

## 降下軽石堆積物中の遊離結晶の破碎組織

安井真也\*・菅沼由里子\*

(2001年12月4日受付, 2003年1月18日受理)

## Broken Texture of Free Crystals Contained in Pumice Fall Deposits

Maya YASUI\* and Yuriko SUGANUMA\*

The morphology of free crystals contained in fifteen pumice fall deposits from eight volcanoes in Japan was observed. Although most of the crystal faces are filmily covered with vesicular glass, broken surfaces are observed in many free crystals. The ratio of length of broken surface ( $b$ ) to the total circumference of a crystal ( $a$ ) “ $b/a$  value” in the 2-D picture was measured for plagioclase free crystals contained in the deposits. The  $b/a$  values vary from sample to sample and each sample has a wide distribution of the value on the frequency diagram. Previously, broken free crystals in ignimbrites have been reported in many cases, whereas enough has not been known for pumice fall deposits. From the results of this study, broken free crystals are common also in pumice fall deposits indicating that abundant broken free crystals are produced through the eruptive process of explosive eruptions like plinian and subplinian style.

## 1. はじめに

一般に溶結凝灰岩は破片状の結晶を含む場合が多いことが知られている。破片状結晶の有無を根拠の一つとして、強度に溶結した火砕流堆積物と溶岩の区別を行った研究例がある(例, Manley, 1995; Henry and Wolff, 1992)。しかし、火山噴出物中の破片状結晶自体に着目した記載は少ない。降下軽石堆積物は、1 mm 前後より細粒側の幅広い粒径にわたって斜長石や輝石などの遊離結晶を含む場合が多い。一般に遊離結晶は発泡したガラスに薄く覆われており、ガラスの覆いの外形は軽石や火山ガラスの外形と類似する。したがってマグマの破碎過程では、軽石や火山ガラスが生産されるだけでなく、マグマ中に含まれていた結晶も遊離するものとみられる。ピナツボ火山1991年噴火の降下軽石堆積物には、破片状の遊離結晶が多く含まれることが報告されているが(Pallister *et al.*, 1996; Ohno, 1999)、一般に降下軽石堆積物には破片状結晶は含まれないという意見もあり(Best and Christiansen, 1997)、実態がよくわかっていない。日

本の8火山15例の降下軽石堆積物の遊離結晶の形態観察を行った結果、破片状の遊離結晶が普通に見出されることが明らかとなったので報告する。

## 2. 観察対象と方法

## 2-1 観察対象

本研究では、以下の堆積物に含まれる遊離結晶を観察対象とした。テフラ名と年代(括弧内)は町田・新井(1992)に基づいた。なお、降下軽石堆積物には複数の降下単位がある場合が多いが、ここでは任意の層準の降下単位から試料を採取した。比較のため、4火山4例の火砕流堆積物に含まれる遊離結晶の形態観察も行った。

## 降下軽石堆積物:

樽前山: Ta-a (1739 A.D.), Ta-c (2.5~3 ka), 北海道駒ヶ岳: Ko-a (1929 A.D.), Ko-d (1640 A.D.), 榛名: Hr-FP (6世紀中葉), 浅間: As-A (1783 A.D.), As-B 上部\*と下部(1108 A.D.), As-C (4世紀), As-K (13~14 ka), As-YP (13~14 ka), 霧島・新燃岳: Kr-SmK (1717 A.D.), 桜島: Sz-1 (1914 A.D.), 支笏第一: Spfa-1 (31~34 ka), 始良大隅: A-Os (25 ka).

\*ここでは、As-B 上部を As-B' と呼ぶ。As-B' の噴出年代は不明。

## 火砕流堆積物:

洞爺: Toya (90~120 ka), 支笏第一: Spfl (31~34 ka), 阿多: Ata (85~105 ka), 幸屋: K-Ky (6.3 ka)

\* 〒156-8550 東京都世田谷区桜上水3-25-40  
日本大学文理学部地球システム科学科  
Department of Geosystem Sciences, Nihon University,  
3-25-40, Sakura-josui, Setagaya-ku, Tokyo 156-8550,  
Japan.  
Corresponding author: Maya Yasui  
e-mail: yasui@chs.nihon-u.ac.jp

