

有珠火山2000年3月31日噴火とその本質物

東宮昭彦¹ 宮城磯治² 星住英夫¹ 山元孝広² 川辺禎久¹ 佐藤久夫¹

Akihiko TOMIYA, Isoji MIYAGI, Hideo HOSHIZUMI, Takahiro YAMAMOTO, Yoshihisa KAWANABE and Hisao SATOH (2001) Essential material of the March 31, 2000 eruption of Usu Volcano: Implication for the mechanism of the phreatomagmatic eruption. Bull. Geol. Surv. Japan, vol.52(4/5), p. 215 - 229, 13 figs., 3 tables.

Abstract: The 2000 eruption of Usu Volcano, Japan, started with a phreatomagmatic explosion at the north-east foot of the volcano on March 31. This first explosion was the largest and the most important one. After a course of petrographical and geochemical analyses, we identified essential materials in the eruptive products that consist of various types (essential, accessory, accidental) of rock fragments. In the March 31st eruptive products, there is a pumice fall (Us-2000pm) with maximum grain size of 2 cm. It is considerably fresh in appearance and its magnetite composition is not similar to those of all pumices from Usu Volcano. Therefore, we conclude that the pumice is not accidental (e.g., resedimented deposits of the 1977 product) but essential. In the ash fall, we found fresh volcanic glass (Us-2000g) with many needle microlites and spherical microbubbles. This type of glass composed of about a half of the March 31st ash. Because the Us-2000g glass is similar to the Us-2000pm pumice in petrological characters, this glass is also essential material. The March 31st phreatomagmatic eruption is characterized by the following special features; (1) a large amount of essential material is in the products; (2) black (ash-rich) and high eruption cloud was maintained for hours; (3) spontaneous fragmentation is inferred at deeper level than the aquifer. Thus, we propose that this eruption is a kind of phreatoplinian eruption. We also discuss the relationship between the magma of the 2000 eruption and those of the pre-2000 eruptions. Deduced from similarity of zoning profiles of plagioclase phenocrysts and of oxygen isotopic compositions, we conclude that the Us-2000 magma is also a member of the series of magmas since the 1663 eruption.

要 旨

有珠火山2000年噴火では山麓でマグマ水蒸気爆発／水蒸気爆発が繰り返り起こった。その中で、特に3月31日に起こった最初の爆発が最大かつ最も重要なイベントであった。そこで、このときの噴出物に特に着目して岩石学的・地球化学的分析を行なった。そして、雑多な構成物からなるマグマ水蒸気爆発の噴出物の中から「本質物質」を見つけ出すとともに、噴火のメカニズムに関する考察を行なった。

まず、3月31日の噴出物の中には最大粒径2cm程度の軽石(Us-2000pm)が含まれていた。この軽石は、非常に新鮮であること、磁鉄鉱斑晶の化学組成が以前噴出した軽石のものとは異なること等から判断して、今回活動したマグマに由来する本質物質である。次に、3月31日火山灰の中には、多数の微結晶と球状気泡で特徴付けられる新鮮な火山ガラス(Us-2000g)がおよそ半分含まれていた。その岩石学的特徴がUs-2000pmと一致することから、この

火山ガラスも本質物質である。

3月31日のマグマ水蒸気噴火は、(1) およそ半分に達する多量のマグマ物質が噴出物中に含まれていたこと、(2) 真っ黒な噴煙が継続的に高空まで噴き上がっていたこと、(3) マグマが地下水に接触するよりも深いところで既に破碎が始まっていたと考えられること、などから、水蒸気プリニー式噴火であった可能性がある。

2000年噴出物とこれまでの噴出物とを比較することにより、2000年に活動したマグマの位置付けについても考察した。斜長石斑晶のzoning profile、酸素同位体比などから判断して、2000年マグマも1663年以来一連のマグマによってもたらされたと考えられる。

1. はじめに

2000年3月31日、有珠火山が噴火を開始した(口絵写真, 第1図)。有珠火山は最近300年ほどの間、およそ数十年に一度の割合で活発に噴火を繰り返してきた(曾屋ほ

¹地球科学情報研究部門 (Institute of Geoscience, GSJ)

²深部地質環境研究センター

(Research Center for Deep Geological Environments, GSJ)

Keyword : Usu Volcano, Hokkaido, phreatomagmatic eruption, essential material, petrography, geochemistry, pumice, ash, fragmentation, volcanic glass

か,1981;第1表). 歴史時代の噴火はいずれもデイサイト質ないし流紋岩質マグマの活動であり,噴火のパターンはおよそ次の2つに大別できる:

(1) 山頂でのプリニー式噴火で始まり,火砕流(あるいは火砕サージ)を流下させ,最後に溶岩ドーム(あるいは潜在ドーム)を形成するタイプ;

(2) 山麓でのマグマ水蒸気爆発で始まり,広範囲に多数の火口・隆起域を出現させた後,最後に潜在ドーム(あるいは溶岩ドーム)を形成するタイプ.

2000年噴火はこのうち後者のタイプであった.

有珠火山の噴火では,山頂から起こったらプリニー式,山麓から起こったらマグマ水蒸気爆発(または水蒸気爆発),という“経験則”がこれまでのところ成り立っている(第1表). 山麓の方が地下水が多い(特に洞爺湖に近い側)ことを考えると納得できる結果のように思えるが,実はマグマと地下水の接触から爆発に至るまでのメカニズムは具体的には説明されていない. そこで,マグマ水蒸気爆発のメカニズムや,地下深部(マグマ溜まり)からのマグマの上昇プロセスなどについて検討するために,今回の噴火の噴出物について物質学的に調べることを行なった.

2. 2000年噴火の推移

有珠火山の2000年噴火は3月31日に西山西麓から開始した. その後,噴火地点を移動しながらマグマ水蒸気爆発ないし水蒸気爆発を繰り返し,多数の火口を形成した(口絵写真). 火口群は2つの地域に分けられ,それぞれ西山西麓火口群および金比羅山火口群と呼ばれた(宇井・総合観測班地質グループ, 2000). 4月中旬頃からは爆発は弱まってきたが,西山西麓を中心とした顕著な地殻変動が隆起速度を減じつつも7月頃まで引き続き進行し(e.g., 西村ほか, 2000),隆起量は最大で約60mに達した(長谷川ほか, 2000).

一連のマグマ水蒸気爆発の中でも3月31日の噴火は,

最初の爆発であること,規模が最大であること,火山灰中に新鮮なガラスを多量に含んでいたこと,などから最も重要なイベントであると考えられる. そこで,本論文では特にこの3月31日噴火に着目することにする.

3月31日噴火は13:07に始まった(川辺ほか, 2000). 噴煙は初めは白かったが,次第に黒くなった. 14時頃には非常に活発に黒煙を上げ(第1図),その最盛期には噴煙の高さは3000m以上に達した. 何度か盛衰を繰り返しつつ活動は17時頃まで続いた. 以下では,このときの噴火による噴出物について議論する.

3. 2000年噴火の噴出物

3.1 2000年噴火の噴出物概説

3月31日の噴火では,約12万トン(火口周辺の堆積物を含む; 宝田ほか, 2001)の火山灰と,少量の軽石が放出された. 第2表に,噴出物の一覧を示す. 軽石は,火口に近い陸上に落下していたものと,洞爺湖畔の波打ち際に漂着していたもの(通称“漂着軽石”;第2図)とが確認されている. 軽石の降下量はごくわずかであり,現在までに確認されている露頭の中に軽石層として認識することはできない. 火山灰は,雑多な種類の粒子で構成されており,本質・類質・異質物質の混合物である. これらの噴出物に関しては,発見当時から以下の疑問が呈されており,それぞれ解決する必要があった.

- “漂着軽石”は本質物質か?
- 火山灰には何が入っていてどれが本質物質か?
本質物はどのくらい入っているか?
- 本質火山灰と軽石とは同じ起源か?

これらの疑問を調べるために岩石学的・地球化学的分析を行なったが(東宮ほか, 2000; 佐藤ほか, 2000; 宮城ほか, 2000),これについては4章で述べる. 本章ではまず,各噴出物の顕微鏡および肉眼による観察(形態観察)の結果(星住ほか, 2000)について述べる.

第1表 有珠火山の歴史時代の噴火活動(曾屋ほか (1981) などに基づく).

Table 1 Historic eruptions of Usu Volcano (From Soya *et al.* (1981) and others).

噴火年	噴火間隔	前兆地震の期間	場所	活動内容の概要	テフラ体積 (km ³)	形成ドーム
1663	数千年	3日間	山頂	プリニー式,火砕サージ,(ドーム?)	2.5	?(※)
1769	106	期間不明	山頂	プリニー式,火砕流,ドーム	0.11	小有珠
1822	53	3日間	山頂	プリニー式,火砕流,ドーム	0.28	オガリ山
1853	31	10日間	山頂	プリニー式,火砕流,ドーム	0.35	大有珠
1910	57	6日間	山麓(北)	水蒸気爆発,ドーム	0.003	明治新山(潜在)
1943-45	33	6ヶ月間	山麓(東)	水蒸気爆発/マグマ水蒸気爆発,火砕サージ,ドーム	0.001	昭和新山
1977-78	32	32時間	山頂	プリニー式,水蒸気爆発/マグマ水蒸気爆発,ドーム	0.09	有珠新山(潜在)
2000	22	4日間	山麓(北西)	マグマ水蒸気爆発/水蒸気爆発,ドーム	0.001	名称未定(潜在)

(※)小有珠ドームは1663年形成との説もある.

有珠火山2000年3月31日噴火とその本質物（東宮 ほか）

第2表 2000年3月31日降下火山灰及び漂着軽石の特徴と1977年輕石との比較。

Table 2 Characterization of the 2000 eruptive products and comparison with the 1977 pumice.

