

## 粒度分布と凝集構造から見た有珠山 2000年3月31日 噴火の火山灰

長井大輔\*・遠藤邦彦\*・国方まり\*・中山聡子\*・本松史年\*  
大野希一\*・千葉達朗\*\*・鈴木正章\*\*\*

(2001年8月15日受付, 2002年7月26日受理)

### Grain Size Distribution and Aggregate Structure of Volcanic Ash Produced during the Phreatomagmatic Eruption on 31 March, 2000, Usu Volcano

Daisuke NAGAI\*, Kunihiko ENDO\*, Mari KUNIKATA\*, Satoko NAKAYAMA\*,  
Fumitoshi MOTOMATSU\*, Marekazu OHNO\*, Tatsuro CHIBA\*\* and Masaaki SUZUKI\*\*\*

Usu Volcano commenced the first eruption with a phreatomagmatic explosion at the western foot of the volcano on 31 March 2000. The total eruptive products during the March 31 eruption attained to  $2.4 \times 10^5$  tons, which was the largest among the numerous number of eruptions in the following months.

In this paper, transport and depositional processes, aggregate structure and whole deposit grain size population were investigated for the March 31 tephra of the phreatomagmatic eruption.

Each sample of March 31 tephra dispersed to NE, reaching to Sapporo 80 km away from the vent, was analyzed in grain size. The grain size distribution of each sample was separated into a, b and c subpopulations, which are characterized by Log-normal distribution. The subpopulation-a (in sand and granule) decreases gradually in mean grain size with distance. Even in proximal area, however, subpopulations-b (coarse silt) and -c (fine silt to clay) occupy about 30 wt.%. Subpopulations-b and -c tend to increase gradually with distance. This is because the tephra fell out mainly as aggregate ash, as eyewitnessed on the day of the eruption and observed in the deposits.

Aggregate ash is classified into two types. One is ash-coated grain (type 1) : a sand-size core is coated with grains mainly finer than  $45 \mu\text{m}$ . Another is irregular ash aggregate (type 2): sand-, silt- and clay-size grains are accreted irregularly. Based on the experiment Schumacher and Schmincke (1995) thought that the rims composed of grains finer than  $45 \mu\text{m}$  are accreted by the electrostatic attraction in the rim-type accretionary lappilli, which is similar to the type 1 in this paper. Such condition will exist only in the ash plume near the vent. In case of the type 2, capillary forces may accrete grains of various sizes in the higher and/or distant ash cloud where binding liquid is abundant by the condensation of moisture. As the type 1 is distributed only within 200 m from the vent, binding forces of aggregate ash probably changed from electrostatic attraction to capillary forces beyond 200 m.

The whole deposit grain size population was reconstructed for the deposits of the March 31, phreatomagmatic eruption. It ranges widely from granule- to clay- size. Silt and clay occupy nearly half of the total. The whole deposit population fits for composite population of four subpopulations with Rosin-Rammler distribution. Each subpopulation is checked by the result of component analysis. Lithic fragments are dominant in the coarsest subpopulation-1, pumice and glass shards with fine crystals are dominant in the subpopulation-2, fragments of crystals are dominant in subpopulation-3, and fine fragments of pumice and glass shards without crystal are dominant in the finest subpopulation-4. This suggests a possibility that the fragmentation processes by the March

\* 〒156-8550 世田谷区桜上水 3-25-40  
日本大学文学部地球システム科学科  
Department of Geosystem Sciences, College of  
Humanities and Sciences, Nihon University, 3-  
25-40, Sakurajousui, Setagaya-ku, Tokyo 156-  
8550, Japan.

\*\* 〒243-0014 厚木市旭町 5-42-32

アジア航測(株)

Asia Air Survey Co., 5-42-32, Asahi-cho,  
Atsugishi, Kanagawa 243-0014, Japan.

\*\*\* 〒061-1101 北海道北広島市中之沢 149  
道都大学短期大学部

Dohto University, 149, Nakanosawa, Kita-  
hiroshima-shi, Hokkaido 061-1101, Japan.

31 phreatomagmatic eruption produced a composite population of four different Rosin-Rammler subpopulations corresponding to different source materials.

## 1. はじめに

2000年3月31日13時頃に有珠火山の西山西麓で23年ぶりの噴火が始まった。同日の噴火（以降、3月31日噴火と呼ぶ）は、有珠火山2000年噴火の中で最も規模が大きく、噴煙は最大で海拔高度約3000m以上に達した。噴煙は主に北東方向に流され、その降灰は火口から約80km離れた札幌でも観測された（遠藤・他、2001）。この3月31日噴火による降灰量は、約24万トンと見積もられている（大野・他、2002）。また、火口から約12km離れた洞爺湖東岸に降下した火山灰に、およそ半分に達するマグマ物質が含まれることから、同噴火はマグマ水蒸気噴火であったとされた（東宮・他、2001）。

噴火に際して、マグマや火道周辺岩石などの粉碎によって生じる粒度分布を把握することは、噴火で生じた爆発の規模やメカニズムを捉える上で重要である。また、火砕物が火口の上空に放出され、噴煙として風下に運搬される過程でどのように降下・堆積するかを明らかにすることは、噴火による降灰プロセスの理解をより深めるだけではなく、将来の噴火で生じる降灰の影響予測につながると考えられる。本稿では有珠火山の2000年3月31日噴火に着目し、同噴火によってもたらされた堆積物の調査に基づいて、マグマ水蒸気噴火における降下火砕物の運搬・堆積過程と噴火で生じたテフラ全体の粒度分布の持つ意味を論じる。

## 2. 有珠火山2000年3月31日噴火の推移とその堆積物の概要

有珠山2000年噴火の推移や、それらがもたらした堆積物の特徴については、大野・他（2002）に述べられているので、ここではその内、本論で関わってくる部分について簡単にまとめる。

### 2-1 3月31日噴火の推移

3月31日噴火の始まりは同日13時07分で、火口から灰白色のカリフラワー状噴煙を上昇させた。噴火の最盛期は、13時29分から14時51分の間で、海拔高度2000mを超える噴煙が少なくとも3回認められた。この内最大のものは3000m以上に達した。この前後の噴火で発生した噴煙は主に北東方向に流された。噴火はその後、15時頃より穏やかになり、次第に白色の小規模な噴煙を上げる噴火に移り変わった。また、同日の一連の噴火では、一部火砕サージと思われる現象が認められた（遠藤・他、2001）。噴火の映像観察から、火砕サージと思われる現象の発生が、噴火の初期、噴火の最盛期、その後