## 2-2 方法

### 2-2-1 遊離結晶の表面形態と断面形態の観察

一般に降下軽石堆積物の粒径分布は幅が広いので、次の2つの粒径範囲の遊離結晶を観察対象とした。軽石粒子に含まれる斑晶鉱物は1 mm 前後であることが多いことから、遊離斑晶の代表として1 mm 以上2 mm 未満の粒径範囲を扱った。細かな遊離結晶は偏光顕微鏡による観察に無理のない0.125 mm 以上0.25 mm 未満の粒径範囲を扱った。遊離結晶の外形と内部の組織の関係を3次的に把握するために、表面形態と断面形態の両方に着目した。

前準備として、ふるいで粒度を揃えた上記2つの粒径範囲の粒子について、短時間の超音波洗浄を行い、乾燥させた。表面形態は、実体顕微鏡と走査型電子顕微鏡（JEOL 製 JSM-5200）を用いて幅広い倍率で観察した。電子顕微鏡による観察では、あらかじめ実体顕微鏡下で結晶の種類別にわけた後、金蒸着を施して2次電子像（SEI）を観察した。

断面形態は、結晶と周囲に付着するガラスの関係や、累帯構造の切れ方などに注目して、薄片上に現れた輪郭を偏光顕微鏡で観察した。薄片は、上記2つの粒径範囲の粒子をエポキシ樹脂で固定し、以下の点に留意して作製した：(1) 樹脂包埋時に、円筒状の専用容器の底部に結晶のC軸方向が水平面と平行になるように定置させ、全体として同様の厚さの層を形成するようにする、(2) 研磨時に結晶の中心部が薄片上に現れるよう注意する。

### 2-2-2 軽石内部の結晶の断面形態の観察

遊離結晶との比較のため、個々の堆積物に含まれる数 cm 大の軽石の薄片を作製し、軽石内部の結晶（斑晶鉱物と石英鉱物）の断面形態を偏光顕微鏡で観察した。薄片作製時の軽石の破損を防ぐため、真空下でエポキシ樹脂を軽石の気泡部分に含浸させて補強を行った。

### 2-2-3 斜長石遊離結晶の2次的破砕度の測定

すべての試料に共通して多く含まれる1 mm 以上2 mm 未満の径の斜長石の遊離結晶を2次的破砕度の測定対象とした。まず引き伸ばし器を用いて遊離結晶の薄片を印画紙上に投影し、約8倍の倍率の引き伸ばし写真を作成した。偏光顕微鏡で個々の斜長石の破断面部分を確認し、写真上にペンでチェックした。次に結晶の輪郭（外周） $a$ と破断面の部分 $b$ を別々にトレース紙に写した（Fig. 1）。トレースした結果をスキャナで取り込み、各結晶の $a$ 、 $b$ の長さを画像解析ソフト NIH Image 1.61で測定し、2次的破砕度 $b/a$ 値を求めた。なお、同じ破砕度の結晶がランダムな方向に分布する薄片の場合には、薄片の切り方によってそれぞれ $b/a$ 値が異なる可能性があ

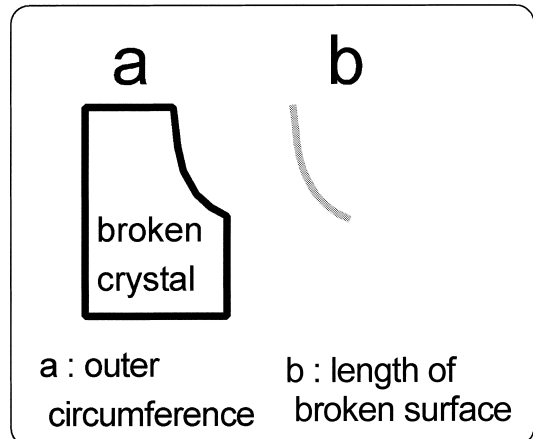


Fig. 1. Method for measurement of  $b/a$  value of free crystals in this study.