2000年3月31日の火山灰						
	含有量*	形状	発泡度/発泡形態	色調	石基鉱物	起源
火山ガラス[G]	~50%	湾曲した面に囲まれた多面体	細かく(0.05-0.1mm程度)球状に発泡する. 発泡度は様々.	発泡の良いものは白色, 悪いものは灰色	斜長石・鉄鉱物を多量に含む	本質
火山ガラス[T]	<3%	フレーク状・T字状・平板状, 一部やや円磨した多面体.	よく発泡する. 一部細かく繊維状に発泡する.	無色透明, 一部褐色半透明.	ほとんどなし	異質 (洞爺火砕流?)
結晶片[X]	~30%	斜長石・斜方輝石・単斜輝石・鉄鉱物. まわりに火山ガラスが付着する場合あり.				本質~異質
岩片[L]	~20%	やや円磨した多面体	大部分は緻密	赤褐色・黒色・緑灰色	結晶質	類質~異質 (変質岩が多い)
2000年3月31日の軽石						
漂着軽石		多面体~やや角のおちた多面体(平板状のものが多い)	細かく球状に発泡する. 発泡度はよい.	灰白色	斜長石・鉄鉱物を多量に含む	本質
参考: 1977年輕石						
Us-1977-II, Us-1977-III		多面体	細かく球状~チューブ状に発泡する. 比重0.6~1.7**	白色~灰白色	少量の斜長石・鉄鉱物(土)を含む(ユニットごとに量が異なる)	

*0.15 - 0.25mm粒子でのおおよその含有率, **新井田ほか(1982)による.

3.2 2000年噴出物の形態的特徴

3.2.1 降下軽石

3月31日噴火の翌々日である4月2日に, 3月31日降下火砕物の主軸(宝田ほか, 2001)が通る洞爺湖の南東岸



第1図 2000年3月31日噴火が最盛期に差し掛かった頃の灰黒色噴煙. 撮影時刻=14h03m, 撮影者=川辺, 撮影地点=サイロ展望台(火口から北に約8km).

Fig. 1 Eruption cloud of the March 31, 2000 eruption at the climactic stage with dark-grey color and large ascending rate. Taken by Kawanabe at 14h03m from the Silo Viewpoint (about 8 kilometers north from the vent).

に, 直径2cm以下の発泡した灰白色の軽石が漂着しているのが山元によって発見された. この軽石は, その産状から“漂着軽石”と呼ばれ, その後“Us-2000pm”と命名された(第2図; 第2表). 漂着軽石は, 3月31日から4月2日の降灰分布域を考慮すると, 3月31日の噴火で湖面に落下したものが湖岸に打ち寄せられたものであろう. 湖に降下した火砕物のうち, 水よりも軽いものだけが漂着したものと判断される. 漂着軽石の最大粒径は南岸の壮瞥温泉周辺で約2cm, 東湖畔では約6mmと給源から離れるに従い減少する. 灰白色を呈し, 外形はやや扁平である(第3図). 軽石は細かく等方状に発泡している(第4図; 詳細は4章を参照).

また, 同じく4月2日, 火口(N1; 5月22日火山噴火予知連絡会資料)から東北東3.7kmの有珠火山観測所付近で, 降下火山灰とともに数個の軽石および岩石片が山元・川辺・宝田によって発見された. 最大粒径は約1cmで, 鋭利な破断面を持つ. その後, 噴火が下火になって火口のさらに近くにまで調査に入った際, 漂着軽石と同様の見かけを持つ軽石が陸上においても多数発見・採取されている. ただし, 陸上で採取された軽石は漂着軽石にはないやや発泡のよくないものが含まれている.

軽石の全噴出量は不明であるが, 湖岸に漂着した量は大雑把に見積ることができる. 例えば, 平均して波打ち際に幅30cm×厚さ1cmだけ漂着していたとし, 漂着した浜辺の総延長を10kmとすると, 漂着体積は $0.3 \times 0.01 \times 10000 = 30\text{m}^3$ となる. これは, 水に対する比重が1(漂着可能な最大値)であったとしても30トンである. 漂着せずに湖



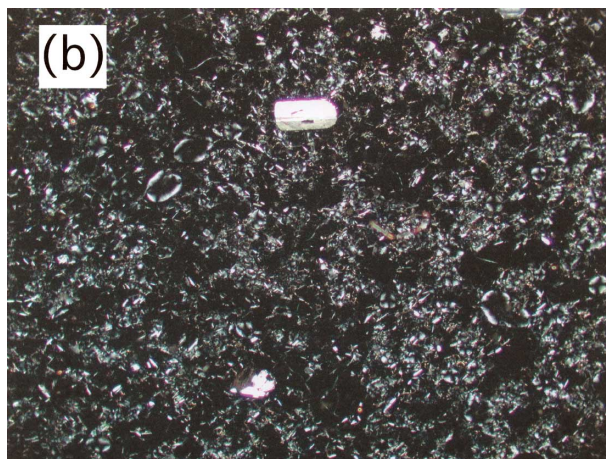
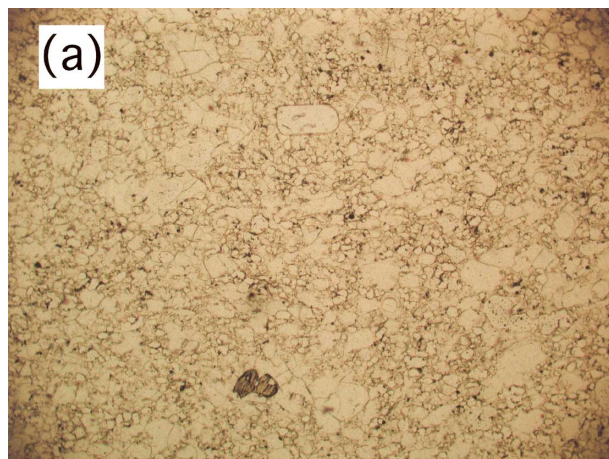
第2図 3月31日噴火の“漂着軽石”が湖岸に漂着している様子。波打ち際から約1mのところには白く帯状に広がっているのが漂着軽石。撮影日時=4月3日 12h07m, 撮影者=東宮, 撮影地点=洞爺湖東岸・滝ノ上。人物は、漂着軽石の発見者である山元。

Fig. 2 "Beach pumice", the March 31 pumice that was fall onto the surface of Lake Toya and washed ashore. The white belt at about 1 m apart from the water's edge is the pumice. Taken by Tomiya at 12h07m, April 3 on the east shore of Lake Toya (Taki-no-ue). The person is Yamamoto who discovered the pumice.



第3図 3月31日噴火の漂着軽石のクローズアップ。細かく発泡し扁平な外形を示す。サイズはmm単位の付いた数字が正しい。

Fig. 3 A close-up of the March 31 pumice gathered from the shore of Lake Toya. Vesiculated with fine bubbles and flattened in shape. The numerals with "mm" are the proper scales for the picture.



第4図 3月31日噴火の漂着軽石の薄片写真(偏光顕微鏡観察)。(a) 開放ニコル。丸い気泡がびっしり石基に生じているのが分かる。写真の横幅は3mm。(b) 直交ニコル。石基鉱物は針状である。写真上方の目立つ結晶は斜長石斑晶。写真で見ると斑晶量は少ない。

Fig. 4 Thin section of the March 31 pumice (by polarization microscope). (a) Open Nicol. Spherical bubbles fill the groundmass. Width of the photo is 3 mm. (b) Same field with cross Nicols. Groundmass crystals are needle microlites. The prominent crystal is a plagioclase phenocryst. Phenocryst content is very low.

底に沈んだものがこの何倍あったかは分からないが、いずれにせよ火山灰の量(12万トン)に比べてごくわずかであったろう。

これらの軽石、特に漂着軽石は、形態や色調が1977年軽石(Us-1977)に似ている(第2表)。このため、発見当初はUs-1977の再移動(火口近傍に堆積していたUs-1977が噴きとばされたもの)である可能性が指摘された。漂着軽石とUs-1977の識別については後で述べることとする。

3.2.2 降下火山灰

2000年3月31日に洞爺湖東岸に降下した火山灰(第5図)は、最大径1mm以下、大部分(>99%)が0.5mm以下で灰黒色である。第6図に粒度分析の結果(軽石・火山礫もまばらに含む)を示す。3月31日降下火砕物は、給源から3km離れた洞爺湖南岸でも細～極細粒砂サイズの火山灰を主体とし、全体に細粒であることを特徴としている。また、シルト～粘土サイズの火山灰も普遍的に付随しており、やや淘汰が悪い。

この降下火山灰について、双眼実体顕微鏡、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した。試料は、超音波洗浄器で洗浄して細粒部分を除去した後、篩で0.5-0.25mmの粒子を集めて観察した(第5図)。

マグマ水蒸気爆発や水蒸気爆発では、噴火に伴って地表付近の堆積物が多量に混入してくる(第7図)。そのため、噴出物中の構成粒子を分類しそれぞれの起源を慎重に見極めた上で、本質物があるのか、あるとしたらどの粒子なのかを判断する必要がある。まず鏡下による観察によると、構成物は、石基鉱物に富む細かく発泡した火山ガラス[G]が約5割、結晶片[X]が約3割、結晶質の火山岩片[L]が約2割、その他に石基鉱物を含まずよく発泡した透明な火山ガラス[T](一部褐色不透明で繊維状)がごく微量(～1%)含まれていることが分かった(第2表)。この中で、本質物(本質ガラス)の候補としては[G]と[T]が挙げられる。次に、SEMによる微細組織の観察を行なったところ(第5図)、微結晶入りガラス[G]は細かくて球状の気泡(直径数十 μm 以下で等方状に発泡)を多数含んでおり、マイクロパシスの外観を呈していた。この発泡形態の特徴は、漂着軽石の特徴(前述)とよく一致する。また、粒子表面の縁や角は極めて鋭利であり、この粒子が非常に新鮮なものである(変質・風化・磨耗を被っていない)ことを意味している。一方、透明ガラス[T]は気泡がしばしば大きい(ガラスがフレーク状)かあるいは引き伸ばされている(繊維状)。表面は円磨されていることもある。

