

# 火山灰の XRF 化学組成分析に基づく本質物質寄与の見積もり

—有珠火山 2000 年噴火を例として—

嶋野岳人\*・中田節也・金子隆之

東京大学地震研究所

## Evaluation of magmatic contribution to the 2000 eruption at Usu Volcano, North Japan, by XRF bulk ash composition analysis

Taketo Shimano\*, Setsuya Nakada and Takayuki Kaneko

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

### Abstract

XRF analysis of bulk ash composition offers information on magma contribution easily and quickly for monitoring temporal changes of eruptions. The 2000 eruption at Usu Volcano, North Japan, started at ca. 13 : 10 on March 31. Ash emitted on March 31, April 1, 2, and 4 were collected to investigate temporal changes in bulk compositions by XRF analysis. All the ash samples are plotted in a composition range between essential material and basement rocks. Among all of the ash, that of the March 31 eruption, the largest one, has the nearest composition to the essential material. These data indicate that the ash is a mixture of the essential material and basement rocks, and that the nearer the ash composition is to the essential material, the larger is the magma contribution to the eruption.

**Key words:** XRF analysis, ash composition, essential material, Usu Volcano

### 1. はじめに

有珠火山は 2000 年 3 月 31 日 13 : 10 ごろ、1977-78 年の活動以来 22 年ぶりに北西山麓から噴火を開始した (N 火口群)。3 月 31 日の活動では、もくもくした渦により特徴づけられる黒色噴煙が形成され、噴煙は高度約 3000 m に達した (川辺, 2000, 第 2, 4 図)。翌 4 月 1 日には有珠火山北麓の金比羅山斜面に新たな火口 (K 火口群) が形成された。以降、両火口群ともコックステールジェットを伴う高度 1000~2000 m の噴煙に特徴づけられる間欠的な爆発を繰り返した。4 月半ば以降では、火口内の泥溜まりで巨大な気泡がはじけて生じると考えられる炸裂型噴煙 (中田, 2001) が認められ、主に土砂が放出された。その後も、マグマの地表近くへの貫入が継

続した結果、地盤の隆起によって道路や多くの家屋が破壊され、住民は重大な損害を被った。

当初、これらの噴火はマグマが直接関与しない“水蒸気噴火”であると考えられた。しかし、その後の東宮ほか (2000) の詳細にわたる噴出物の分析により、3 月 31 日の噴火がマグマの直接関与した“マグマ水蒸気噴火”あることが明らかになった。噴火による被害を軽減する上では、一連の活動にマグマが関与しているのか否かを迅速に見極め、噴火の推移を予測することが非常に重要である。本研究では、迅速かつ簡便に全岩化学組成の測定を行うことができる蛍光 X 線分析法により、火山灰の分析を行って本質物質 (マグマ) の関与について考察した。

\*e-mail: shimano@eri.u-tokyo.ac.jp

## 2. 分析試料

火山灰試料は、火山灰層の分布域と噴煙の流下方向の対比が正確に行われた3月31日、4月1日、2日、4日に堆積した火山灰を使用した。それぞれ、有珠山の北東、南東、東南東、北方に分布軸をもつ火山灰に相当する (Fig. 1)。試料採取は、ビデオ映像等の観察記録と衛星画像 (ASTER) をもとにした推定 (浦井ほか, 2000; ホームページで公開) に基づき、全て噴火直後の4月8日~9日に火山灰分布域の主軸上で行った (Table 1; 以下、それぞれ 3/31NE, 4/1SE, 4/2ESE, 4/4N 火山灰)。ほとんどの試料は雪上に堆積していたため、立木からの落葉を除けば、下位からの土壌の混入などは少ないと考えられる。火山灰は大半が細粒 (<1mm) で、様々な産状の岩種により構成される (白色~淡灰色軽石, 暗灰色溶岩片, 赤褐色軽石, 変質岩片, 無色~淡褐色透明ガラス, 遊離結晶など)。このうち、3/31NE 火山灰はとくに白色~淡灰色の低発泡軽石を多く含む。また、4/4N 火山灰は不定形の外形を呈する凝集火山灰として採取された。

軽石試料は3月31日に噴出したと考えられ、4月5日に洞爺湖畔で採取された。矩形~多少円磨された形状で淡灰色を呈する。細粒な磁鉄鉱結晶が目立ち、径1mm以下の球形の気泡を多く含む。この軽石は、過去の噴出物とは異なる全岩組成 (中川ほか, 2000), 磁鉄鉱組成 (東宮ほか, 2000) をもつことから、2000年噴火で噴出した本質物質であることが明らかにされた。