るので、2-2-1の留意点(1)と(2)により影響を最小限にした。

## 3. 観察および測定結果

### 3-1 遊離結晶の形態と破片状遊離結晶のタイプ

#### 3-1-1 表面形態

1 mm 以上2 mm 未満の径の遊離結晶の結晶面は、白色、灰白色、黄白色などの色調を呈するガラスに覆われる。ガラスには多数の気泡が含まれ、全体に白濁して見えるが、ガラスの厚さが薄い部分では透明感がある。部分的にガラスの覆いのない窪みが見られる場合が多い。窪みの内側は光沢があり、貝殻断口状の組織を呈する場合もある。電子顕微鏡による観察では、窪みの内側は平滑である場合が多いが（Fig. 2-1）、擦痕状の組織が見られる場合もある（Fig. 2-2）。窪みの深さは多様であり、複数の窪みが連結した形状を示す場合もある。窪みの部分は周囲のガラスに包まれた結晶面から推定される結晶面と連続しないため、破断面であると解釈される。

0.2 mm 前後の遊離結晶の大半は不定形で光沢があるが、ガラスに包まれた自形結晶も認められる。不定形の結晶には、輪郭がすべて破断面で囲まれ、角が鋭利なものもある。

#### 3-1-2 断面形態

観察した遊離結晶の大半は、厚さ20~40ミクロン程度のガラスに覆われる。ガラスの覆いは気泡に富み、全体として波打った“切手の縁状”の形状を示す（Fig. 2-3の矢印）。ガラスの覆いの厚さはほぼ一定であるが、部分的にガラスの覆いのない破断面が見られる場合が多い。破断面は結晶の外形に無関係な直線状ないし凹状であり、方向は辟開と無関係に見える場合が多い。累帯構造