の噴火が穏やかになった時期の少なくとも3回で確認され、その中には噴煙の部分崩壊に関係して発生したものもあった（国方・他、2001）。

### 2-2 3月31日噴火によってもたらされた堆積物

3月31日噴火の主要な活動である同日16時頃までの噴火に対応する堆積物は、大野・他（2002）でLayer Aと称される。この堆積物は、有珠山2000年噴火によるテフラの最下部に認められ、明灰色の粗粒砂～シルトを主体とする火山灰層である。

Layer Aは、3月31日噴火直後の降灰調査によって、有珠山北東方の広い範囲で多数採取され、極めて降灰の微量な地域を含めた分布や産状についての報告がなされた（遠藤・他、2001）。図1-(a)にLayer Aの遠方域における降灰分布と試料採取地点を示す。また、火口から約2km間の調査が同年5月より行われ、詳細な層序研究に基づいて同範囲におけるLayer Aの試料が採取され、その分布や産状も明らかになった（図1-(b)）。

このようにして得られた試料は、3月31日噴火の主要な活動であった同日16時頃までの噴火を代表するものとして重要である。本稿では同日16時までの堆積物を便宜上3月31日テフラと呼び、これらの試料を対象に3月31日噴火について検討する。また、この噴火で観察された火砕サージによる堆積物は、図1-(b)において火口から北および北西方向に約600m程度伸びるロープを形成する（遠藤・他、2001）。この地域の試料については、テフラの降灰プロセスを検討する上では運搬プロセスの異なるものとして除外し、3月31日噴火で生じたテフラ全体の粒度分布を推定する際には、これらを含めて検討を行った。

## 3. 3月31日テフラの粒度分布とその水平的変化

### 3-1 試料の採取と分析

本節ではまず、3月31日テフラの降灰プロセスと堆積物の関係を検討するために、堆積物の粒度分布を報告する。試料は、3月31日の降灰分布の全域に渡る合計38点で3月31日テフラ層の上から下までまんべんなく採取されたものを用いた（図1-(a), (b)）。分析は4φより粗粒部については湿式ふるいで0.5φ間隔で測定し、4φより細粒部についてはレーザー回折式粒度分布測定装置（島津製作所製SALD3000S）を用い、それらの結果を接合して粒度分布を求めた。接合は、4φのふるいを通した粒子の重量比に、レーザー回折式粒度分布測定装置で得られた粒度分布の割合（体積比）を単純に掛け合わせ

て、結果を合成した。ここで  $4\phi$  のふるいを通過した粒子の密度を一定と仮定すれば、全体が重量比を示すことになる。

3-2 結果：3月31日テフラの粒度分布

粒度分析の結果得られたデータについて、モーメント法 (Friedman, 1961) を用いた粒度統計値の算出を行っ

た。図 2-(a), (b) は、得られた粒度統計値を火口からの距離ごとに示したものである。図中のローマ数字は、図 3-(a) にヒストグラムを示す試料番号で、その採取位置を図 1-(a), (b) に示す。

図 2-(a) に示すように、平均粒径 (mean  $\phi$ ) は火口から約 30 km までの範囲 (地点 I~VI) で  $2\phi$  から  $4.5\phi$  へと距離を経るごとに細粒化の傾向が認められる。一方、火口から 30 km 以遠 (地点 VII~IX) の平均粒径は  $5\phi$  付近で変化がない。図 2-(b) に示す淘汰度 ( $\sigma\phi$ ) は全体として距離を経るごとに良くなる。火口から 30 km の範囲の淘汰度は 3.5 から 2.0 前後へと火口からの距離に対して良くなる傾向が顕著であるが、30 km 以遠の範囲の淘汰度は 1.5~2.0 付近であり変化がない。

図 3-(a) は 3 月 31 日テフラの降灰分布主軸に沿う代表的な地点の粒度ヒストグラムを火口から近い順に並べたものである。

火口から 22 km までの範囲の粒度分布 (地点 I~VI) は、図 3-(a) 上で砂サイズを主体とする集団 (モード:  $1\sim3\phi$ ) とシルト~粘土サイズを主体とする集団 (モード:  $5\sim8\phi$ ) からなるバイモーダルな分布を示す。火口か

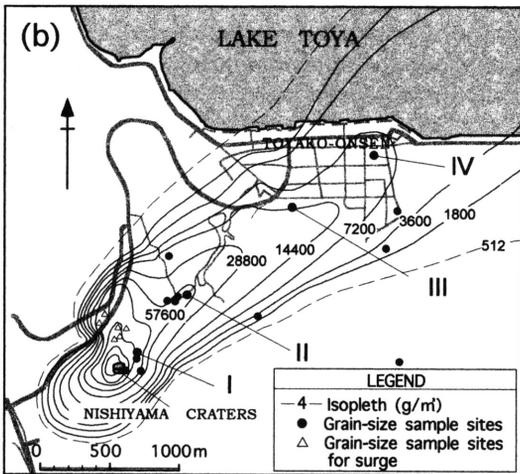
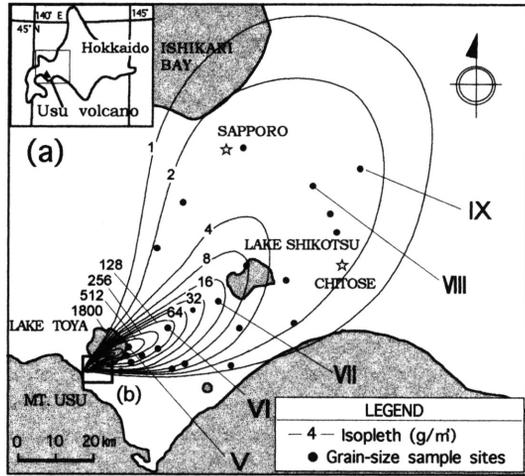


Fig. 1. Isopleth map of the Usu 2000 eruption, the March 31 tephra, showing sample sites for grain-size analyses (modified from Endo *et al.*, 2001). Fig. 1-(b) shows the isopleth map in the proximal area. I~IX: localities of samples shown in Fig. 3.