今回観察したものは0.5-0.25mmの粒子に限られるが、0.06-0.25mmの粒子についても多少量比が異なるものの構成要素に大きな差異はない。

以上より、形態観察結果からは、降下火山灰の中の約半量をしめる微結晶入り火山ガラス[G]と漂着軽石の特徴(発泡形態など)がよく一致することが分かった。

4. 2000年噴出物の岩石学・地球化学的分析

本章では、2000年噴出物に関する岩石学的(東宮ほか,2000)および地球化学的分析(佐藤ほか,2000)の結果について述べる。

4.1 軽石の岩石学的分析

4.1.1 偏光顕微鏡による薄片観察～特徴的な石基組織

第4図に漂着軽石(Us-2000pm)の薄片写真を示す。Us-2000pmと有珠火山1977年噴出物(Us-1977)とを比較すると、斑晶の組合せ・含有量・組織はよく似ているが、石基組織は異なるという特徴がある。

Us-2000pmは、斑晶として斜長石・斜方輝石・磁鉄鉱を主として含む。斑晶量は3%程度と少なく、多くは数百 μm サイズで短冊状を呈するが、まれに1mm以上の大型のものもある。斑晶は集斑晶(大場(1989)の"crystal clots")を形成することがある。斜長石は累帯構造が顕著であり、しばしば汚濁帯が見られる。このような斑晶のみかけはUs-1977と共通するものである。

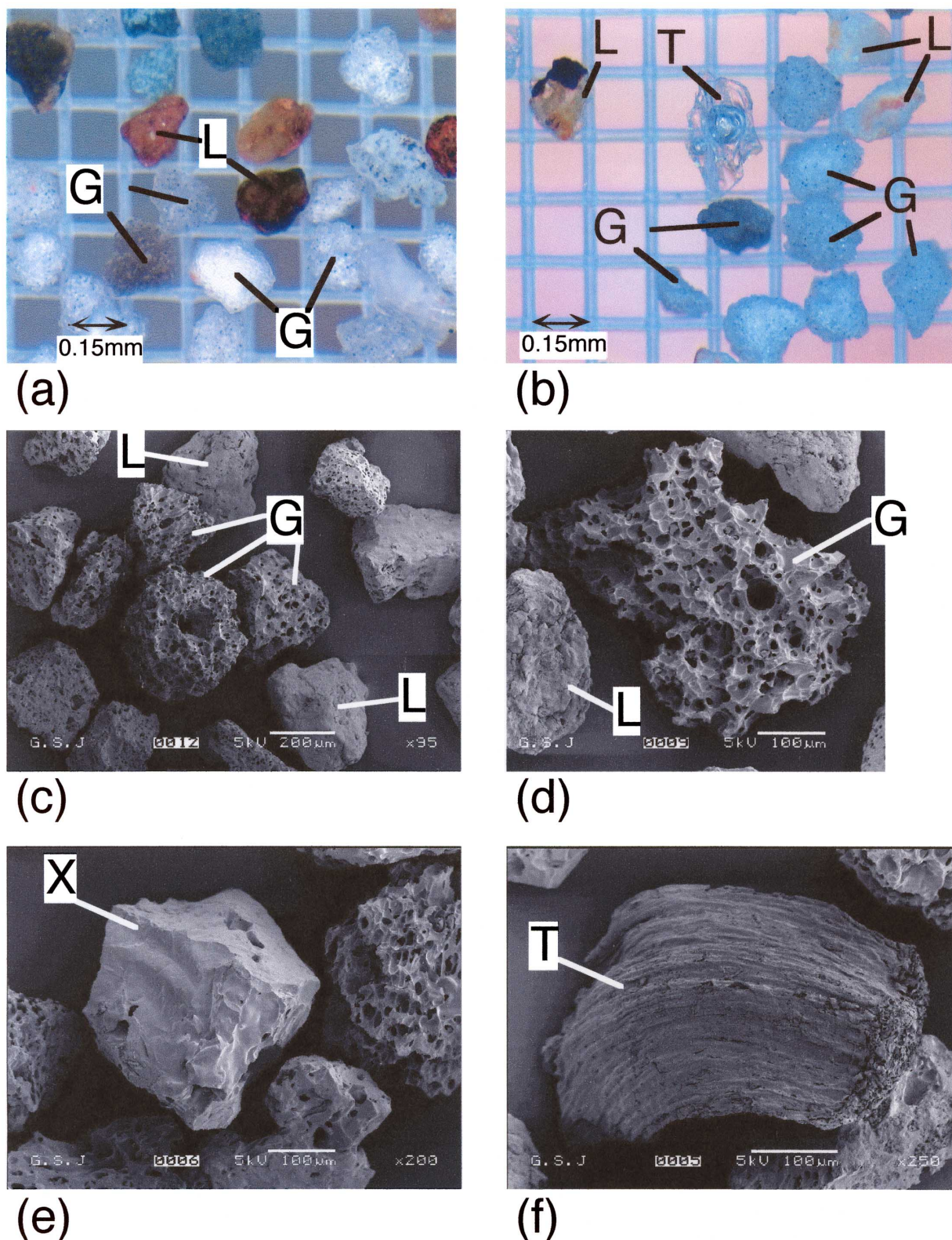
一方、このUs-2000pmの石基は、丸くて細かい気泡(直径数十 μm 以下)が多数存在し発泡度が高い(第4図)。また、石基鉱物は非常に微細かつ針状のマイクロライトである。これらの特徴は典型的なUs-1977のものとはやや異なる一方、2000年火山灰に含まれる微結晶入りガラス[G]とよく一致する。

もう少し細かく見れば、Us-1977の中にも石基組織に次のようなヴァリエーションがある。すなわち、白色で発泡度の高いものは石基がガラス質でマイクロライトは少なく、灰色で発泡度の低いものは石基に針状のマイクロライトが多いという傾向である。しかし、Us-2000pmは、発泡度が高く、かつマイクロライトが多い。よって、Us-2000pmはUs-1977とは石基組織(そしておそらくは噴火メカニズム)が異なると言える。

4.1.2 EPMAによる斜長石分析～1663年以来一連の活動

Us-2000pm中の斜長石組成をEPMA(JEOL JXA-8800, 以下同じ)で分析した。斜長石のコア組成は非常にばらつくが、リム組成はAn57～58付近に集中している。このリム組成は、噴火直前にマグマと平衡だった組成であると考えられる。また、前述の“短冊状”の斜長石斑晶はOkumura *et al.* (1981)のtype-C斑晶(顕著なnormal zoningを持ち1769年噴火以降に出現)、“大型”の斜長石斑晶は同じくtype-A斑晶(中心部に1663年噴出物の斜長石斑晶部分に相当するAn \approx 43の均質なコアを持つ)に対応する。

type-A斜長石は、1663年噴火以来マグマ溜まりの中に存在し続けている斑晶と考えられる(Tomiya and Takahashi, 1995)。例えば、1663年噴出物中のtype-A斜

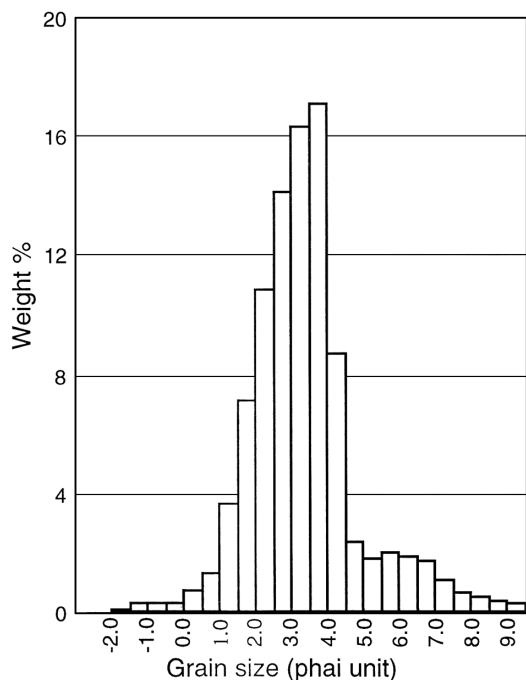


第5図 3月31日噴火の火山灰の実体顕微鏡およびSEM写真. [G] 微結晶入りガラス (Us-2000g); [T] 透明ガラス (Us-2000t); [X] 結晶片; [L] 岩片 (詳細は第2表を参照). (a) 双眼実体顕微鏡 (落斜光のみ)による観察. (b) 双眼実体顕微鏡 (落斜光と透過光を併用)による観察. (c)~(f) SEMによる観察.

Fig. 5 The ash of the March 31 eruption viewed by stereoscope and SEM. [G] finely vesiculated glass with microlites (Us-2000g); [T] clear microlite-free glass (Us-2000t); [X] crystal fragment; [L] lithic fragment (see Table 2 for detail). (a) Photo by stereoscope without transmission light. (b) Photo by stereoscope with transmission light. (c)-(f) SEM observation.