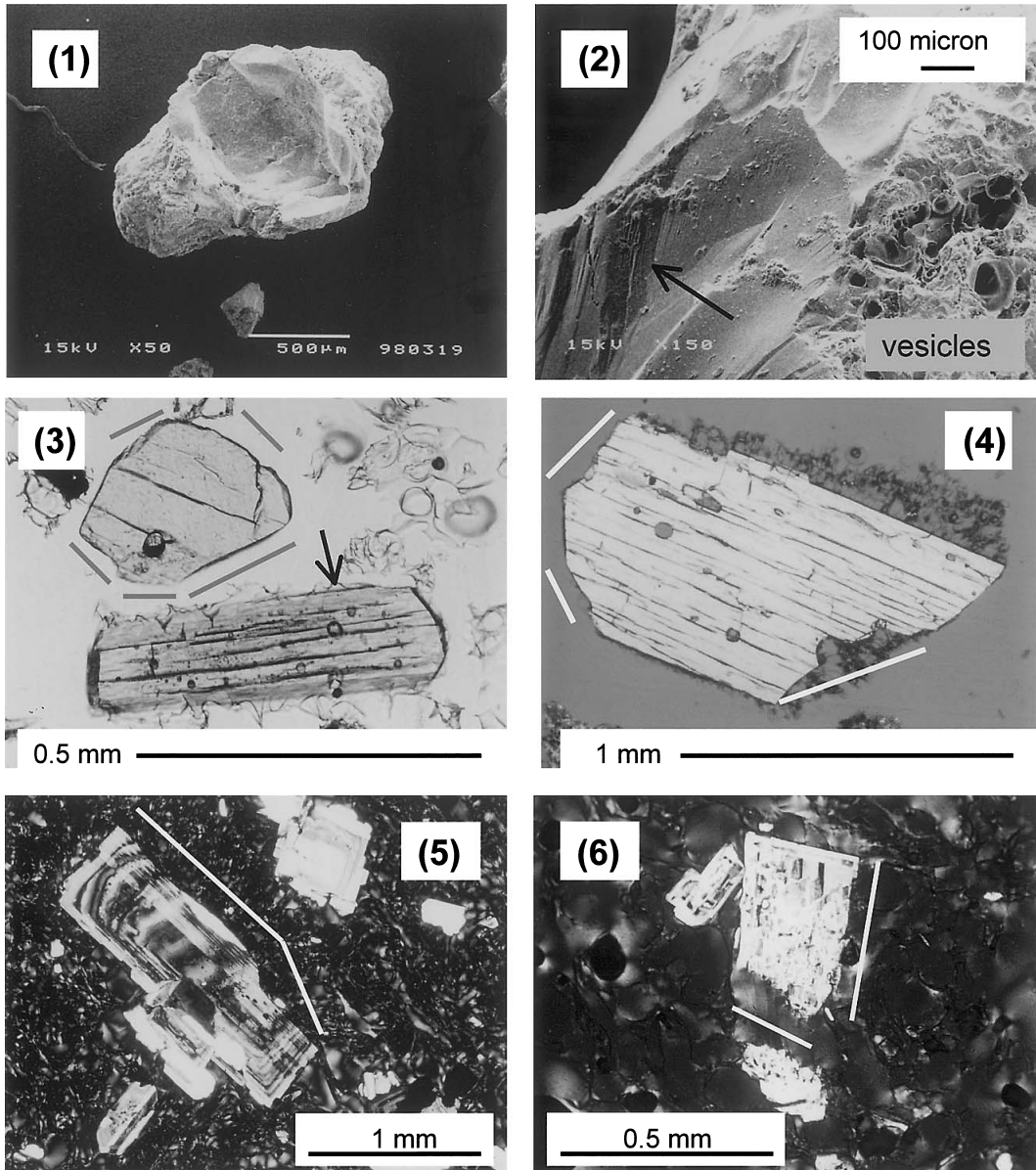


Fig. 2. SEM images (SEI) and photomicrographs showing the morphology of broken crystals. Grain size is between 1 and 2 mm for the photos 1, 2 and 4, 0.125 and 0.25 mm for 3. ( ) shows the name of tephra listed up in the 2-1 subsection in the text. (1) Pyroxene free crystal with a large depression (Hr-FP). (2) Broken surface of an olivine free crystal (As-A). Arrow shows striation-like texture developed on the broken surface. Vesicular glassy mantle on the crystal surface can be seen on the right hand side. (3) Arrow shows an unbroken orthopyroxene free crystal with vesicular glass cover. Upper left orthopyroxene is a highly broken crystal debris. Its broken surfaces are indicated by gray lines (Ko-d). (4) Broken orthopyroxene free crystal of which the whole outline is coated by thin vesicular glass (Hr-FP). White lines show broken surfaces. (5) Broken plagioclase contained in a pumice clast (Ta-a). Section of inner zoned structure is exposed on the broken surface indicated by a white line. Crossed nicols. (6) A breaking plagioclase contained in a pumice clast (As-A). Crossed nicols.

や汚濁帯の組織を示す斜長石は、それらの組織の断面が破断面に現れている。輝石や角閃石も、しばしば累帯構造が切られている。

### 3-1-3 破片状の遊離結晶のタイプ

破片状の遊離結晶は、断面形態の違いから次の3つのタイプに大別される (Fig. 3); A: 輪郭が自形~半自形を呈する結晶面と破断面から成る。結晶面は薄いガラスに包まれるが、破断面は結晶が直接露出しガラスに覆われていない、B: 輪郭が結晶面と破断面から成り、共にガラスに包まれる (Fig. 2-4), C: 不定形で輪郭のすべてが結晶の破断面で囲まれる。

以上の3タイプは鉱物の種類にかかわらず認められる。粒径別に見ると、1~2 mmの粒径には概して破片状結晶が多い。定性的にみると、Aタイプが最も多く、Bタイプはさほど多くない。0.125~0.25 mmの粒径では自形性のよい結晶もしばしば含まれるが (Fig. 2-3の矢印)、破片状結晶が多い。破片状結晶には破断面の部分が多いAタイプとCタイプが多い。同一試料で比べた場合、細粒な破片状結晶に見られる蜂の巣構造などの組織は、1~2 mmの粒径の遊離斑晶と同様であることから、細粒な破片状結晶は斑晶鉱物の破片 (以後、“結晶片”と呼ぶ) であると考えられる。

### 3-2 軽石粒子に含まれる結晶の形態

大半の試料の軽石内部に、自形~半自形の斑晶以外に、破片状の斑晶が認められた。破片状の斑晶は、不自然な輪郭を示すことや、破断面に累帯構造や蜂の巣状構造などの組織の切断面が現れるため、比較的容易に識別

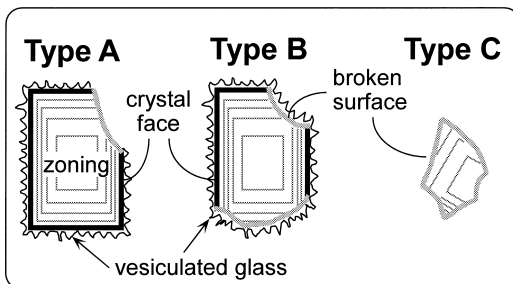


Fig. 3. Schematic illustration showing type of broken free crystals contained in pumice fall deposits.