図 1 有珠山 2000 年 3 月 31 日テフラの堆積量 ( $g/m^2$ ) の分布と粒度分析試料の採取地点 (遠藤・他, 2001 を修正)。調査地点は遠藤・他 (2001) 参照。図 1-(b) は火口近傍でその範囲を図 1-(a) に示す。I~IX は、図 3 に粒度ヒストグラムで示される試料。

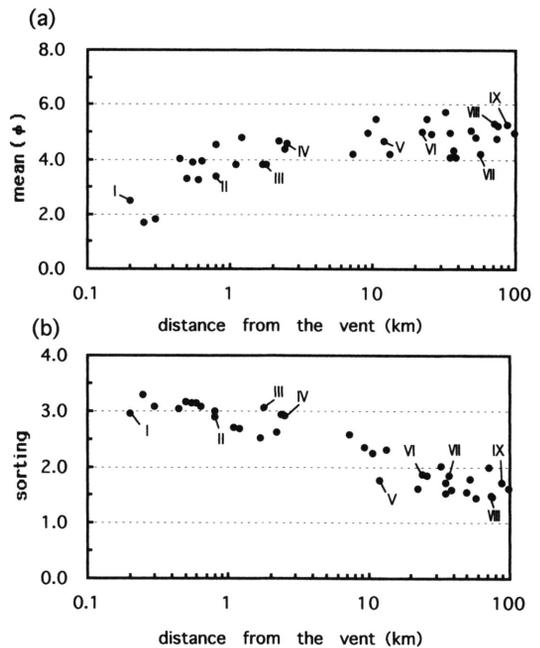


Fig. 2. Spatial variation of grain-size parameters of the March 31 tephra. I~IX: samples shown in Fig. 3. Parameters calculated by moment method. (a) mean grain size, (b) sorting ( $\sigma\phi$ )

図 2 3 月 31 日テフラの粒度統計値の距離別変化。I~IX は、図 3 に粒度ヒストグラムで示される試料。(a) 平均粒径。(b) 淘汰度。

ら 22 km 以遠のヒストグラム (地点 VII~IX) は、それまでバイモーダルであった粗粒側のモードが減少し、細粒側のモードが主体のユニモーダルな分布に変化する。

3-3 粒度分布の小集団解析

一般に運搬過程の中で淘汰された堆積物の粒度分布の多くは、対数正規分布に従うことが知られており、風によって運搬される降下テフラも対数正規分布に従う場合が多い (Kittleman, 1964)。図 3-(a) にみられるように、3

月 31 日テフラの粒度分布は明瞭な複数のモードからなる。一般に火砕物の粒度分布も、単一あるいは複数のエネルギー環境に支配されて堆積するために、それらの粒度分布は一つないし複数の対数正規分布の複合とみなすことができる (Sheridan, 1971)。Sheridan *et al.* (1987) は降下テフラなどの粒度分布を図上で解析し、任意の平均粒径、淘汰度、割合をもつ対数正規分布集団を合成させ、その作業を繰り返して行い、もとの分布に最も適合するものを求めることによって、小集団に分割した。ここでは 3 月 31 日噴火の降下テフラの運搬・堆積過程を詳しく検討するために、Sheridan *et al.* (1987) の対数正規分布に基づく小集団解析を用い、降灰分布主軸に沿う試料 (地点 I~IX) の粒度分布について定量的評価を行った。その結果を図 3-(b) に示す。同テフラ試料の粒度分布は、そのモードの位置から 3 つの小集団 (小集団 a, b, c) に分けられる。それぞれの小集団の割合を表 1 に示す。また、同表にこれらの割合を用いて再合成した分布ともとの分布との相関 (ピアソンの積率相関係数, Pearson and Hartley, 1958) を示す。同表の相関に見られるように、相関係数は全て 0.9 台と強い相関を示し、それぞれの小集団から合成された分布は、もとなる分布をほぼ反映し

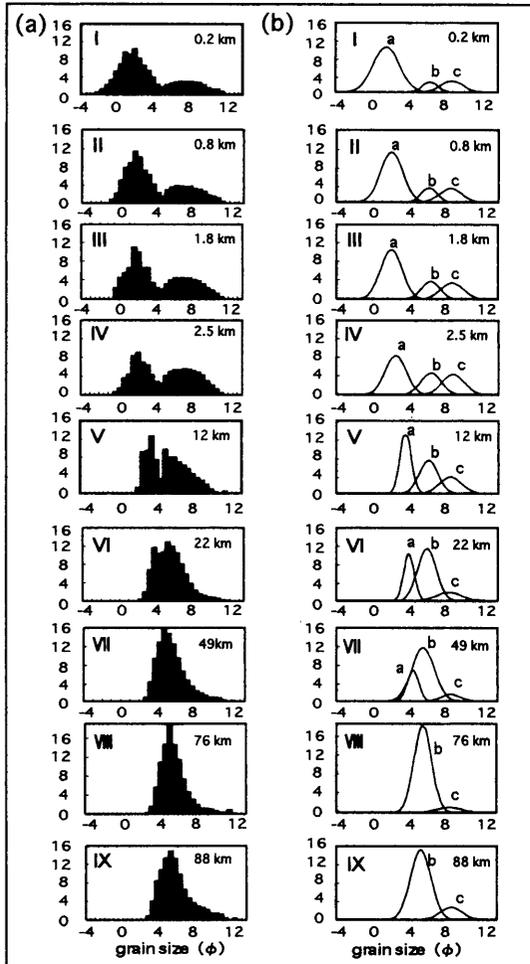


Fig. 3. Change of grain-size histograms in distance from the vent (a), and separation into subpopulations with Log-Normal distribution. (b) Figures at upper right corner are distance from the vent. Sample sites are shown in Fig. 1.  
 図3 降灰分布の主軸に沿う地点での粒度ヒストグラムの距離変化 (a) と、その対数正規分布小集団 a, b, c への分割結果 (b)。右上の数字 (km) は火口からの距離。図中のローマ数字 (I~IX) は試料採取地点を示し、その位置は図 1-(a), (b) を参照。

Table 1. Proportion of separated subpopulations (a, b, c) for each sample site along the main dispersal axis, and correlation coefficient (R) between composite population from three subpopulations and original population for each site.