長石はコアからリムまでAn₄₃の均質な斑晶であるが、1769年噴出物中のtype-A斜長石はAn₄₃の均質なコアの周りに数十～百μm程度の成長部分を持ち、100年余りの休止期間の間に成長部分が形成されたと考えられる。同様にして、1822年・1853年・1943 - 45年・1977 - 78年噴出物のtype-A斜長石も均質なコアの周りに成長部分を

持っており、かつ成長部分は時間とともに重層的に拡大していることが分かっている(Tomiya, 1995a)。Us-2000pm中のtype-A斜長石斑晶のzoning profileを調べると、やはりそれまでの歴史時代の噴出物中のtype-A斜長石と同様に、直前の噴出物に入っていたtype-A斜長石の周りに成長したようなパターンを示していた。従ってUs-2000pmも、1663年噴火以来一連のマグマの活動の産物であると考えられる。



第6図 3月31日降下火砕堆積物の粒度組成。火口から東北東に3km離れた洞爺湖南岸で採取。

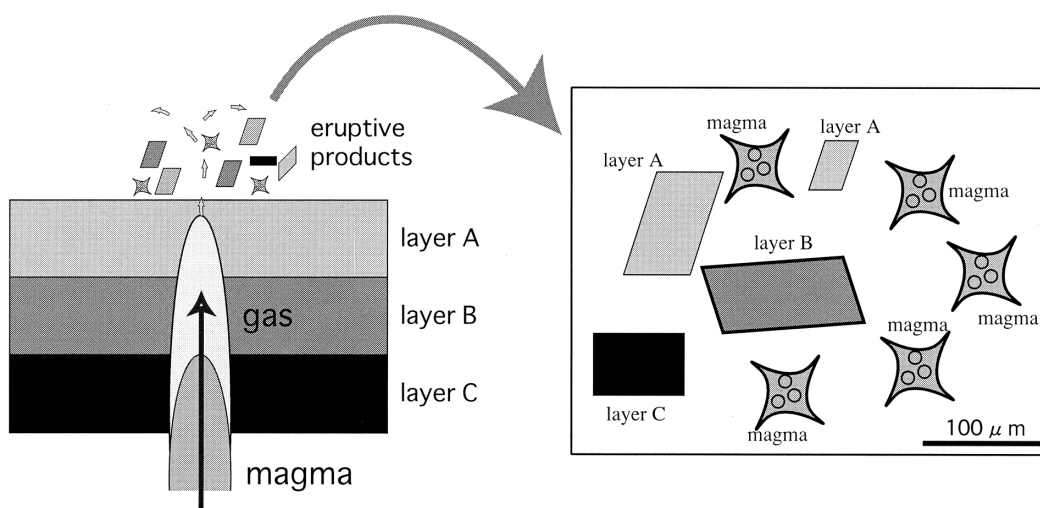
Fig. 6 Grain size distribution of the March 31st fall deposit. Sample locality is the southern coast of Lake Toya 3 km ENE of the vent.

4.1.3 EPMAによる磁鉄鉱分析～

過去の堆積物の再移動では無い

Us-2000pm中の磁鉄鉱組成を同じくEPMAで分析した。Us-2000pm中の磁鉄鉱の含有量は少ないため、軽石を粉砕し、市販のフェライト磁石で磁鉄鉱を濃集した後、樹脂中にマウントして片面研磨片を作成し、それをEPMA分析した。磁鉄鉱の内、MgやMnといった微量成分を分析するため、微量成分のカウント時間は通常の4倍(80秒)とした。小さい磁鉄鉱粒子では分析中に周囲のガラスも一緒に電子ビームが励起してしまう(混染する)恐れがあるので、得られた分析値のSiO₂量を調べ、SiO₂が1wt.%を超えたものはガラスが混染したものとして議論から除外した。

磁鉄鉱は元素拡散係数が大きく、短い時間で組成がなまされて均質化されてしまうという特徴を持つ。従って、マグマの中で数十年間(有珠火山の噴火間隔)存在していると、そのマグマに含まれる磁鉄鉱の組成は非常に揃った値になり、化学組成ヒストグラムを描くとユニモーダルになる。また、噴火の直前に2種類のマグマの混合が起こった場合、組成の分布はバイモーダルになり、マグマ混合が明瞭に認識できることになる。東宮(1995b, 1997)はこの原



第7図 マグマ水蒸気爆発で様々な岩片(本質・類質・異質)が放出される様子。マグマ起源物質(本質物)を突き止めるためには詳細な岩石学的調査が不可欠である。

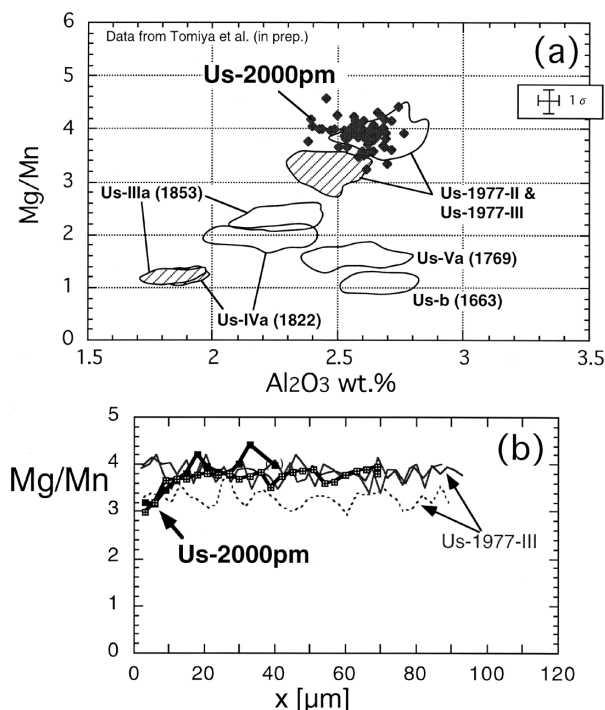
Fig. 7 Schematic description of mixing of accessory and accidental fragments (from layer A, B and C) into the magma during a phreatomagmatic eruption. In order to identify the essential material, detailed petrographical survey is necessary.

理を使って有珠火山の各噴火で活動したマグマを調べると共に、有珠火山マグマ供給系の描像を描き出している。(注:この手法が有効なのは、噴出後に直ちにマグマが急冷される軽石・火山灰に限られる。溶岩、特に溶岩ドームの場合は、噴出後の徐冷期において磁鉄鉱中の元素の拡散・再平衡が冷却・脱ガス等の条件変化に追従してしまうため、この間の組成変化が無視できなくなるためである。)第8図(a)にUs-2000pm中の磁鉄鉱組成を示した(Tomiya *et al.*, in prep). 横軸はAl₂O₃ (wt.%), 縦軸はMg/Mn (mole ratio)を採用している。これらはいずれも磁鉄鉱に含まれる副成分ないし微量成分であるが、主成分(Fe, Ti)では見分けが付きにくい条件の差異(e.g., 温度・圧力・マグマ組成の変化)を鋭敏に感じ取る指標であることが分かっている(東宮, 1996)。この図上では、有

珠火山のこれまでの全ての軽石(1663, 1769, 1822, 1853, 1977年)の磁鉄鉱組成が異なる領域にプロットされる。従って、磁鉄鉱の微量成分を使うことによって、その磁鉄鉱を含む軽石の起源を論ずることもできる。ここでは、Us-2000pmが有珠火山の過去の軽石の再移動である可能性を検討するために、本図を用いる。

さて、Us-2000pmの磁鉄鉱組成の範囲は、1663, 1769, 1822, 1853年のいずれの軽石中の磁鉄鉱の組成とも重ならない(第8図(a))。一方、Us-1977(Us-1977-IIおよびUs-1977-III)の範囲に近いが、Us-1977はバイモーダルな組成分布をするのに対し、Us-2000pmはユニモーダルである。更に、Us-2000pmの磁鉄鉱組成のzoning profileはUs-1977のものとは一致せず、リムでMg/Mnが減少する特徴を持つ(第8図(b); Tomiya *et al.*, in prep)。以上より、Us-2000pmは有珠火山の過去300年間のどの軽石とも磁鉄鉱組成が一致しない。ゆえに再移動ではなく今回新しく噴出してきたもの、すなわち「本質物質」と結論できる。また、Us-2000pmの磁鉄鉱組成が一ヶ所に集まる(ユニモーダルである)ことは、この軽石をもたらしたマグマが単一であったことを示唆する。

なお、1977年輕石には、Us-1977-II・Us-1977-IIIの他にもUs-1977-I・Us-1977-IVという大きな降下ユニットが知られている。しかし、3/31噴火火口付近ではUs-1977のうちIIとIIIが特に厚く、I,IVや他の小規模な降下ユニットはほとんど堆積していない(曾屋ほか, 1981)。また、Us-1977-I~IVの化学組成(全岩組成)はかなり均質であり、色(白~灰色)や発泡度に関わり無く、SiO₂量にして1%程度の範囲内である(Ōba *et al.*, 1983)。ゆえに、Us-2000pmがUs-1977の再移動物であるかどうかの検証には、1977-IIと1977-IIIのみを調べれば十分である。



第8図 Us-2000pm軽石中の磁鉄鉱組成(EPMA分析結果)。(a) 歴史時代に噴出した軽石との比較。1663年以降これまでに噴出したどの軽石中のものとも一致しないので、Us-2000pmは今回新たに噴出したマグマと考えられる。(b) Us-2000pmとUs-1977の磁鉄鉱のzoning profileの比較。Us-2000pmの磁鉄鉱(太線)はリムでMg/Mnが低下する特徴を持つ。

Fig. 8 Chemical composition (Al₂O₃ - Mg/Mn) of magnetite in Us-2000pm using electron microprobe. (a) Comparison with historical products. It is not identical to any products from Usu volcano since 1663, so that Us-2000pm is a new magma that erupted at the 2000 eruption. (b) Zoning profiles of magnetite in Us-2000pm and Us-1977. The Mg/Mn of magnetite in Us-2000pm (thick curve) decreases at the rim.