Type A: Outline of crystal is composed of original crystal face and broken surface. Outline is filmily covered with vesicular glass except its broken surface. Type B: Outline of crystal is composed of original crystal face and broken surface as well as that of Type A. However, outline is completely covered with thin, vesicular glass. Type C: Whole outline is composed of broken surface.

される (例, Fig. 2-5). 破片状斑晶の破断面は直接石基ガラスと接する場合が多い。単一の結晶に復元可能な複数の破片状斑晶がジグソーパズルの様に分布する場合もある (Fig. 2-6). この場合、破断面に面する石基ガラス中の気泡の形態は、周囲の石基と同様である時と、周囲に比べ気泡の径が大きく、2つの結晶の破断面の間でガラスが糸を引いたように伸びている場合がある。複数の気泡が結合した形状の大きな気泡の周囲に、ジグソーパズルの様に破片状斑晶が分布する場合もある。Fig. 4は複数の蜂の巣状斜長石と単一の斜方輝石から成る結晶の集合体であり、内部に破断面が認められる。破断面の多くは結晶の粒間に生じている。破断面には結晶内のガラス包有物が露出しており、破断面と破断面の間にみられる大きな気泡をもつガラスと連続する (例: 図中の枠内)。この場合の結晶の破砕は、結晶集合体の周囲のメルトの発泡時に起きた可能性がある。

軽石の石基には自形性のよい微斑晶が含まれる場合が

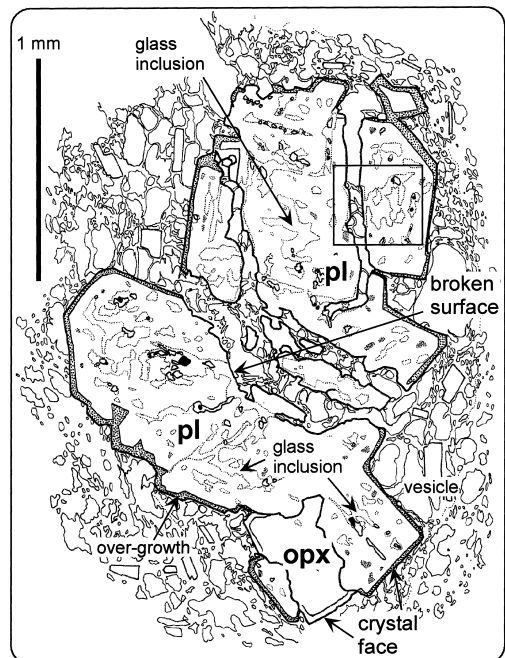
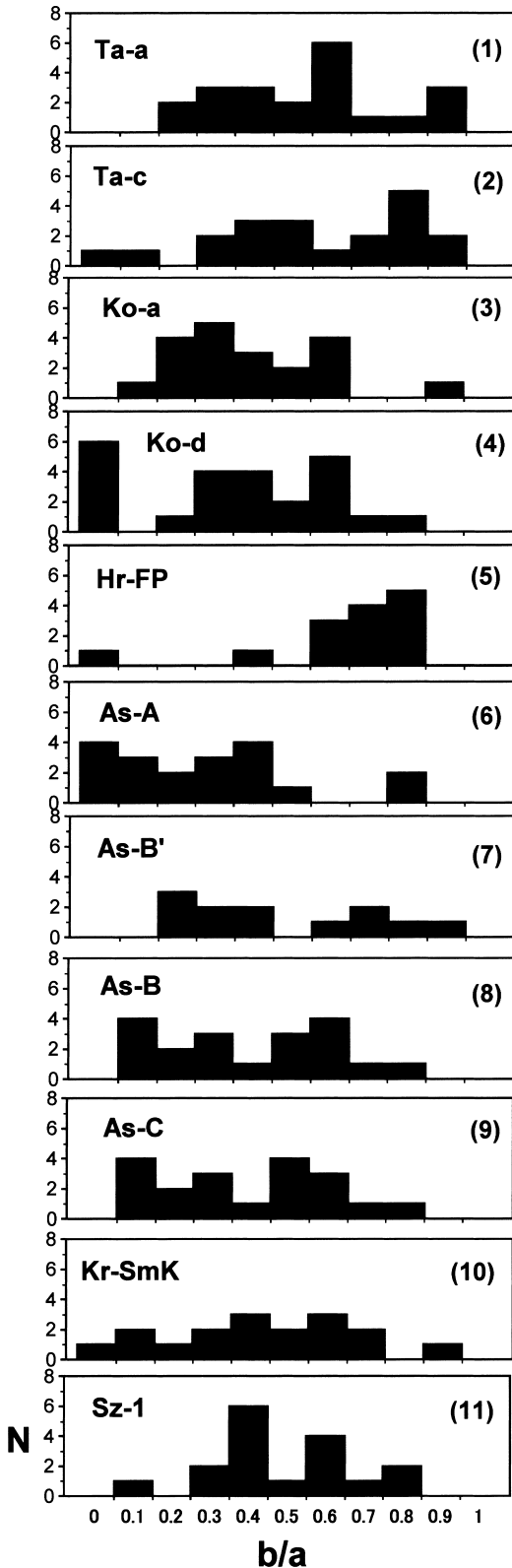