表 1 3 月 31 日テフラの降灰分布の主軸に沿う粒度分布の各小集団 (a, b, c) の割合および、小集団解析によって分割された小集団を再合成した曲線と元の分布との相関係数。ローマ数字は、3 月 31 日テフラの降灰分布の主軸に沿う粒度分析試料 (地点 I~IX, 図 3 参照)。

Sample site	Subpopulation (%)			R
	a	b	c	
I	73	10	17	0.993
II	67	14	19	0.989
III	60	19	21	0.979
IV	47.5	26	26.5	0.990
V	41	37	22	0.961
VI	29	58	13	0.994
VII	8	71	21	0.997
VIII	0	91.7	8.3	0.997
IX	0	83	17	0.995

ているものと思われる。また、これら各小集団の平均粒径の距離別変化を図 4 に示す。小集団 a は、砂サイズを主体とする集団である。その平均粒径は、距離を経るにつれて  $1\phi$  から  $4\phi$  へと細粒化し、淘汰度は、距離を経るにつれて小さくなる。また、同小集団は 22 km 以遠では小集団 b に一体化する。小集団 b は、シルトサイズを主体とする集団である。その平均粒径は、距離を経るにつれて  $5.5\phi$  から  $4.7\phi$  へと若干粗粒化する傾向が認められる。また、その淘汰度は距離を経ても顕著な変化が認められない。小集団 c は、シルト～粘土サイズを主体とする集団である。その平均粒径と淘汰度は、距離を経ても顕著な変化が認められない。

一般に火山灰の降下は主に粒子の密度と粒径などで決定される終端速度に支配されていることから、小集団 a の距離に対する細粒化の傾向は妥当なものである。しかし一方で、小集団 b, c のような細粒子が火口近傍においても存在し、それらの粒度分布が距離を経ても変化しない、あるいは一部は逆に粗粒化する傾向が認められることは特異である。

#### 4. 3 月 31 日テフラの降下形態と堆積物の産状

##### 4-1 凝集して降下した 3 月 31 日テフラ

有珠山 2000 年噴火では、火山灰が凝集体として降下

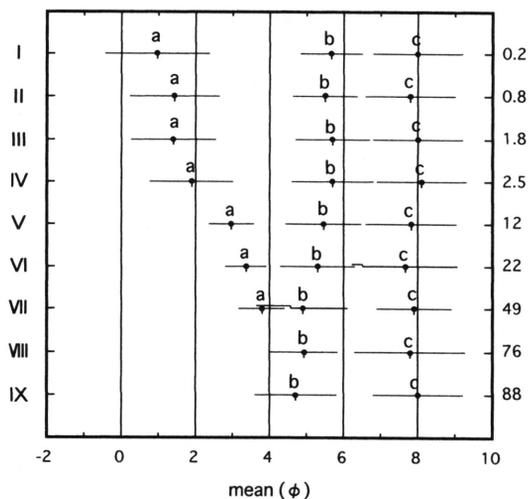


Fig. 4. Spatial variation of mean ( $\phi$ ) for separated subpopulations of the March 31 tephra. Dots and bar indicate the mean and sorting for each subpopulation respectively (a, b, and c same as in Fig. 3-(b)).

図 4 有珠山 2000 年 3 月 31 日テフラの小集団の特徴。黒丸は各小集団の平均粒径。横バーの長さは淘汰度を示し、黒丸上のアルファベットは図 3-b 中の小集団の番号に対応している。

する模様が観察されている。3 月 31 日 15 時の NHK のテレビ中継では、火口から約 15 km 離れた壮瞥町で、広げた紙の上に直径 1~2 mm の凝集粒子が降下している様子が撮影されている。この時の降灰は、一部泥雨として降ったことから、凝集粒子に多くの水分が含まれていたものと考えられる。噴火後まもなく行われた現地調査では、火口から約 12 km の洞爺湖畔において直径 1~2 mm の凝集粒子が堆積していた。写真 1 は、この地点に認められた最大径の凝集粒子で、葉の上でつぶれていた。このほか、遠方の多くの地点では雪の上や雪の中に同様な凝集火山灰がまばらに散在する様子が認められた。

##### 4-2 凝集火山灰の採取と分析

3 月 31 日テフラに認められた凝集粒子の内部構造を詳しく観察するために、同テフラの降灰域の主軸に近い地点で堆積物をその構造を保持した状態でブロック状に採取した (図 1-(a) の地点 I の西方, 地点 II, 地点 IV)。この試料を実験室で樹脂を用いて硬化させ薄片を作成し、その内部構造を双眼実体顕微鏡を用いて観察した。ただし、地点 I の西方の試料には、火砕サージ堆積物も含まれる。

##### 4-3 結果: 凝集粒子の内部構造

写真 2 は火口から 200 m までの範囲を代表する凝集粒子の薄片写真である。この範囲の堆積物には直径 6~1 mm (約  $2.5\sim 0\phi$ ) 前後の同様な凝集粒子が多数認められる。またそれらの内部構造の観察では、直径 1~0.1 mm (約  $0\sim 3.3\phi$ ) の砂サイズの粒子からなる核を直径 45  $\mu\text{m}$  (約  $4.5\phi$ ) 以下の粒子からなるリムが取り巻いている様子が認められる (ash-coated grain: 以下 Type 1)。このリムは主に直径 10  $\mu\text{m}$  (約  $6.6\phi$ ) 以下の粒子が多い。

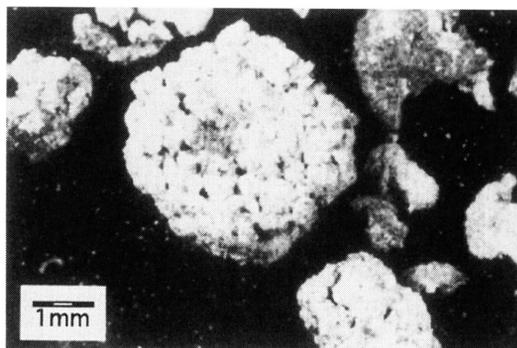


Photo. 1. Type 2 aggregate ash of the March 31 tephra, Usu 2000 eruption, preserved on a tree leaf on the east shore of Lake Toya, 12 km from the vent.

写真 1 洞爺湖東湖畔 (火口から約 12 km) で葉の上に付着していた凝集粒子。

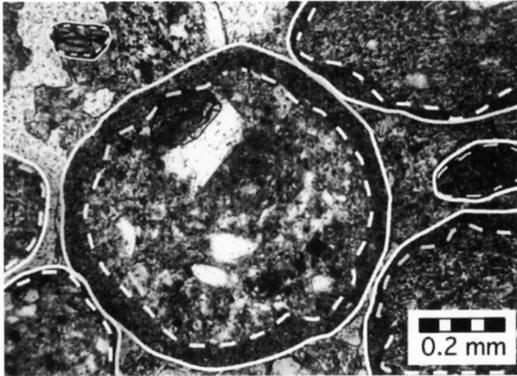


Photo. 2. Type 1 ash-coated grains in the March 31 tephra, Usu 2000 eruption found within 200 meters from the vent. Sand-sized fragments of phytic volcanic rock form cores, coated with dark rims composed of very fine particles. The sample taken from west of the site III.