## 3. 分析方法

火山灰全量組成の測定は、東京大学地震研究所の蛍光X線分析装置 (Phillips社製PW2400) を用い、中田ほか (1997) と同様に作成した1:5ガラスビード用の検量線をもとに行った。火山灰試料は細粒部分の欠損を避けるため、水による洗浄を行わず、約110°Cで約1日乾燥させた火山灰をそのまま用いた (植物の葉などのゴミのみピンセットで除去)。分析用のガラスビードは、試料: 四ホウ酸リチウム=1:5 (重量比) をめのう乳鉢で混合し、Pt製るつぼで約1,200°Cに加熱溶融して作製した。剥離剤としてヨウ化リチウム水溶液をビード作製時に数滴加えた。なお、水蒸気噴火の火山灰試料はしばしば黄鉄鉱や変質鉱物等を多く含む。このような試料はPt製るつぼと合金を作らないように、あらかじめ酸化処理をした。また、数試料についてはtotal値を評価するため、カールフィッシャー法により、含水率の測定も行った。

## 4. 分析結果

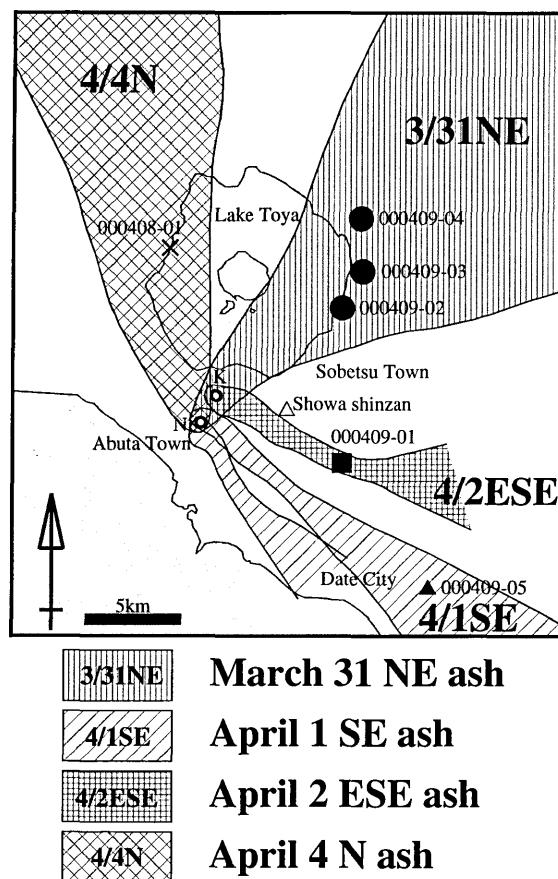


Fig. 1. Locality map of ash samples of the 2000 eruption at Usu Volcano. Distribution outlines are from Urai *et al.* (2000) drawn on the basis of satellite image analyses (ASTER; Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer) on April 3 and 7, 2000.

火山灰試料の測定結果を Table 1 に示した。どの火山灰試料も total 値が低く 93.57~96.18 重量% であり、含水率は H<sub>2</sub>O (+) で 2~3 重量% であった。また、3/31 の本質物質 (軽石) のみの含水率は H<sub>2</sub>O (+) で約 0.4 重量% であった。火山灰には、今回の分析元素以外の揮発性元素 (硫黄や炭素など) 等を多く含むカオリナイトやスメクタイトなどの変質鉱物が見られ (八幡, 2000), 低い total 値は新鮮な岩石中の H<sub>2</sub>O と変質岩片中の変質鉱物の存在を反映したものであると考えられる。以下では、主要 10 成分の合計値を 100 重量% に換算した値を用いる。

3/31NE, 4/1SE, 4/2ESE, 4/4N 火山灰はそれぞれ SiO<sub>2</sub> が約 64, 61, 57, 59 wt.% であった (Fig. 2)。火口からの距離の異なる 3 箇所 (000409-02, -03, -04; 単位面積当たりの堆積重量は遠藤ほか (2001) でそれぞれ約 1,000, 250, 100 g/m<sup>2</sup>) で試料の採取を行った 3/31NE 火山灰については全ての SiO<sub>2</sub> が約 64 wt.% であった。このこと

Table 1. Column height (max), erupted mass, bulk ash composition, H<sub>2</sub>O content, and least square results of 3/31NE, 4/1SE, 4/2ESE and 4/4N ash. \*Data from Endo *et al.* (2001).

