多くのテフラ研究では、噴出物の分布(分散度)と粒度特性(破碎度)との関係<sup>[22-24]</sup>から噴火様式の推定が行われてきた。今回の2011年新燃岳噴火においてもユニット2およびユニット3Uをもたらした活動は準プリニー式噴火に分類され、観察事実とも調和した結果となっているが、ブルカノ式噴火の産物であるユニット3Lとユニット5はこの方法では分類できないことが判明している<sup>[5]</sup>。このことは、観測結果が得られていない噴火の場合、その噴出物の調査だけでは噴火様式の分類が難しいことを意味している。今後はブルカノ式噴火を含めた噴火様式の分類方法を検討する必要がある、テフラ研究の課題の一つといえる。

謝辞：現地調査の一部は中田節也氏、金子隆之氏、長井雅史氏、外西奈津美氏とともに実施した。また、気象庁霧島山(新燃岳)総合観測班事務局には噴火に関する有益な情報を提供していただくとともに、現地調査の際にお世話になった。本研

究は、科学研究費補助金（特別研究促進費）「2011年霧島火山（新燃岳）噴火に関する総合調査」（代表：中田節也）を使用して行った。

## 参考文献

- [1] Miyabuchi, Y. (2009) : A 90,000-year tephrostratigraphic framework of Aso Volcano, Japan. *Sedimentary Geology*, 220, 169-189.
- [2] Nagaoka, S. and Okuno, M. (2011) : Tephrochronology and eruptive history of Kirishima volcano in southern Japan. *Quaternary International*, 246, 260-269.
- [3] 遠藤邦彦・宮地直道・千葉達朗・隅田まり・坂爪一哉 (1984) : 1983年三宅島噴火の火山灰層位学的研究. *火山*, 29, S184-S207.
- [4] 大野希一・国方まり・鈴木正章・西村裕一・長井大輔・遠藤邦彦・千葉達朗・諸星真帆 (2002) : 有珠山2000年噴火でもたらされた火砕物の層序. *火山*, 47, 619-643.
- [5] 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. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 258, 31-46.
- [6] 井村隆介・小林哲夫 (2001) : 霧島火山地質図. 火山地質図11, 地質調査所.
- [7] 井村隆介・古賀政行 (1992) : 霧島火山および入戸火砕流の<sup>14</sup>C年代. *火山*, 37, 99-102.
- [8] 井ノ上幸造 (1988) : 霧島火山群高千穂複合火山の噴火活動史. *岩鉱*, 83, 26-41.
- [9] 井村隆介・小林哲夫 (1991) : 霧島火山群新燃岳の最近300年間の噴火活動. *火山*, 36, 135-148.
- [10] 気象庁編 (2013) *日本活火山総覧 (第4版)*. 1498p.
- [11] 下司信夫・宝田晋治・筒井正明・森健彦・小林哲夫 (2010) : 霧島火山新燃岳2008年8月22日噴火の噴出物. *火山*, 55, 53-64.
- [12] 福岡管区気象台・鹿児島地方気象台 (2012) : 平成23年(2011年)の霧島山の火山活動. 31p.
- [13] 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 - . *験証時報*, 77, 139-214.
- [14] Nakada, S., Nagai, M., Kaneko, T., Suzuki, Y. and Maeno, F. (2013) : The outline of the 2011 eruption at Shimoe-dake (Kirishima), Japan. *Earth, Planets and Space*, 65, 475-488.
- [15] Maeno, F., Nakada, S., Nagai, M. and Kozono, T. (2013) : Ballistic ejecta and eruption condition of the vulcanian explosion of Shinmoedake volcano, Kyushu, Japan on 1 February 2011. *Earth Planets Space*, 65, 609-621.
- [16] 小林哲夫・田島靖久・筒井正明・山越隆雄・木佐洋志 (2011) : 霧島火山・新燃岳2011年マグマ噴火の先駆的噴火. *日本地球惑星科学連合2011年大会予稿集*, SVC070-P06.
- [17] 佐々木龍男・勝井義雄 (1981) : ガラスビーズを使った軽石の密度測定法. *火山*, 26, 117-118.
- [18] 古川竜太・下司信夫・中野俊・星住英夫・宝田晋治・竹内晋吾・土志田潔・田島靖久・筒井正明 (2011) : 霧島山新燃岳火山2011年1月噴出物の緊急調査. *日本地球惑星科学連合2011年大会予稿集*, SVC050-05.
- [19] Fierstein, J. and Nathenson, M. (1992) : Another look at the calculation of fallout tephra volumes. *Bull. Volcanol.*, 54, 156-167.
- [20] 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 Shinmoedake volcano, Japan, revealed by geodetic and satellite observations. *Bull. Volcanol.*, 75, 695.
- [21] 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.
- [22] Walker, G.P.L. (1973) : Explosive volcanic eruptions - a new classification scheme. *Geologische Rundschau*, 62, 431-446.
- [23] Walker, G.P.L. (1980) : The Taupo pumice: products of the most powerful known (ultra-plinian) eruption? *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 8, 69-94.
- [24] Wright, J.V., Smith, A.L. and Self, S. (1980) : A working terminology of pyroclastic deposits. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 8, 315-336.
- [25] 安藤忍・桜井利幸・藤原善明・福井敬一 (2011) : 「だいち」が捉えた2011霧島新燃岳の噴火経過. *日本地球惑星科学連合2011年大会予稿集*, SVC070-P29.
- [26] 下司信夫・斎藤元治・東宮昭彦・宮城磯治・古川竜太・中野俊・星住英夫・宝田晋治 (2011) : 霧島火山新燃岳2011年1月噴火を駆動したマグマ. *日本地球惑星科学連合2011年大会予稿集*, SVC050-04.
- [27] 星出隆志・寅丸敦志・池端慶・入山宙 (2011) : 新燃岳2011年噴火噴出物の斑晶・マイクロライト・発泡組織から見た、マグマ混合および上昇プロセス. *日本地球惑星科学連合2011年大会予稿集*, SVC070-P12.
- [28] Suzuki, Y., Yasuda, A., Hokanishi, N., Kaneko, T., Nakada, S. and Fujii, T. (2013) : Syneruptive deep magma transfer and shallow magma remobilization during the 2011 eruption of Shinmoedake, Japan - Constraints from melt inclusions and phase equilibria experiments. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 257, 184-204.
- [29] Tomiya, A., Miyagi, I., Saito, G. and Geshi, N. (2013) : Short time scales of magma-mixing processes prior to the 2011 eruption of Shinmoedake volcano, Kirishima volcanic group, Japan. *Bull. Volcanol.*, 75, 750.
- [30] 斎藤元治・下司信夫・篠原宏志 (2011) : 鉱物・メルト包有物分析から推定される霧島火山新燃岳2011年噴火のマグマ混合・脱ガス課程. *日本火山学会2011年秋季大会講演予稿集*, 30.
- [31] 佐々木寿・磯部浩平・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.
- [32] Suzuki, Y., Nagai, M., Maeno, F., Yasuda, A., Hokanishi, N., Shimano, T., Ichihara, M., Kaneko, T. and Nakada, S. (2013) : Precursory activity and evolution of the 2011 eruption of Shinmoedake in Kirishima volcano - insights from ash samples. *Earth, Planets and Space*, 65, 591-607.