写真2 火口から200 mまでの範囲を代表する Type 1 の凝集粒子の薄片写真. 砂サイズの粒子からなる核 (斑状組織を示す火山岩片) を細粒な粒子からなるリム (暗色部) が取り巻いている. 試料は地点 I の西方で採取.

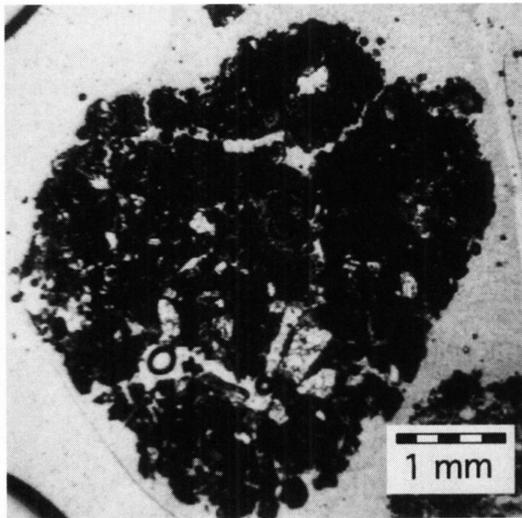


Photo. 3. Internal structure of type 2 aggregate ash found in the March 31 tephra, Usu 2000 eruption, beyond 800 meters from the vent. This one has a diameter of several millimeters and consists of irregularly accreted sand-, silt- and clay-size grains. The sample taken from the site II.

写真3 火口から800 m以遠の範囲を代表する Type 2 の凝集粒子の薄片写真. 写真中の直径数 mm の塊のように, 一つの凝集体の内部には, 砂, シルト, 粘土サイズの様々なサイズの粒子が不規則に凝集している様子が認められる. 試料は, 地点 II で採取.

写真3は, 火口から800 m以遠の範囲を代表する凝集粒子の薄片写真である. 同様な凝集粒子は火口から離れるにつれて卓越する傾向が認められる. 凝集体の多くは, 直径1 mm (0φ) 前後のものである. また, 一つの凝集体の内部には, 主に直径250 μm (2.0φ) 以下の様々なサイズの粒子が不規則に凝集している様子が認められる (irregular aggregate ash: 以下 Type 2). 前述の写真1の凝集粒子もこのタイプに属する.

## 5. 3月31日テフラの全体的な粒度分布

### 5-1 3月31日テフラの全堆積物粒度分布の見積り

次に2000年3月31日噴火によって生じたテフラ全体の粒度分布を検討する. 噴火に際して, マグマや火道周辺岩石の粉碎によって生じる粒度分布を直接的に捉えることは困難である. しかし, その傾向は噴火による全堆積物の粒度分布に反映されると考えられている (鈴木・他, 1973; whole deposit grain size population: Walker, 1981; total grain size distribution: Sparks *et al.*, 1981). 図5に全堆積物粒度分布を見積もるために本稿で用いた手順を示す. まず, 3月31日テフラの分布図 (図1) 上で3月31日火口を中心にいくつかの円弧を描く (図5). この時, 前述のように火口から約30 kmまでの範囲では粒度分布の距離に対する変化が顕著であるので, 円弧の間隔を狭くとる. 次に火口を中心に30度ごとの角度で放射状の直線を描き, この直線と各円弧によって囲まれる範囲 (同図の領域 a~z) で3月31日テフラの降灰分布を26の領域に分割した. この時, 領域内に試料採取地点がないものについては, 隣接する領域と接合した. 次に, 降灰量の等値線から各領域内の降灰量を算出し, この値を各領域の代表点における粒度分析結果にかけ合わせて, 各領域内に存在するテフラの粒度階毎の粒子重量を求めた. ここで代表点に用いた試料は, 図5に示す44点から採取されたもので, 火砕サーージ堆積物の分布領域も含む. 一つの領域に複数の試料採取点がある場合は, それらの算術平均値を用いた. 以上の作業を全ての領域で行い, 結果を全て積算して全堆積物粒度分布を求めた.

### 5-2 結果: 3月31日テフラの全堆積物粒度分布

図6-(a)は, 3月31日テフラの全堆積物粒度分布の粒度ヒストグラムである. 同図に見られるように, 全堆積物粒度分布は-3~12φ (8 mm~0.2 μm) の小礫~粘土サイズに渡り, この内シルト以下の粒子が全体の約半分を占める.

### 5-3 3月31日テフラの全堆積物粒度分布の小集団解析

Krumbein and Tisdell (1940) は, 機械的な粉碎や火山噴火によって生成される碎屑物質の粒度分布はロジン・

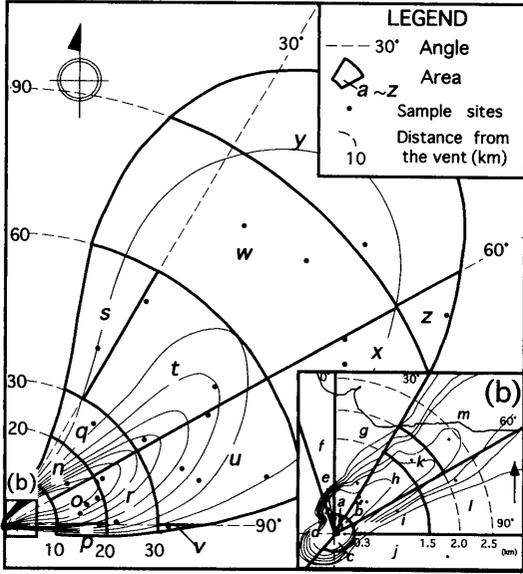


Fig. 5. Isopleth map showing the method of calculation for the whole deposit grain size population of the March 31 tephra. Weight obtained from each sector *a* to *z* was divided into each grain size-grade according to the representative grain size distribution in each sector. Then each weight of each size-grade was summed up to estimate whole deposit grain size population.