Ash name	height (m)*	mass (104ton)*	Sample No.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	H <sub>2</sub> O (+)	Essential	Base rock	pl
3/31NE	3000	21	000409-02	61.54	0.65	16.40	6.43	0.18	1.74	4.88	3.00	0.82	0.15	95.77	2.17	70	27	3
3/31NE	3000		000409-03	61.95	0.64	16.32	6.39	0.18	1.71	4.93	3.12	0.80	0.15	96.18	-	71	27	3
3/31NE	3000		000409-04	61.15	0.66	16.41	6.69	0.18	1.69	5.06	3.00	0.79	0.14	95.76	-	67	30	3
4/1SE	1000-2000	73	000409-05	57.25	0.80	17.13	7.76	0.18	2.05	6.34	1.97	0.65	0.12	94.25	-	49	45	7
4/2ESE	1000-2000		000409-01	53.58	0.92	17.38	9.56	0.26	2.24	7.18	1.83	0.49	0.13	93.57	2.51	20	76	4
4/4N	1000-2000		3	000408-01	55.41	0.82	18.14	8.20	0.20	2.36	6.38	1.52	0.50	0.14	93.68	3.08	40	50
4/5-Oct.	<1000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

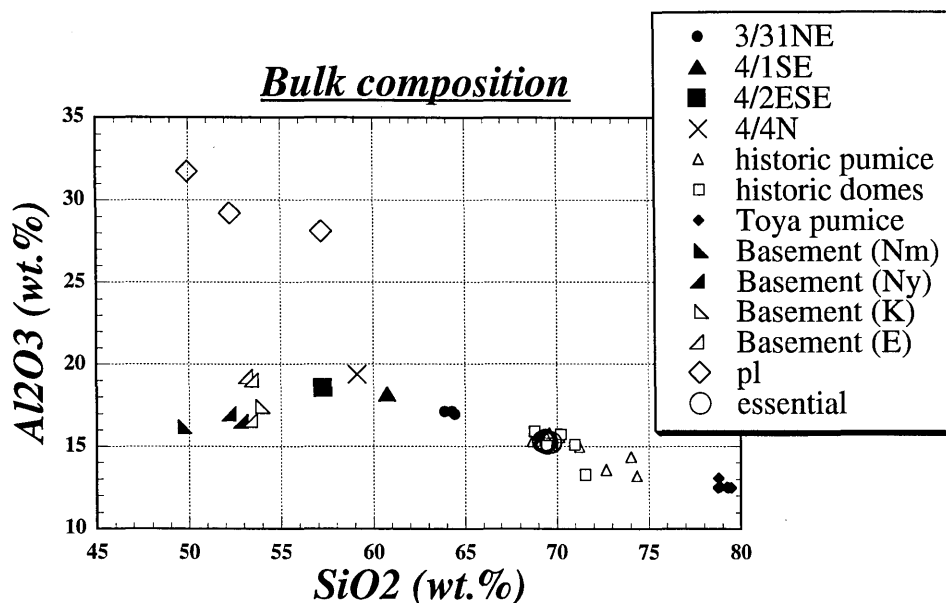


Fig. 2. Representative Harker's diagram (SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) of the 2000 ash samples compared with essential pumice (Nakagawa *et al.*, 2000) and older products (Katsui *et al.*, 1978, Machida *et al.*, 1987; Minakami *et al.*, 1951; Oba, 1966; Yokoyama *et al.*, 1973). Nm: Nishimaruyama, Ny: Nishiyama, K: Kompirayama, E: East flank of Mt. Usu.

から、少なくとも 3/31NE 火山灰の組成は、火山灰の運搬・堆積時の影響は少なく、火口噴出時の組成を保持しているものと考えられる。4月1日以降の火山灰についても、複数地点での比較は出来ないが、3/31NE 火山灰より火口近傍での堆積量が多いことから（遠藤ほか，2001），運搬・堆積時の影響はさらに小さかったと考えられる。以上のことから、本測定で得られた結果は火山灰放出時の火山灰組成をほぼ保持していると考えられる。