Fig. 4. Sketch of a breaking crystal-clot contained in a single pumice clast of As-B'. It is composed of plural crystals of plagioclase (pl) and single orthopyroxene (opx). Chemically normal-zoned, over-growth (dotted zone) can be seen along the crystal faces, whereas broken surfaces have no over-growth. Note that large bubbles between broken surfaces and canal-like glass inclusions contained in plagioclase are continuous. A representative example of it is shown by a frame in the figure.



多いが、破片状の斑晶が多い試料では、破断面で囲まれる不定形の結晶片も多く含まれる。参考のために観察した火砕流堆積物中の軽石にも、以上の記載と同様の性質が認められた。

### 3-3 斜長石遊離結晶の2次元的破碎度

1~2 mm の径の斜長石の遊離結晶の2次元的破碎度  $b/a$  値 ( $a$ : 外周,  $b$ : 破断面の長さ) は、どの堆積物も幅が広い (Figs. 5 and 6). 全く破断面をもたない遊離結晶 ( $b/a$  値=0) は9例について認められたが、すべての輪郭が破断面からなる遊離結晶 ( $b/a$  値=1, すなわちCタイプ) は認められなかった。Spfa-1 は  $b/a$  値が低く、Hr-FP は高い傾向があるが、その他は  $b/a$  値の幅が広く、特にピークを示さない。Fig. 5 は安山岩組成, Fig. 6 はデイサイト~流紋岩組成であるが、 $b/a$  値と化学組成には相関がみられない。

## 4. 議 論

以上の観察および測定結果より、日本の8火山15例の降下軽石堆積物中に含まれる遊離結晶の多くが破片状であることが明らかになった。また斜長石の遊離結晶の2次元的な破碎度  $b/a$  値は幅が広く、多様な程度に破碎を受けていることを示す (Figs. 5 and 6). これらのことから火砕流をもたらず噴火のみならず、プリニー式噴火や準プリニー式噴火のような様式の噴火においても、破片状の遊離結晶が多く生産されると考えられる。

一般に、プリニー式噴火のような爆発的なマグマ噴火におけるマグマの破碎過程では、マグマが、気泡に富む連続した液体から、液滴と遊離した固体粒子がガス中に存在する状態へと変化する、ととらえられている (例, Cashman *et al.*, 2000). 前述のように、降下軽石堆積物中の遊離結晶の多くが気泡を含むガラスに薄く包まれており、ガラスの覆いの外形は軽石や火山ガラスの外形と類似する。このことは、マグマの破碎過程で、液滴の生成と同時に、マグマ中に含まれていた固体粒子 (主に結晶)

Fig. 5. Histograms showing frequency of  $b/a$  value for the eleven pumice fall deposits with andesitic composition. Grains between 1 and 2 mm were measured here. ( ) shows age of the eruption. (1) Tarumai volcano: Ta-a (1739 A. D.), (2) Ta-c (2.5 ~ 3 ka), (3) Hokkaido-Komagatake volcano: Ko-a (1929 A.D.), (4) Ko-d (1640 A. D.), (5) Haruna volcano: Hr-FP (mid-6C), (6) Asama volcano: As-A (1783 A. D.), (7) As-B' (age is unknown), (8) As-B (1108 A. D.), (9) As-C (4 C), (10) Shinmoedake, Kirishima volcano group: Kr-SmK (1717 A. D.), (11) Sakurajima volcano: Sz-1 (1914 A. D.).