図5 3月31日テフラの全堆積物粒度分布を見積もる手法を示す等重量線図。各領域 (*a*~*z*) のテフラ重量に各領域を代表する粒度分布をかけ合わせることで、粒度階ごとのテフラ重量を求め、それらの結果を積算して全堆積物粒度分布を求めた。

ラムラー分布 (Rosin and Rammler, 1933) に従うと指摘した。前述のように、火砕物は噴煙として風下に運搬される過程で淘汰され、その粒度分布は対数正規分布で説明される。しかし、そのもとは火山噴火による粉碎過程によってもたらされたものであるため、もとなる分布はロジン・ラムラー分布に従うことが期待される。鈴木・他 (1973) は、樽前火山のマグマ噴火による降下軽石堆積物 (Ta-b 層) について全堆積物粒度分布を求め、それらがほぼロジン・ラムラー分布に従うことを示した。そこで本研究でも、マグマ水蒸気噴火による3月31日テフラの全堆積物粒度分布が、ロジン・ラムラー分布に従うかどうかを検討した。すなわちロジン・ラムラー分布に基づく小集団に全堆積物粒度分布をフィットさせ、3-3節と同様に分割・合成を繰り返し、もとの分布に最も適合するものを求めた。解析の結果を図6-(b)に示す。同粒度分布は同図のように、図中の実線で示したロジン・ラムラー分布小集団 (1, 2, 3, 4) に分けられる。それぞれの小集団の割合を表2に示す。図6-(b)中の点線で示した分布は、表2に示した各小集団 (1, 2, 3, 4) の割合を用いてこれらの小集団を再合成したものである。また、同表にこの再合成した分布ともとの分布との相関 (ピアソンの積率相関係数) を示す。この相関に見られるように、それぞれの小集団から合成された分布は、もとの分布と強い相関を示し、もとの分布をほぼ反映しているものと思われる。小集団1は $-2 \sim 5\phi$ の小礫~砂サイズを主体とする集団。小集団2は $0 \sim 8\phi$ の砂~シルトサイズを主体とする集団。小集団3は $4 \sim 8\phi$ のシルトサイズを主体とする集団。小集団4は $4\phi$ より細粒なシルト~粘土サイズを主体とする集団である。

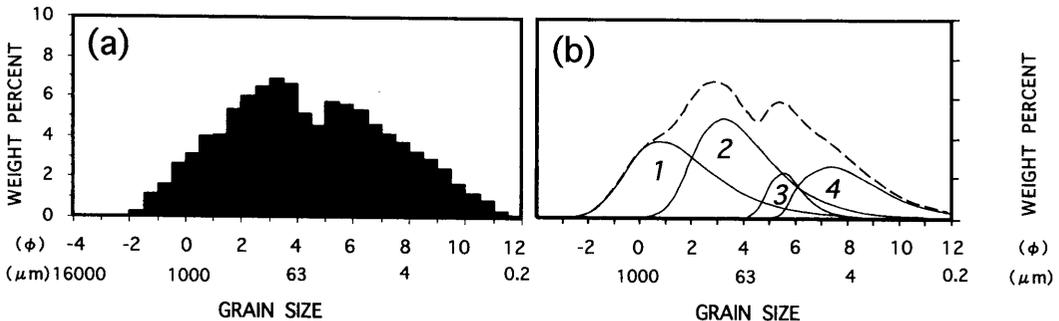


Fig. 6. Estimated whole deposit grain size population of the March 31 tephra Usu 2000 eruption. (a) Histogram showing the estimated total grain size distribution of the March 31 tephra, Usu 2000 eruption. (b) Separation of whole deposit grain size population into four subpopulations (1, 2, 3, and 4) with Rosin-Rammler distribution. Broken line shows the population composed of 4 subpopulations.

図6 有珠山2000年噴火3月31日テフラの全堆積物粒度分布。(a)有珠山2000年噴火3月31日テフラの全堆積物粒度分布を示すヒストグラム。(b)全堆積物粒度分布の小集団分割。イタリック数字は、表2の小集団の番号に対応。点線で示した分布は、表2の小集団の割合を用いて小集団を再合成した分布。

Table 2. Proportion of separated subpopulations (1, 2, 3, 4) for whole deposit grain size population, based on Rosin-Rammler distribution and correlation coefficient (R) between composite population from four subpopulations and original population.

表2 ロジン・ラムラ分布に基づいて全堆積物粒度分布から分割された小集団 (1, 2, 3, 4) の割合とそれらを合成した分布と元の分布との相関。

Subpopulation(%)				R
1	2	3	4	
33	38	8	21	0.977

## 6. 3月31日テフラの構成粒子組成

### 6-1 手法

マグマや基盤岩、古い山体などのテフラのもととなる物質の物性の違いが、テフラの距離ごとの粒度分布やテフラ全体の粒度分布にどのように関係しているかを調べるために、3月31日テフラの構成粒子分析を行った。測定に用いた試料は、火口から0.2~88 kmまでの範囲を代表する降灰分布の主軸に沿う4点 (地点I, IV, V, IX) で採取されたものである。これらの試料を湿式ふるいを用いて4φまでふるい分けし、4φよりも細粒なものについては、ピペット法を用いて8φまで1φ間隔で抽出した。その後、4φまでの粒子はそのまま双眼実体顕微鏡および偏光顕微鏡を用いて観察し、4φよりも細粒なものは粒片プレパラートを作成し、40倍、1000倍の対物レンズを有する偏光顕微鏡を用いて観察を行った。測定は、各粒度ごとに1φ間隔で200個以上の粒子を最小で8φ (4μm)まで観察した。8φ (4μm)より細粒な粒子に関しては、微細であるために偏光顕微鏡を用いた観察が困難であるため、本論では測定していない。

### 6-2 結果

3月31日テフラは主に、玄武岩質岩片やデイサイト質岩片、変質岩片などの様々な岩片 (構成物1)、発泡度が高く、灰白色~灰色の軽石および透明な火山ガラスで微斑晶に富むもの (構成物2)、斜長石や磁鉄鉱を主とする結晶片 (構成物3)、透明な軽石および火山ガラスで無斑晶のもの (構成物4)、変質した褐色不透明な軽石および火山ガラス (構成物5) から構成されている。特にこの内、構成物2は直径数μm~数十μmの細かい球状の気泡をもち、斜長石や磁鉄鉱を主とする多数の微斑晶を有する点で特徴的である。また、構成物4は一部繊維状に発泡するものやバブルウォール型の火山ガラスを含む。東宮・他 (2001) では、発泡度の高い軽石および火山ガ

ラスで、直径数μm以下の細かい球状の気泡をもち、斜長石や磁鉄鉱を主とする多数の斑晶を有するものを、その形態観察や化学分析に基づいて3月31日噴火の本質物質として報告している。これは、本稿の構成物2に類似するものである。また、東宮・他 (2001) では、無斑晶の透明な軽石および火山ガラスで繊維状に発泡するものやバブルウォール型の火山ガラスを含むものを洞爺火砕流堆積物起源の可能性が強いと報告している。これは本稿の構成物4に類似するものである。