4.2 火山灰の岩石学的分析

4.2.1 反射電子像(BEI)による火山灰の組織観察～構成物の分類

2000年3月31日に洞爺湖東岸に降下した火山灰についてEPMAのBEIによる観察を行なった(第9図)。火山灰試料は超音波洗浄器で細粒成分を除去したものを、篩分けせずにエポキシ樹脂に浸潤させガラス円板上にマウントし研磨し、観察した。

その結果、観察した灰の構成物の約5割は、新鮮で微結晶に富む発泡した火山ガラス(Us-2000g)であることが判明した。Us-2000gは、実体顕微鏡観察における[G]に相当する(第2表)。Us-2000gは、発泡度は様々であるが、ガラスの組成や微結晶の量と種類が特徴的かつ均質であるため、他と区別できる。その他、微結晶をほとんど含まないガラス片(Us-2000t;同じく[T]に相当)、緻密な岩石片および変質岩片([L]に相当)、および結晶片([X]に相当)が構成物として含まれる。

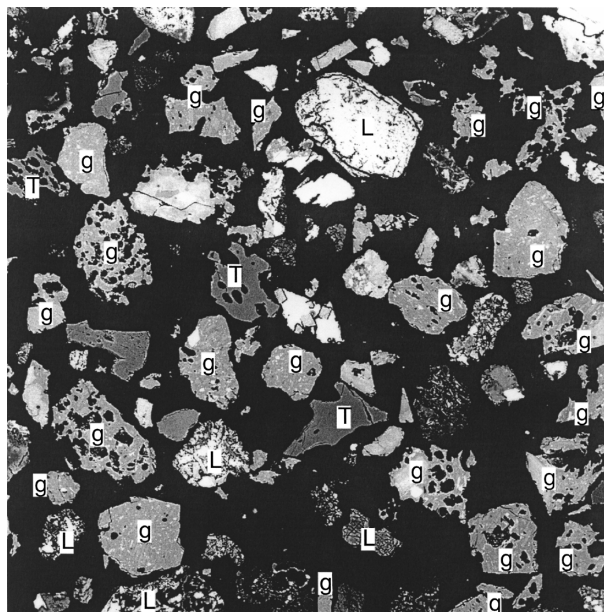
なお、火山灰中のUs-2000gの含有量である“約5割”は、厳密には本報告で観察した灰(水洗により約0.03mm以下の細粒物は失われている)においてのみ正しい。実際にはこの比率が必ずしも細粒部分及び他の地点での降下物で保たれる保証はない。現段階では、おおまかに噴出物の“約半分程度”と考えるのが妥当であろう。

4.2.2 EPMAによる火山灰のガラス分析～各ガラスの起源

2000年3月31日火山灰に含まれる2種類の火山ガラス、すなわち微結晶入りガラス(Us-2000g)および結晶に乏しい透明ガラス(Us-2000t)の起源を調べるため、EPMAを用いてこれらのガラス組成を分析した。比較のため、洞爺火砕流堆積物中の軽石(ca. 100ka), Us-b軽石(1663年噴出物), Us-IIIa軽石(1853年), Us-1977-IおよびUs-1977-III軽石(1977年), Us-2000pm(2000年)の各軽石の石基ガラス組成も同時に分析した。

ここでは分析結果の一例としてSiO₂-TiO₂関係を示す(第10図)。まず透明ガラス(Us-2000t)の方は、洞爺火砕流堆積物中の軽石の石基ガラスと組成が一致した。ゆえに、Us-2000tは洞爺火砕流堆積物起源の破片(異質岩片)である可能性が高い。洞爺火砕流堆積物は有珠火山近辺では最も厚い(数十m)火砕物の1つなので、噴火時に取り込まれやすいであろう。一方、微結晶入りガラス(Us-2000g)は、洞爺火砕流、Us-b、およびUs-IIIaの石基ガラスとは明瞭に区別できたが、Us-1977軽石の石基ガラスとは区別ができなかった。これは、Us-2000pmとUs-1977の全岩化学組成が非常に似ているという北大グループの結果(中川ほか, 2000;ただし非常に高精度で分析すると微妙な差がある)と整合的である。

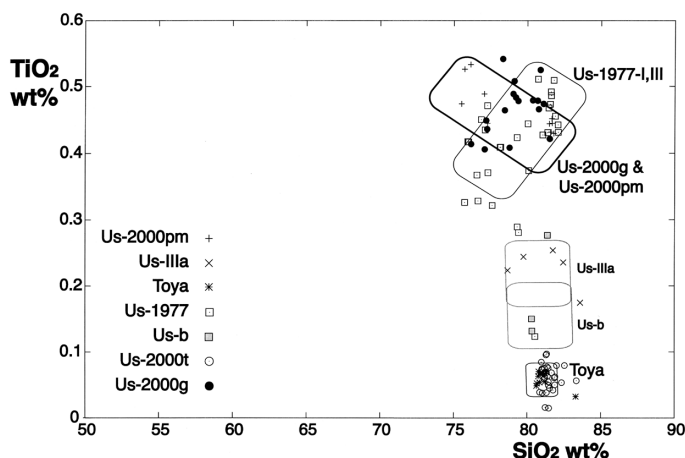
上述したようにUs-2000tは洞爺火砕流と組成的に一致した。しかし、そのことのみでは、Us-2000tが本質物質であることを厳密には否定できない。しかし、有珠火山においては、洞爺火砕流と同一組成のマグマが噴出する可能性は岩石学的には考える必要が無い。なぜならば、有珠火山の全岩化学組成(Ōba *et al.*, 1983)と洞爺火砕流の全岩



第9図 3月31日火山灰の反射電子像(BEI)。様々なタイプの粒子が含まれるが、その中では微結晶入り発泡ガラス(Us-2000g; 図中"g"を付した)が最も多く、ほぼ半分を占める。他には、透明ガラス(T)、岩片(L)などが含まれる。写真の横幅は1mm。

Fig. 9 Back-scattered electron image (BEI) of the March 31 ash. It consists of various types of particles, however, finely vesiculated glass with microlites (Us-2000g; with "g" in the picture) is dominant (about a half of the ash). There are also clear glass (T), lithic fragment (L), and so on. Width of the photo is 1 mm.

化学組成(Ikeda *et al.*, 1990)とを比較すると、両者が明らかに異なるマグマ系列であるからである。有珠火山のマグマは日本の火山の中でも最もK₂Oに乏しい系列に属しており、同じSiO₂量で比較した時、洞爺火砕流の半分程度しかK₂Oが含まれないのである。



第10図 火山灰のガラス組成(SiO₂-TiO₂)。透明ガラス(Us-2000t)の組成は洞爺火砕流堆積物中の軽石(Toya)に一致した。

Fig. 10 Chemical compositions (SiO₂-TiO₂) of the two types of glasses (Us-2000g, Us-2000t) in the March 31 ash with comparison to other glasses from Usu and Toya.

4.2.3 EPMAによる磁鉄鉱分析

4.1.3.章で軽石(Us-2000pm)に適用したのと同じ手法を用いて、降下火山灰中の磁鉄鉱組成を測定し、Us-2000pm等と比較することを行なった。火山灰試料は超音波洗浄器で細粒成分を除去し、0.1 - 0.25mmのものを篩分けした。この中から分析対象の磁鉄鉱を濃集するため、一般的なフェライト磁石に付着する部分だけを抽出した。それをエポキシ樹脂でガラス円板上にマウントし、片面研磨片を作成した。

こうして集めた磁鉄鉱粒子には、様々な起源(本質・類質・異質)のものが混じっている。そこで、まずは各磁鉄鉱粒子について反射電子像の撮影を行ない、それを包有する物質の組織毎に種類分けを行なった。異なる組織を持つ粒子は異なる起源を持つことが期待されるからである。ここでは、次の4種類に分類した：

Us-2000gが包有(付着)しているもの
= Us-2000g Mt

結晶周囲に何も付着していない磁鉄鉱
= Solo Mt

斜長石が包有(付着)しているもの
= IPL Mt

BEIでコントラストの強い岩片が包有(付着)しているもの
= IBW Mt

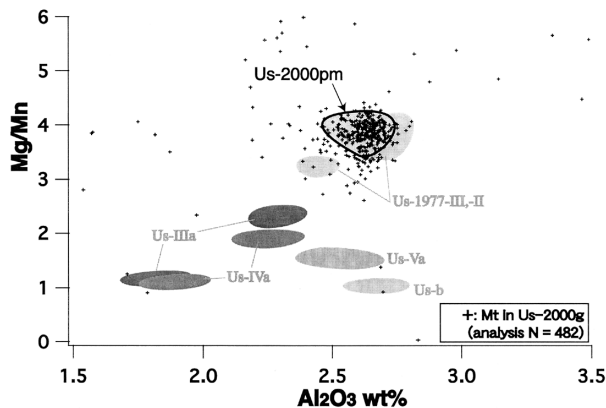
そして、これらについて、EPMAを用いた磁鉄鉱組成の分析(総分析数630点)を行なった。

少なくともこの研磨片では、Us-2000g Mtの存在数が圧倒的に多く、分析点数の7割以上を占める。ついでSolo Mtが2割を占め、残りはIPL MtとIBW Mtであった。ここでは、Us-2000g Mtの分析結果についてのみ第11図に示す。縦軸・横軸については第8図(a)と同様である。Us-2000g Mtの組成のほとんどは一ヶ所に集中することが分かる。少数の点がばらついているが、これは分析上の問題(あるいはマウントの研磨が良くなかったため)かもしれない。

Us-2000g Mtの組成が一ヶ所に集中するという事実は、Us-2000g Mtがある単一のマグマに由来していることを強く示唆する。さらに、Us-2000g Mtの組成を2000年3月31日に放出された軽石Us-2000pm中の磁鉄鉱のそれと比較すると、両者はよく一致した(第11図)。したがって、「Us-2000gとUs-2000pmは同じマグマ(Us-2000)を起源としたものである」と結論できる。すなわち、Us-2000gもまた今回の噴火の本質物質である。

4.3 2000年噴出物の酸素同位体比

2000年噴火の噴出物が有珠火山の新たなマグマ由来の本質物であるか、また外輪山形成期以降の珪長質火山活動に関わったマグマの中でどのように位置づけられるかを検討するために、石基と斑晶の酸素同位体比分析を行なった(佐藤ほか, 2000)。分析した試料は、(1)2000年



第11図 Us-2000g火山灰粒子に含まれる磁鉄鉱組成。Us-2000gの磁鉄鉱とUs-2000pmの磁鉄鉱は組成が一致し、同じマグマであることが示された。Mg/Mnはモル比である。

Fig. 11 Chemical composition of magnetite in Us-2000g glass. It is identical to that of magnetite in Us-2000pm. Thus, Us-2000g and Us-2000pm are from the same magma. The Mg/Mn is mole ratio.