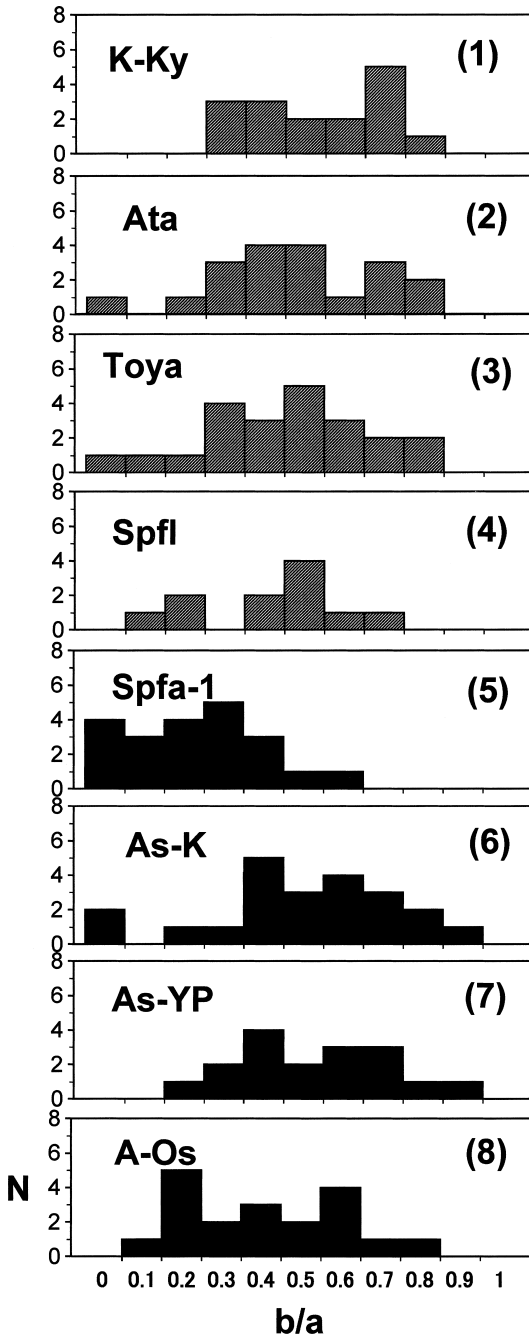


Fig. 6. Histograms showing frequency of  $b/a$  value for the four pyroclastic flow deposits (shaded columns) and the four pumice fall deposits (solid columns) with dacitic to rhyolitic composition. Grains between 1 and 2 mm were measured here. ( ) shows type of deposit and eruptive age.

(1) Kikai caldera: K-Ky (ignimbrite, 6.3 ka), (2) Ata caldera: Ata (ignimbrite, 85~105 ka), (3) Toya caldera: Toya (ignimbrite, 90~120 ka), (4) Shikotsu caldera: Spfl (ignimbrite, 31~34 ka), (5) Shikotsu caldera: Spfa-1 (pumice fall, 31~34 ka), (6) Asama volcano: As-K (pumice fall, 13~14 ka), (7) Asama volcano: As-YP (pumice fall, 13~14 ka), (8) Aira caldera: A-Os (pumice fall, 25 ka).