図7は、この内構成物1~4についてその量比を各地

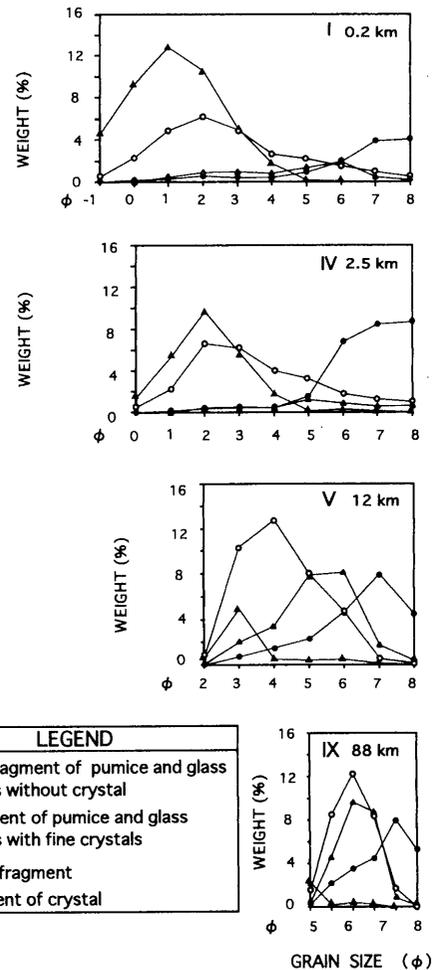


Fig. 7. Variation in component abundance as a function of grain size for the March 31 tephra, Usu 2000 eruption along the main dispersal axis. Roman numerals refer to the sample sites. Numbers in kilometers refer to the distance downwind from the vent.

図7 分布主軸に沿う3月31日テフラの粒徑別構成物比の距離変化。ローマ数字は試料採取地点、数字は火口からの距離を示す。

点で求めた結果を示したものである。その量比は、顕微鏡観察に基づく各構成物の個数比を、各構成物のみかけ密度を同じものと仮定し、その地点の粒度分布の割合にかけ合わせたものである。同図にみられるように、岩片は主に  $2\phi$  よりも粗粒な範囲に多く認められ、発泡度の高い微斑晶入り軽石および火山ガラスは  $2\sim 5\phi$  の範囲に多い。結晶は  $5\sim 7\phi$  の範囲でその割合が高くなる傾向があり、無斑晶の軽石および火山ガラスは  $7\phi$  以下の微細な範囲に多く認められる。このように各構成物はある程度きまった粒径範囲に多く存在する傾向がみられる。

## 7. 考 察

### 7-1 3月31日テフラ粒子の凝集と降下プロセス 粒子の凝集メカニズム

3月31日テフラ中には、火口から 200 m という近傍地域に、最小で約  $12\phi$  (約  $0.2\mu\text{m}$ ) に及ぶ細粒子が降下していた。これら粒子は主に、凝集体 (Type 1) のリムとして降下していた。Schumacher and Schmincke (1991, 1995) は細粒な火山灰からなるリムをもつ火山豆石 (Rim-type) の観察を行い、リムを構成する粒子は  $45\mu\text{m}$  (約  $4.5\phi$ ) より細粒な粒子で、主に  $10\mu\text{m}$  (約  $6.6\phi$ ) 程度のものであることを明らかにした。またさらに、人工的に凝集体をつくりだす実験を行い、静電気力で物体に付着しうる粒子の粒径の上限は  $45\mu\text{m}$  (約  $4.5\phi$ ) 程度であることを求めた。この粒径は火山豆石のリムを構成する粒子の粒径に一致することから、核を取り巻くリムは、静電気によって付着するものと考えた。

火口から 200 m の範囲で多く認められた Type 1 の凝集体の核を取り巻く細粒子の粒径は、上記の静電気力によって物体に付着しうる粒子の粒径範囲に一致することから、Type 1 の凝集体は主として静電気によって形成されたものと考えられる。この静電気による凝集は、噴煙柱の下部の比較的湿度が高く、水分飽和度の低い部分で生じたと考えられる。この時、静電気力によって凝集できる粒径は、図 2-(b) の粒度分布の小集団 c に相当する。

一方、火口から 800 m 以上で Type 1 にとって代わって多く認められる Type 2 の凝集体は、上記の静電気力によって凝集できる粒子よりも粗粒な粒子を多く含むことから、静電気によって生じたものとは考えにくい。火口から約 15 km 離れた地点で凝集粒子が泥雨として降下したことや、火口から約 12 km 離れた地点に降下した凝集粒子が葉の上でつぶれていたことから、凝集粒子に十分な水分が含まれていたことが分かる。このことから、これらが噴煙の冷却に伴って凝結した水滴に、細粒子が付着することによって生成したものであると推測できる。Type 2 を構成する粒子の観察から、水分によって

凝集する主な粒子の粒径は、図 2-(b) の粒度分布の小集団 b に相当する。

上記のような凝集効果が、3月31日テフラの降下過程において、単一では降下し得なかった近い地域に多くのテフラを降下させた主要な要因であると考えられる。

### 7-2 3月31日テフラの降下プロセスとその距離変化

凝集粒子の観察の結果、主軸に沿う火口から 200 m 以内の範囲では、主に静電気による凝集粒子 (Type 1) が多く認められ、それ以外では水分による凝集粒子 (Type 2) が多く認められた。このことは、火口から離れるにつれて静電気による凝集にとって代わって、水分による凝集が卓越したことを示唆する。

図 2-(b) の粒度分布の距離変化では、水分を主体として凝集する小集団 b が火口から 200 m 以上で次第に卓越する傾向がある。これは、同範囲において Type 2 の凝集体が次第に多く認められる傾向と調和的である。

### 7-3 3月31日テフラの全堆積物粒度分布とテフラを構成する粒子との関係

3月31日テフラを構成する粒子のうち、同じ種類のもの、決まった粒径範囲に多く認められた (図 7)。このことは、粉碎によって生じる粒径がもととなる物質の物性の違いを反映している可能性を示唆する。この傾向がテフラの全堆積物粒度分布にどのように反映されているかを検討するため、図 6-(b) の全堆積物粒度分布の小集団と各構成物の粒径範囲とを比較すると、小集団 1 は岩片が卓越する集団、小集団 2 は発泡度の高い微斑晶に富む軽石および火山ガラス、小集団 3 は結晶片、小集団 4 は無斑晶の軽石および火山ガラスに対応するようにみえる。このことは、各種類の構成物が全堆積物粒度分布のそれぞれのモードを構成している可能性を示す。ここで上記の対応関係がある程度全体の関係を反映しているものと仮定すると、これらの小集団の割合を用いて各構成物の堆積物全体に対する割合を概算することが可能である。上記の小集団の内、東宮・他 (2001) の本質物質に類似する物質を主とする小集団 2 は最も割合が多く、全体の 38% を占める。また、非本質物質である岩片を主とする小集団 1 は最も粗粒で、全体の 33% を占める。また、洞爺火砕流堆積物起源の物質を一部含む小集団 4 は最も細粒で、全体の 21%。結晶片を主とする小集団 3 は全体の 8% 程度と推定できる。今後多数地点の試料に基づく精密な分析と、その照らし合わせが行われれば、さらに具体的なテフラ全体における構成物の割合の傾向をある程度概算できる可能性を示すものである。