3月31日軽石(洞爺湖岸漂着、および有珠火山観測所下駐車場降下)、(2)洞爺火砕流、(3)Us-b軽石、(4)Us-IIIa軽石、(5)Us-1977軽石である。すでにMatsuhisa (1979)は、Oba (1966)により記載された、有珠火山の外輪山玄武岩類・溶岩ドームデイサイト類・"Ub"降下軽石(以下Us-b)の全岩酸素同位体分析を行なっている。それによれば、一連の噴出物はマグマの結晶分化作用によって形成される単一の分化トレンド(SiO_2 vs. $\delta^{18}\text{O}$)と調和的であり、外輪山を形成した初生的玄武岩親マグマからの分化生成物として説明可能とされている。そこで、得られた分析値をMatsuhisa (1979)の結果と比較・検討した。

マグマの酸素同位体比($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, 以下 $\delta^{18}\text{O} = ((^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_x / (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{VSMOW}} - 1) \cdot 1000\%$ で表記)は、(1)結晶分化作用、(2)マグマ混合、(3)地殻物質の混染、(4)地下水系との同位体交換などによって変化するが、このうち(1)による変化が最も小さく、分析には高い精度を要する。微小チップ状試料(0.3mg以上)を用いる CO_2 レーザーマイクロプローブ法(例えばSharp, 1990)を用いれば、希少な試料を、精度よく($\pm 0.1\%$, Satoh, 2000)、迅速に酸素同位体分析できるため、今回の分析手法として採用した。超音波洗浄した軽石試料を万力やラジオペンチを用いて壊し、破片を実体鏡鏡下でハンドピックして石基と斜長石、輝石に分離した。これらを秤量した後、地質調査所のレーザーマイクロプローブ(モデルLMP-90, 松久ほか, 1996)にて BrF_5 雰囲気中でそれぞれを順々に完全に処理し、Finnigan MAT251質量分析計で分析した。 $\delta^{18}\text{O}$ 測定値はMatsuhisa (1979)との整合性を重視し、未知試料と同時に処理したNBS28標準試料の $\delta^{18}\text{O}$ 値を9.50‰と

第3表 2000年噴出物と過去の噴出物の酸素同位体比測定値の比較(Gm:石基,Pl:斜長石斑晶).

Table 3 Oxygen isotopic compositions of 2000 and pre-2000 Usu ejecta (Gm: groundmass, Pl: plagioclase phenocryst).

Sample ID	Eruption age	SiO ₂ Gm (wt.%)	δ ¹⁸ O Gm (‰)	S.D. (‰)	n	δ ¹⁸ O Pl (‰)	S.D. (‰)	n
2000 ejecta								
essential pumice	2000.3.31	75.0	6.73	0.05	6	6.22		1
pre-2000 ejecta								
Toya pyroclastic flow	pre-historical	77.2	8.04	0.13	2	6.48		1
Us-b pumice	1663	76.6	6.74	0.02	4	6.36	0.09	4
Us-IIIa pumice	1853	73.9	6.65	0.09	3	6.17		1
Us-1977-I pumice	1977	73.1	6.28	0.04	2	6.23		1
Us-1977-II pumice	1977	72.5	6.83		1	6.24		1
Us-1977-III pumice	1977	73.0	6.58	0.06	2	6.21		1

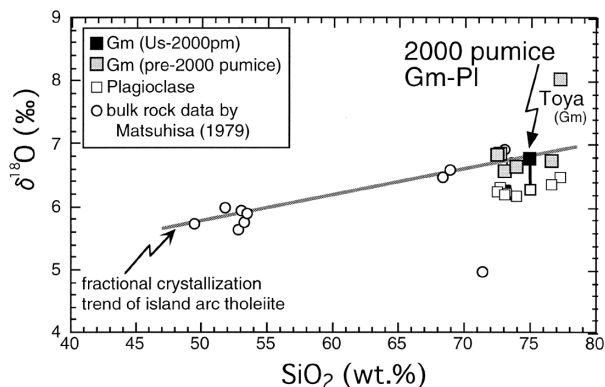
して全て規格化した。また同位体分析の残りの試料は赤外線イメージ加熱炉にて溶融ガラス化処理し、EPMAによる化学組成分析に用いた。

Us-2000pmの石基と斜長石斑晶のδ¹⁸O値はそれぞれ、δ¹⁸O = 6.73±0.05‰ (n = 6; nは分析個数), 6.22‰ (n = 1)の極めて狭い組成範囲を示す(第3表)。上述した方法によって求めた石基の化学組成はSiO₂ = 75wt.

% (n = 2)である。

これを過去の代表的な噴出物と比較してみる。先有珠火山噴出物である洞爺火砕流の石基は、SiO₂ = 77wt.%, δ¹⁸O = 8.04±0.13‰ (n = 2)とひととき酸素同位体組成が高いという特徴をもっている。Us-b軽石の石基はSiO₂ = 77wt.%, δ¹⁸O = 6.74±0.02‰ (n = 4)と、δ¹⁸O値は2000年輕石に非常に近いが、SiO₂含有量がやや高い。一方、Us-IIIa軽石および3つの1977年輕石の石基はSiO₂は2000年に近く(73.9, 72 - 73wt.%)、δ¹⁸O値も比較的近似している(6.65±0.09‰, n=3および6.28 - 6.58‰, n=5)。

これらの過去の噴出物から2000年輕石までがどのような過程で形成されたかを検討するために Matsuhisa (1979)のデータと共にSiO₂ vs. δ¹⁸O図にプロットした(第12図)。化学・同位体的マスバランスにおいて有珠火山の軽石の斑晶は石基に対して寄与が小さいため、石基組成が全岩組成をほぼ反映していると考え、洞爺火砕流を除いた軽石は島弧玄武岩マグマの結晶分化トレンドにほぼ平行な勾配を示している。このことから2000年輕石は有珠火山の最近300年間に活動した珪長質マグマと密接に関係した産物であると考えられる。また、Us-b以降の斜長石斑晶のδ¹⁸O値が6.2から6.4‰の狭い範囲に集中することも、比較的閉じたプロセス(結晶分化作用あるいは同源マグマ同士のマグマ混合)を主体としたマグマシステムが過去から現在にかけて地下に存在し続けていることを暗示している。



第12図 有珠火山の軽石の石基および共存する斜長石斑晶のδ¹⁸O値と石基のSiO₂含有量の関係。図中、Gmは石基、Plは斜長石を示す。直線は八丈島火山岩類の示す結晶分化作用による酸素同位体分化トレンドで、白丸はUs-b以前の有珠火山の外輪山および軽石、ドームデイサイトの全岩分析結果(ともにMatsuhisa, 1979)。3月31日軽石は、1977年輕石を始めとする有珠火山の歴史時代の噴出物と同様の同位体組成を示し、共通の起源であることが示された。

Fig. 12 Oxygen isotopic compositions of pumices (Gm: groundmass, Pl: plagioclase) from Usu Volcano and Toya pyroclastic flow deposit. The straight line is a typical fractional crystallization trend of island-arc tholeiite (Hachijojima volcanic rocks). The composition of March 31 eruptive product is similar to those of other historic Usu dacites (Matsuhisa, 1979), indicating the same origin of these magmas.

5. 議 論

本章では、3月31日噴出物に関するいくつかのトピックについて論ずる。

5.1 本質物質の認定における問題

3月31日の噴火は「マグマ水蒸気爆発」であると噴火直後の早い段階で認定された。それは、噴火直後に行なわ

れた火山灰の鏡下観察において“新鮮な火山ガラス”が発見されたためである。しかし、既に述べたように、3月31日の火山灰中には2種類の火山ガラス(G, T)が認識されたこと、このうち一見新鮮そうに見える“透明ガラス”(T)の方は本質物質ではなかったことなど、詳しく調べてみると事情は単純では無かった。このことは、「マグマ水蒸気爆発」の噴出物を今後調べる上で非常に教訓的である。すなわち、本質物質(本質ガラス)であるかどうかの判定は、詳細な記載岩石学的調査を必要とする場合がある、ということである。

5.2 噴出物量からも否定される再移動説

漂着軽石については当初、1977年降下軽石層が噴火により吹き飛ばされたものであるという可能性(再移動説)が指摘されたことがある。しかし、既に見た通り漂着軽石と微結晶入り火山灰[G]が同源であると考えられ、その場合は火山灰[G]も1977年輕石の破碎によって作られなければならない。すると、以下に示す体積(重量)計算によってこの再移動説は否定することができる。3月31日の火口(N1~N3火口; 5月22日火山噴火予知連絡会資料)の面積は、約5,300m²である。火口付近は、1977年降下軽石層の30cm層厚線のすぐ外側にある(曾屋ほか, 1981)ので、平均の厚さを30cmとすると、火口形成に伴って吹き飛ばされる1977年輕石の体積は約1,600m³である。軽石の密度を0.9とすると、これは約1,400トンとなる。局所的に1977年輕石が再堆積も含めて厚い部分があったとしてもこの値から大幅に増えることはない。一方、3月31日の降灰量は火口近傍での堆積物を含めて約12万トンであった(宝田ほか, 2001)。以上の計算結果は、3月31日噴出物に1977年輕石が噴火により混入しても、その割合は噴出物総量よりは1桁以上小さいことを意味する。このことは、降下火山灰中に多量(約半量)のガラス火山灰[G]が入っている事実と矛盾する。また、地表付近にあった降下軽石層が吹き飛ばされることがあっても、噴火の衝撃で細粒に大量に粉碎されるとは考えにくい。