についてある程度の制約を与えることができる。

破断面にガラスの覆いがみられないAタイプの破片状結晶の存在は、気泡と結晶を含む液滴やガラスに薄く包まれた遊離結晶が生産された後に、さらに結晶部分の破砕が行われたことを示唆する。マグマの破砕時に、結晶の遊離と破砕が同時に起きてAタイプが形成される可能性もある。Aタイプに比べると少ないが、破断面にもガラスの覆いがあるBタイプの結晶の存在は、マグマからの遊離以前に既に結晶の破砕があったことを示している。軽石粒子中にもしばしば破片状結晶が含まれるが、これも同様にマグマの破砕以前の結晶の破砕を示す。一方、輪郭がすべて破断面で囲まれるCタイプの結晶については、1) マグマの破砕時に結晶が粉々に破砕された、2) 液滴や遊離結晶の生成後に結晶の破砕が起きた、あるいは、3) 何らかの原因で割れ目を有していた結晶が、マグマの破砕時に分解・遊離した、などの様々な可能性が考えられる。マグマの破砕過程以後の結晶の破砕過程の一つとしては、火砕物の運搬時が考えられる。例えば流走中の火砕流内での粒子衝突を想定した実験では、実験で生成された結晶の破片と、実際の堆積物中の破片状結晶の形態が著しく異なることから、火砕流中では結晶の破壊はほとんど起こらないと考えられた (Best and Christiansen, 1997)。一方、同一噴火事例の堆積物である支笏火砕流 (Spfl) と降下軽石 (Spfa-1) では、火砕流堆積物中の斜長石の破砕度  $b/a$  値が先行した降下軽石より全体に高い (Fig. 6-4, 5)。また南九州の池田火砕流堆積物の場合は、給源からの距離とともに破片状結晶の量が増加するように見える (岩倉・他, 2001 の Fig. 4)。これらの事例では、流走する火砕流内でも結晶片が生産された可能性がある。上昇する噴煙柱内でも、結晶の破砕は起こるのかもしれない。

以上の議論より、マグマの破砕とマグマからの結晶の

も遊離することを示唆する。一方、遊離結晶の多くが破片状であるという観察事実から、結晶の破砕過程もマグマの破砕や固体粒子の遊離と密接に関連することが予想される。現時点では破片状の遊離結晶が生成された時期を特定することは難しいが、破片状の遊離結晶の形態にA~Cタイプに見られる多様性があることから、結晶の破砕とマグマの破砕および結晶の遊離の間の時間的關係

遊離はほぼ同時期に起こると考えられるが、結晶の破碎過程は、マグマの破碎や結晶の遊離過程と同時である場合以外に、それらの前後にもあるものとみられる。つまり、爆発的なマグマ噴火における結晶の破碎過程は単一ではなく、機構の異なる複数の段階があるものとみられる。破断面の形状などに着目して、結晶の破碎の時期や破碎の機構に直結する手がかりを探ることが今後の課題の一つである。

#### 謝 辞

本研究はY.S.の卒業研究の成果を含めてまとめたものである。元日本大学教授の荒牧重雄氏には重要な助言をいただきました。同大学の遠藤邦彦教授には試料採取に際してお世話になりました。同大学の大野希一博士との議論は有益でした。匿名の査読者の方、産業技術総合研究所の古川竜太博士、および編集担当の中川光弘博士には重要なお指摘と適切なお助言をいただきました。以上の方々に深く感謝いたします。本研究の一部には平成13年度日本大学文理学部個人研究費を使用しました。

#### 引用文献

- Best, M. G. and Christiansen, E. H. (1997) Origin of broken phenocrysts in ash-flow tuffs. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **109**, 63–73.
- Cashman, K. V., Sturtevant, B., Papale, P. and Navon, O. (2000) Magmatic fragmentation. In *Encyclopedia of Volcanoes* (Sigurdsson, H. ed.), 421–430, Academic Press, London.
- Henry, C. D. and Wolff, J. A. (1992) Distinguishing strongly rheomorphic tuffs from extensive silicic lavas. *Bull. Volcanol.*, **54**, 171–186.
- 岩倉雅治・鎌田桂子・小林哲夫 (2001) 粒度分布と構成物量比からみた池田火砕流の堆積機構. *火山*, **46**, 117–120.
- 町田 洋・新井房夫 (1992) 火山灰アトラス, 東京大学出版会, 276p.
- Manley, C. R. (1995) How voluminous rhyolite lavas mimic rheomorphic ignimbrites: Eruptive style, emplacement conditions, and formation of tuff-like textures. *Geology*, **23**, 349–352.
- Ohno, M. (1999) Dynamics and fragmentation of volcanic eruption deduced from analyses of tephra fall deposits—Application of Pinatubo 1991 eruption. Ph.D dissertation, Univ. of Tokyo, 191p.
- Pallister, J. S., Hoblitt, R. P., Meeker, G. P., Knight, R. J. and Siems, D. (1996) Magma mixing at Mount Pinatubo: Petrographic and chemical evidence from the 1991 deposits. In *Fire and Mud; Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines* (Newhall, C. G. and Punongbayan, R. S. eds.) 687–731, Philippine Inst. of Volcanol. and Seismol. Quezon City and Univ. of Wash. Press, Seattle.

(編集担当 中川光弘)