## 8. ま と め

本稿では、有珠山 2000 年 3 月 31 日のマグマ水蒸気噴

火に着目し、テフラの運搬・堆積過程の特徴を把握する為、粒度分布の水平的変化とテフラの凝集形態の観点から堆積物の特性を明らかにした。

- 1) 3月31日テフラの主軸に沿う地点の粒度分布を対数正規分布に基づいて小集団解析すると、それらは以下の3つの小集団に分けられる。

小集団 a: 砂サイズを主体とする集団。

小集団 b: シルトサイズを主体とする集団。

小集団 c: シルト～粘土サイズを主体とする集団。

この内小集団 a は、距離に対する細粒化の傾向を示した。一方、小集団 b, c は細粒にも関わらず、火口から 200 m という近傍地域に存在し、それらの粒度分布が距離を経ても変化しないという特異な傾向を示した。テフラ中に含まれる凝集粒子の存在とそれらを構成する粒子の粒径範囲から、これらは主にテフラの凝集によって生じたものと考えられる。

- 2) 3月31日テフラ中に含まれる凝集粒子はその凝集形態の特徴から以下の2種類に分けられる。

Type 1: Ash-coated grain

Type 2: Irregular aggregate ash

- 3) Type 1 の凝集体は、噴煙高度の低い部分で静電気力によって形成され、火口近傍に堆積した。一方、Type 2 は、噴煙高度の高い部分や風下に流される噴煙の中で、噴煙の冷却に伴って凝結した水滴によって形成され、その多くは火口から 200 m 以遠に堆積した。
- 4) 3月31日テフラの全堆積物粒度分布をロジン・ラムラー分布に基づいて小集団解析すると、4つの小集団に分けられる。
- 5) 3月31日テフラを構成する粒子の内、同じ種類のものは、距離を経てもある程度きまった粒径範囲に多く認められ、それらの粒径範囲は全堆積物粒度分布を構成する個々のロジン・ラムラー分布小集団と対応するように見える。このことは、粉砕によって生じる粒径が、もとなる物質の物性の違いを反映している可能性を示唆する。

## 謝 辞

本研究の降灰調査にあたっては北海道大学岡田 弘氏、北海道大学宇井忠英氏のお世話になった。また、北海道大学西村裕一氏には、緊急調査時の現地状況に関する情報を提供して頂き、調査にも同行して頂いた。また、気象庁地震火山課湯山弘明氏、札幌管区気象台宮村淳一氏には、当時の気象情報を提供して頂いた。ここに記して篤く御礼を申し上げる。産業技術総合研究所宝田晋治

氏、神戸大学上野龍之氏には有益な議論を頂いた。査読者の古川竜太氏および匿名査読者の指摘は、素稿の改善に大変参考になった。噴火直後の緊急調査にあたっては、以下の方々に加わって頂いた。国立環境研究所陶野郁雄氏、上越教育大学山縣耕太郎氏、都立大学小森次郎氏、日本大学文理学部地球システム科学科学生、同大学大学院総合基礎科学研究科地球情報数理科学専攻大学院生。以上の方々に心から御礼を申し上げる。

なお、本研究の経費の一部は平成12年度日本大学文理学部自然科学研究所共同研究および平成13年度ハイテクリサーチ推進事業による。

## 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。日本大学文理学部自然科学研究所「研究紀要」, 36, 65-73.
- Friedman, G. M. (1961) Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics. *J. Sed. Petrol.*, 31, 514-529.
- Kittleman, L. R. (1964) Application of Rosin's distribution in size-frequency analysis of clastic rocks. *J. Sed., Petrol.*, 34, 483-502.
- Krumbein, W. C. and Tisdell, F. W. (1940) Size distributions of source rocks of sediments. *Amer. J. Sci.*, 238, 296-305.
- 国方まり・大野希一・鈴木正章・西村裕一・遠藤邦彦 (2001) 有珠山 2000～年噴火の火砕物 (その2): 3月31日噴火の推移と層序の関係。日本火山学会 2001 年度秋季大会講演予稿集, 150.
- 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 年噴火火砕堆積物の層序。火山, 47, 619-643.
- Pearson, E. S. and Hartley, H. O. (1958) *Biometrika Tables for Statisticians. volume 1*, Cambridge University Press, 385 p.
- Rosin, P. and Rammler, E. (1933) The laws governing the fineness of powdered coal. *J. Inst. Fuel*, 11, 26-41.
- Schumacher, R. and Schmincke, H-U. (1991) Internal structure and occurrence of accretionary lapilli - a case study at Laacher See Volcano. *Bull. Volcanol.*, 53, 612-634.
- Schumacher, R. and Schmincke, H-U. (1995) Models for the origin of accretionary lapilli. *Bull. Volcanol.*, 56, 626-639.
- Sheridan, M. F. (1971) Particle-size characteristics of pyroclastic tuffs. *J. Geophys. Res.*, 76, 5627-5634.
- Sheridan, M. F., Wohletz, K. H. and Dehn, J. (1987) Discrimination of grain-size subpopulations in pyroclastic deposits. *Geology*, 15, 367-370.
- Sparks, R. S. J., Wilson, L. and Sigurdsson, H. (1981) The pyroclastic deposits of the 1875 eruption of Askja, Iceland. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 299, 241-273.
- 鈴木建夫・勝井義雄・中村忠寿 (1973) 樽前降下軽石堆積物 Ta-b 層の粒度組成。火山, 18, 47-63.

東宮昭彦・宮城磯治・星住英夫・山元孝広・川辺禎久・  
佐藤久夫(2001)有珠火山2000年3月31日噴火とそ  
の本質物. 地質調査研究報告, **52**, 4/5, 215-229.  
Walker, G. P. L. (1981) Generation and dispersal of fine

ash and dust by volcanic eruptions. *J. Volcanol. Geo-  
therm. Res.*, **11**, 81-92.

(編集担当 宝田晋治)