## 5. 議 論

今回測定した火山灰の組成は直線状のトレンドを示すことが特徴である。火山灰の構成粒子は主に白色～淡灰色軽石と暗灰色溶岩片からなり、これら2種の岩質はそれぞれ本質物質と基盤を構成する玄武岩質溶岩とよく似ている。そこでまず、火山灰組成トレンドがこれら2端成分の混合によって出来た可能性を検討する。

珪長質端成分としては本質物質以外に、洞爺降下軽石（火山ガラス）、歴史噴火の軽石（非常に発泡がよい）が同一直線の延長上の珪長質側に並び、珪長質側の端成分の候補として挙げられる。しかし、3/31NE 火山灰にはこれらの過去の噴火による軽石が鏡下では少量しか確認されないこと（東宮ほか，2000）から、これらが主成分として含まれているとは考えにくい。一方、苦鉄質端成分に関しては、基盤の玄武岩質溶岩以外に、遊離結晶として火山灰中に認められる斜長石などが挙げられる。しかし、これらの含有粒子数も少ない。以上のことから、火山灰組成の直線状トレンドは、主に今回噴出したマグマ（本質物質）と火口付近を構成する基盤岩（玄武岩質溶岩）の混合によるトレンドであると結論づけられる（Fig. 2）。

つぎに、火山灰組成から、この噴火でのマグマの寄与について評価する。噴火開始直後に噴出した 3/31NE 火山灰の組成は最もマグマの値に近く、次いで 4/1SE、

4/4N, 4/2ESE の順にマグマ組成から遠ざかるという傾向が認められる。また, total 値はこの順に低くなる傾向がある。以上の事実は, 3/31NE 火山灰が4月の火山灰より多くのマグマ物質を含み, 4月の火山灰の方が変質した岩片を多く含んでいたことを示している。端成分として, 本質物質組成, 噴出火口近くの玄武岩質溶岩組成, 斜長石を用いた10成分最小二乗法によるマスバランス計算では, 3/31NE 火山灰の約7割がマグマで, 4月の火山灰(5割未満)よりも多いという結果が得られた(Table 1)。これは洗浄した3/31NE 火山灰の粒子数計測によって求めたマグマの割合(約半分)が4月の火山灰よりも多いという結果(東宮ほか, 2000)とも傾向としては調和的である。すなわち, より高い高度まで達し, より暗い灰色を呈した3月31日の噴火による噴煙は, それ以降の噴火の噴煙に比べて, よりマグマの寄与の大きい噴火によるものであったと考えられる。

## 6. 噴火推移のモニター手法として

噴火の推移を予測するためには, しばしば地震活動や地殻変動などがモニターされている。これらの手法は, 地下での物質の移動(マグマの上昇, 地下水の移動など)や物質の状態変化(マグマの発泡, 固化など)を, 間接的ではあるが, ほぼリアルタイムに観測しているという点で非常に強力である。一方, 地下で移動する物質が「何であるのか」をリアルタイムで特定することは, 実際に噴出物を手にしない限り困難である。しかし, 大量のマグマ噴出に先立ってごく少量のマグマが放出されることがあり(Nakada *et al.*, 1995), こうした先行するマグマの情報を迅速に引き出して準リアルタイムにモニターすれば, この情報を噴火推移を予測するために活用することができる。

有珠山1944年の噴火では火山灰の湿式全量組成分析によるマグマの寄与の評価が行われ, 昭和新山の成長がほぼ完了した噴火の後期ほど, 火山灰へのマグマの関与が大きかったことが明らかにされた(Minakami *et al.*, 1951)。また, 九重火山1995年噴火では火山灰から発泡したガラスを分離して計数することにより, 火山灰へのマグマの寄与が評価された(波多江ほか, 1997)。しかし, これらの手法は時間を消費する上, 分析者や試料の状態による系統的差異が生じやすいこと, 水洗行程があるために細粒粒子の欠損を伴うという問題点がある。

一方, ガラスビードによる蛍光X線分析では, 火山灰を全体として測定するために, 個々の粒子の情報が得られないという欠点がある。したがって, 火山灰未知試料はマグマの寄与の「大きさ」を評価する前に構成粒子の

鑑定を行って, 端成分の吟味を十分に行う必要がある。とくに, 本質物質と過去の噴出物の特徴が似ている場合には, 東宮ほか(2000)のように, ガラスや結晶の組成・組成プロファイル, 粒子形状などから, 各構成粒子と過去の噴出物との対比をした上で, 本質物質を同定しなければならない。しかし, 予めこれらの特徴を押さえておけば, このガラスビードによる蛍光X線分析法は, 比較的分析者による系統差が低く, かつ迅速に放出火山灰中の本質物量を見積もることができる。また, 水洗せずに試料を分析できることから, 細粒成分に富む火山灰についてもこの手法が適用できる。以上の点から, ガラスビードによる蛍光X線分析法は, 火山灰放出を伴う噴火の推移をほぼリアルタイムで継続的にモニターする手段として有効であると考えられる。