以上の検討結果は、降下火山灰及び軽石の起源が1977年輕石の再移動ではないことを支持する。

5.3 “出残り”マグマ

Us-1977とUs-2000pmの化学組成と酸素同位体比組成が似ていたことから、今回の噴出物が先の噴火の出残りマグマに由来する可能性が検討された(4月12日火山噴火予知連絡会資料)。その後、北大グループによる極めて高精度の全岩化学分析結果が出され、Us-1977とUs-2000pmとは微妙ながら違いが見られることが分かった(SiO₂量にして0.2wt.%, TiO₂量にして0.03wt.%; 中川ほか, 2000)。従って、Us-1977マグマの単純な出残り(1977年噴火後に全く組成変化を被らないままに今回噴出したと仮定すること)では説明できないことになる。もっとも、そも

そも20年間以上組成変化が全く無いという仮定そのものがあり得そうにないことであり、“出残り”の定義の問題とも言える。

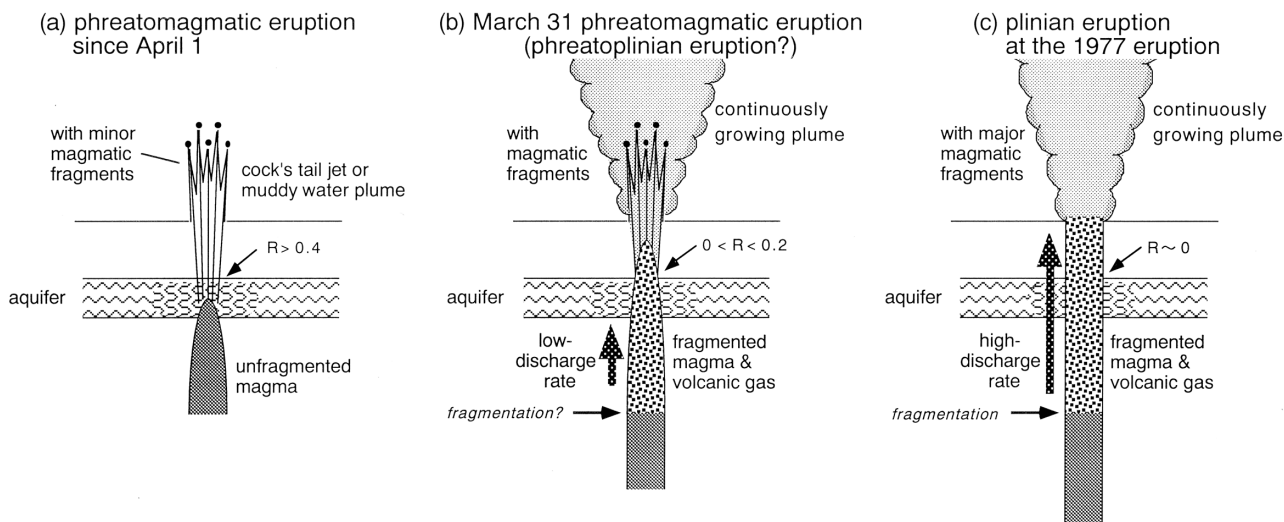
一方、4.1.2.章で見た通り、type-Aの斜長石斑晶が1663年以来2000年に至るまで全ての噴出物に含まれており、1663→1769→1822...と結晶成長を段階を追って見ることができる(Tomiya, 1995a; Tomiya and Takahashi, 1995)ことから、広い意味では1663年噴火以来出残ったマグマがその後の噴出物中にも現れていることは確かであろう。従って、2000年マグマも“1663年出残りマグマ”の一部を引き継いでいる、すなわち、2000年噴火も1663年以来共通のマグマ供給系を使用している、と結論できるであろう。

5.4 噴火直前のマグマ混合

噴火直前のマグマ混合の有無は、噴火のトリガーや噴火様式(メカニズム)を考える上で重要である。有珠火山のこれまでの軽石噴火のほとんど(1663, 1822, 1853, 1977)において、噴火直前に2種類のマグマが混合を起していることが、磁鉄鉱組成のバイモーダル性から分かっている(Tomiya, 1995a)。一方、2000年では磁鉄鉱組成が単一であることから、1種類のマグマしか地表には出ていないとみられ、マグマ混合が起きているという積極的な証拠はない。これは、今回の噴火がこれまでとは違ったマグマ上昇パターンで生じたことを意味するかもしれない。しかし、地下でマグマ混合は起こったものの混合の影響を受けなかった上澄み部分のみが地上に噴出した、という解釈も可能であることから、今後さらなる議論が必要である。

5.5 2000年3月31日噴火のメカニズム

3月31日のマグマ水蒸気爆発噴火では、火山灰中の約半分という大量の本質物が放出された。本質物にはよく発泡したのが多い。さらに、マグマは地下水に接する以前に自ら破碎(fragmentation)していた可能性が次のようなことから示唆されている。例えば、宮城ほか(2000)は、火山ガラス(Us-2000g)の石基ガラス部分の含水量をSIMSによって測定し、その飽和圧力を求めた。この圧力は、火山ガラス片が急冷・凍結された圧力に相当し、マグマが破碎した深さに対応する可能性がある。分析の結果によれば、石基ガラスの含水量は2.5±0.5 wt.%に集中し、飽和圧力にして300 - 700気圧であることが分かった。仮に岩石の比重を2g/cm³としてリソスタティックな圧力勾配を考えると、深さにして地下1.5~3.5kmに相当する。これは想定されている帯水層より深い。例えば、北海道立地質研究所(2000)などによれば、洞爺湖温泉付近で最も水量の豊富な帯水層は地表下約50 - 80m(標高約83m ~ 洞爺湖の湖水面の標高とほぼ同じ; 有珠外輪山溶岩層準)に存在する。また、有珠火山の2000年4月中旬の噴火にお



第13図 マグマ水蒸気爆発およびプリニー式噴火の模式図。(a) 4月1日以降のマグマ水蒸気爆発。破碎していないマグマが地下水に接触し、弱くて単発的な爆発を起こす。(b) 3月31日のマグマ水蒸気爆発(水蒸気プリニー式噴火)。マグマは地下水に接触する以前に自破碎(fragmentation)を開始していた。破碎した後はマグマと地下水との接触面積が飛躍的に大きくなるため、効率的に熱交換が行なわれ、爆発は強力かつ継続的になった。噴煙は大きく成長し、本質物も多量に放出された。(c) プリニー式噴火(例:有珠火山1977年噴火)。マグマの噴出率が充分大きいとき等、水/マグマの混合比R(質量比)が無視できるほど小さい場合にはプリニー式になる。図中Rの値の範囲は山元(2001)に基づく。

Fig. 13 Schematic description of phreatomagmatic and plinian eruptions (not to scale). (a) Phreatomagmatic eruption since April 1. Unfragmented magma contacts the aquifer, causing weak and pulsative explosions. (b) The March 31 phreatomagmatic (or phreatoplinian) eruption. Magma was fragmented before the contact with the aquifer. Because the contact surface between fragmented magma and water was efficiently large, the explosion was rather strong and continuous. The eruption plume was growing high, and a lot of magmatic fragments (essential materials) were ejected. (c) Plinian eruption (e.g., the 1977 eruption of Usu volcano). The negligibly small ratio of water to magma (mass ratio R; Yamamoto, 2001) can cause plinian eruption.

いて水蒸気爆発の発生している深度は、野外爆発実験との相似関係(スケリング則)を用いて深さ数十m程度と推定されている(谷口ほか, 2000)。西山西麓では、もう少し下位の上長和層や柳原層相当層(伏在更新統)が帯水層になっている可能性があるが、この深さは数百mで浅である(北海道立地質研究所, 2000)。

一方、山元(2001)は、マグマ水蒸気爆発におけるマグマと水のエネルギー交換について計算を行ない、今回のような高い噴煙柱と長い継続時間を実現するためには、マグマが地下水接触より以前に十分破碎(微粒化)されている必要があるとした。これは次の理由による:

- マグマ水蒸気爆発で短時間に大量の水蒸気が生産されるためにはマグマから水へ急速に熱が移動することが必要で、そのためには火道内でマグマと水の接触面積が急増する必要がある;
- 特に有珠火山のような粘性の高いデイサイト~流紋岩質マグマの場合、地下水との接触時にマグマの自破碎による充分な微粒化が見込めない。そのため、マグマが減圧過程で自発的に微粒化し表面積の爆発的增加をもたらすことが、マグマ水蒸気爆発のトリガーとし

て有望なプロセスである。

その上で、3月31日の軽石を噴出した最初のマグマ水蒸気爆発が最も激しかった理由としては、この噴火が上昇してきたマグマ頭部のガス成分に富んだ部分からの噴火であったことがもっとも考え易いとした。計算によれば、発泡破碎をしたマグマが効果的に地下水と混合し、かつ水/マグマの混合比(R; 質量比)が0.2以下と低ければ、安定な噴煙柱が形成され得ると推定された。

これらより、3月31日噴火は一種の“プリニー式噴火のなり損ない”あるいは“水蒸気プリニー式噴火”であった可能性がある(第13図)。すなわち、マグマは地下で上昇中に減圧による自破碎を既に進行させてプリニー式噴火を目指していたが、帯水層を通過する際に豊富な地下水と激しくかつ効果的に接触した結果、今回のような3000m以上の安定した噴煙柱を生じるようなマグマ水蒸気爆発になった(第13図(b))、ということが考えられる。

このことは、第1章で述べたような噴出地点と噴火様式とを関係づける“経験則”を考える上で大変興味深い。この経験則を解釈する上では、今のところ2つの因果関係が考えられている。すなわち、(1) 噴火が山麓から起こった