## 謝 辞

北海道大学の中川光弘博士には3月31日噴出した本質物質の試料を分けていただきました。日本大学の犬野希一博士には, 火山灰の詳細な分布状況について教えていただきました。また, 査読者の中井俊一助教授, 安田敦博士には, 有益なコメントをしていただきました。以上の方々に深く感謝いたします。

## 引用文献

- 遠藤邦彦・大野希一・国方まり・諸星真帆・鈴木正章・西村裕一・長井大輔・千葉達朗・陶野郁雄, 2001, 有珠山2000年噴火におけるマグマ水蒸気爆発。日本大学文学部自然科学研究所(研究紀要), 36, 65-73。
- Katsui, Y., Y. Oba, K. Onuma, T. Suzuki, Y. Kondo, T. Watanabe, K. Niida, T. Uda, S. Hagiwara, T. Nagao, J. Nishikawa, M. Yamamoto, Y. Ikeda, H. Katagawa, N. Tsuchiya, M. Shirahase, S. Nemoto, S. Yokoyama, T. Soya, T. Fujita, K. Inaba and K. Koide, 1978, Preliminary report of the 1977 eruption of Usu Volcano, *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, 18, 385-408。
- 川辺禎久, 2000, 2000年3月31日有珠山噴火(速報), 地質雑, 106, VII-VIII。
- 波多江憲治・渡辺公一郎・渡辺一徳・筒井智樹・本村慶信, 1997, 九重火山1995-96年噴火に伴う火山灰中の発泡ガラス含有量の経時変化, 火山, 42, 345-353。
- 町田 洋・新井房夫・宮内崇裕・奥村晃史, 1987, 北日本を広く覆う洞爺火山灰, 第四紀研究, 26, 129-145。
- Minakami, T., T. Ishikawa and K. Yagi, 1951, The 1944 eruption of Volcano Usu in Hokkaido, Japan, *Bull. Volcanologique*, 2, 45-157。
- 中田節也, 2001, 有珠山2000年噴火の推移, 地震研究所彙報, 本号。
- Nakada, S., Y. Motomura and H. Shimizu, 1997, Manner of magma ascent at Unzen Volcano (Japan), *Geophys. Res. Lett.*, 22, 567-570。
- 中田節也・安田 敦・藤井敏嗣, 1997, 10:1希釈のガラスビードを用いた岩石の主成分・微量成分元素の蛍光X線分析,

火山灰の XRF 化学組成分析に基づく本質物質寄与の見積もり—有珠火山 2000 年噴火を例として—

- 斑晶の起源と噴火のメカニズム—雲仙普賢岳の場合—, 平成 7 年度～平成 8 年度科学研究費補助金基盤研究 (B) (2) 研究成果報告書, 4-13.
- 中川光弘・和田恵治・石塚吉浩・工藤 崇・吉本充宏・北川淳一・平賀正人・清野寛子・外狩英狩, 2000, 有珠火山 2000 年噴火: 噴出物の時間変化と本質マグマ, 日本火山学会講演予稿集, 190.
- Oba, Y., 1966, Geology and petrology of Usu Volcano, Hokkaido, Japan, *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, **13**, 185-236.
- 東宮昭彦・宮城磯治・星住英夫・川辺禎久・山元孝広, 2000, 有珠火山 2000 年噴火の本質物質, 日本火山学会講演予稿集, 30.
- 浦井 稔・伊藤順一・川辺禎久・加藤雅胤, 2000, 衛星リモートセンシングによる有珠山 2000 年噴火に伴う降灰分布, 日本火山学会講演予稿集, 28.
- 八幡正弘, 2000, 2000 年有珠噴火のマグマ水蒸気—水蒸気爆発に伴う噴出物中の石質岩片組成, 日本火山学会講演予稿集, 32.
- 横山 泉・勝井義雄・大場与志男・江原幸雄, 1973, 有珠山—火山地質・噴火史・活動の現状および防災対策, 北海道防災会議, 札幌, 254 pp.

(Received March 12, 2001)

(Accepted May 15, 2001)