ためにプリニー式になり損なった, というものと, (2) プリニー式になるほど勢いがなかったので標高の低い山麓から出た(=山頂から出られなかった), というものである。しかし, より直接的に言えば, 噴火様式の選択は帯水層を通過する際の「マグマと水の混合比」によって決定されると考えられるだろう(山元, 2001)。つまり, マグマ噴出率が大きい場合など水/マグマの比が十分に小さければマグマ噴火(プリニー式)になり, 逆に水/マグマの比が十分に大きければマグマ水蒸気噴火になり, 両者の比が適当な割合になったときに水蒸気プリニー式噴火になると考えると良さそうである(第13図)。この場合, 上記の(1)と(2)の因果関係は複合してよい。いずれにせよ, マグマの破砕・上昇過程については, 今後更なる分析検討を行なう必要があるだろう。

2000年3月31日マグマ水蒸気爆発の火山灰中の本質物質(Us-2000g)の特徴は, 「針状の微結晶」と「細かくて丸い気泡」を多数含むことである。このような組織は, 急冷度が高いこと(核形成率が高くなる), および冷却時間が短いこと(気泡が成長する暇がない)を反映していると考えられる。従って, 地下水と接してマグマが急激に冷却・噴出する噴火(マグマ水蒸気噴火, あるいは水蒸気プリニー式噴火)の産物の一般的な特徴であるかもしれない。実際, 三宅島2000年噴火によってUs-2000gとよく似た組織(針状の微結晶と細粒で等方的な気泡を多数含む)を持つ火山灰(Myk2000g-2; Miyagi *et al.*, 2000b)が放出され, これが今回の三宅島噴火(マグマ水蒸気噴火)の本質物質であると目されている。今後, マグマ水蒸気爆発の噴出物を観察する際には, 「透明なガラスが本質とは限らない」という今回の教訓を生かすことが重要である。

6. 結 論

有珠山2000年3月31日の噴火で放出された降下火山灰の約半分(Us-2000g)と降下軽石(Us-2000pm)は, 今回活動したマグマに直接由来したもの, すなわち本質物質である。3月31日の噴火は, 比較的多量のマグマ成分が関与するタイプのマグマ水蒸気爆発(プリニー式噴火)のなり損ない, あるいは水蒸気プリニー式噴火であった。

2000年3月31日マグマ水蒸気爆発の火山灰中の本質物質は, 針状の微結晶と細かくて丸い気泡を多数含むガラス(Us-2000g)である。このような組織は, マグマ水蒸気爆発の産物の一般的な特徴である可能性がある。

今回の漂着軽石や微結晶入り火山ガラスのような, いわば起源未詳の噴出物を分析する上で, 過去の噴出物との比較を行なう必要がある場合等においては, 磁鉄鉱組成による判別は非常に有用であった。

2000年噴火で活動したマグマは, 斑晶鉱物の組成およびそのzoning profileや, 同位体的なデータから判断して, 1663年以来活動し続けている一連のものである。

謝辞 現地での観測や試料採取等に関しては有珠火山噴火総合観測班をはじめとする現地スタッフに大変お世話になった。篠原宏志氏・斎藤元治氏をはじめとする当時の地質調査所・有珠火山噴火対応本部のスタッフ, 伊藤順一氏をはじめとする同・企画室のスタッフ, その他所内の多くの方々には, 噴火に関する種々の議論をしていただくとともに, 急な出張への対応等さまざまな点で便宜を図っていただいた。金子克哉氏・久利美和氏には分析データの整理や各種図表の作成に協力していただいた。当時の地質標本館試料調製課の方々には, 3月31日噴出物の薄片を迅速に作成していただいた。査読者である中野俊氏からは論文を改善する上で貴重な御意見を多数いただいた。ここに記して深く感謝する。

文 献

- 長谷川裕之・小荒井 衛・渡辺信之・飯田 洋・松尾 馨 (2000) 写真測量で捉えた有珠山の火山活動に伴う地表変動の時系列変化。日本火山学会講演予稿集, 2000, no.2, 170.
- 北海道立地質研究所(2000)2000年有珠山火山噴火観測速報。北海道立地質研究所, 55p.
- 星住英夫・宮城磯治・川辺禎久・山元孝広・東宮昭彦・宝田晋治 (2000) 有珠火山2000年3月31日降下火山灰及び漂着軽石の特徴とその起源。日本火山学会講演予稿集, 2000, no.2, 29.
- Ikeda, Y., Ikeda, T. and Kagami, H. (1990) Caldera-formation from geochemical aspects: A case study of the Toya caldera, southwestern Hokkaido, Japan. *Jour. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, 85, 569-577.
- 川辺禎久・風早康平・宝田晋治・総合観測班地質グループ (2000) 2000年3月31日有珠山噴火(口絵)。地質ニュース, no.548, 1-2.
- Matsuhisa, Y. (1979) Oxygen isotopic compositions of volcanic rocks from the east Japan island arc and their bearing on petrogenesis. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 5, 271-296.
- 松久幸敬・森下祐一・Faure, K.・Elsenhimer, D. W. (1996) レーザーマイクロプローブ法による鉱物の安定同位体分析。月刊地球, 号外16, 130-136.
- 宮城磯治・川辺禎久・森下祐一・木多紀子 (2000a) 有珠2000年3月31日噴火のマグマ破砕深度。日本火山学会講演予稿集, 2000, no.2, 187.
- Miyagi, I., Tomiya, A., Hoshizumi, H., Kawanabe, Y., Itoh, J., Takada, A., Nakano, S., Uto, K. and Yamamoto, T. (2000b) Petrological characterization of the 2000 Miyake-jima ash: Identification of essential particles. AGU 2000 Fall Meeting, V52A-07.
- 中川光弘・和田恵治・石塚吉浩・工藤 崇・吉本充宏・北川淳

有珠火山2000年3月31日噴火とその本質物(東宮 ほか)

- 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, 2000, no.2, 190.
- 新井田清信・鈴木建夫・勝井義雄(1982) 有珠山1977年噴火の推移と降下火砕堆積物. 火山, 27, 97 - 118.
- 西村裕一・宝田晋治・斎藤英二・宇都浩三・風早康平・松島健・高木朗充(2000) 有珠山2000年噴火に伴う西山麓の地殻変動. 日本火山学会講演予稿集, 2000, no.2, 45.
- Ōba, Y. (1966) Geology and petrology of Usu Volcano, Hokkaido, Japan. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, ser. IV, 13, 185 - 236.
- Ōba, Y., Katsui, Y., Kurasawa, H., Ikeda, Y. and Uda, T. (1983) Petrology of historic rhyolite and dacite from Usu volcano, North Japan. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, ser. IV, 20, 275 - 290.
- 大場与志男(1989) 北海道有珠火山円頂丘溶岩(石英安山岩)中のCrystal clots. 岩鉱, 84, 192 - 199.
- Okumura, K., Soya, T., Ono, K. and Satoh, H. (1981) Petrology of rhyolite and dacite erupted in last 300 years from Usu volcano, Japan. Abstracts 1981 IAVCEI Symposium, 276 - 277.
- 佐藤久夫・松久幸敬・宮城磯治・東宮昭彦・風早康平・山元孝広(2000) 有珠2000年噴出物の酸素同位体微小分析. 日本火山学会講演予稿集, 2000, no.2, 31.
- Satoh, H. (2000) Oxygen isotope microanalysis of a large orthopyroxene clast in A-881526 diogenite. *Antarctic Meteorite Res.*, 13, 238 - 255.
- Sharp, Z. D. (1990) A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54, 1353 - 1357.
- 曾屋龍典・勝井義雄・新井田清信・堺幾久子(1981) 有珠火山地質図. 火山地質図2, 地質調査所.
- 宝田晋治・吉本充宏・北川淳一・平賀正人・山元孝広・川辺禎久・高田 亮・中野 俊・星住英夫・宮城磯治・西村裕一・三浦大助・廣瀬 亘・石丸 聡・垣原康之・遠藤祐司・八幡正弘・野呂田 晋・新井田清信・石塚吉浩・工藤 崇・相沢幸治・本間宏樹・江草匡倫・石井英一・高橋 良(2001) 有珠火山2000年噴火の降灰と火口近傍の状況. 地調研報, 52, 167 - 179. (本特集号)
- 谷口宏充・後藤章夫・大場 司・横尾亮彦・宮本 毅・大島弘光(2000) 有珠山2000年噴火の爆発パラメータと爆発機構. 日本火山学会講演予稿集, 2000, no.2, 36.
- Tomiya, A. (1995a) Reconstruction of an evolving magma-feeding system beneath Usu volcano. Ph.D. Thesis, Tokyo Institute of Technology, 191p.
- 東宮昭彦(1995b) 有珠火山は今後も噴火し続けるか. 科学, 65, 692 - 697.
- Tomiya, A. and Takahashi, E. (1995) Reconstruction of an evolving magma chamber beneath Usu Volcano since the 1663 eruption. *Jour. Petrol.*, 36, 617 - 636.
- 東宮昭彦(1996) 温度計・圧力計としての磁鉄鉱の副成分組成. 日本火山学会講演予稿集, 1996, no.2, 41.
- 東宮昭彦(1997) 実験岩石学的手法で求めるマグマ溜まりの深さ. 月刊地球, 19, 720 - 724.
- 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, 2000, no.2, 30.
- 宇井忠英・総合観測班地質グループ(2000) 有珠山2000年噴火:噴火の推移と災害. 日本火山学会講演予稿集, 2000, no.2, 23.
- 山元孝広(2001) 有珠火山2000年噴火でのマグマ水蒸気爆発と火砕流到達域予測. 地調研報, 52, 231 - 239. (本特集号)

(受付:2001年1月10日; 受理:2001年1月10日)