

## 日本各地の火山噴出物に含有される 粘土鉱物と噴火活動様式の考究

小坂 丈 予\*

(2002年5月13日受付, 2002年12月22日受理)

### Clay Minerals Contained in Volcanic Ejecta and their Correlation with Volcanic Activities in Japan

Joyo OSSAKA\*

Clay minerals such as smectite, kaolin mineral and pyrophyllite and secondary minerals such as pyrite and gypsum are frequently found in fine fraction of volcanic ash from many volcanoes in Japan. Natural occurrences of clays and secondary minerals disclose geological and geochemical settings and alteration environment. Chemical compositions and mineral assemblages of alteration products in volcanic ash can provide authentic information on chemical conditions inside volcanoes and their temporal variations indicate change in chemical condition beneath volcano before and after its activation. Researching assemblage of clay minerals in volcanic ejecta and their chemical compositions is a safety method for analysis of volcanic activity and will contribute to prediction of change in volcanic activity.

#### 1. ま え が き

火山噴火によって新たに噴出した火山灰の中に、多量の粘土鉱物を含むものがあることに筆者が注目しはじめたのは、1959年2月に霧島火山新燃岳が噴出した時からである。その時この活動で噴出し、降下堆積した火山灰層が、その直後の降雨により極度に泥濘化し、当時現地調査に携わられた水上 武、桂 敬、平賀士郎の先生方が非常に苦労されたことを承ったのが最初の動機である。またさらに遡れば、草津白根山の1937～1939年の噴火に際しても、津屋弘達先生や岩崎岩次先生らが同様の現象を経験されたと伺ったこともある。

このような現象は、抛出される火山灰に粘土が含有されていることに起因するものであり、それらの火山灰はその噴出時すでに相当の変質作用を受けていたことを示している。先の霧島新燃岳や草津白根山のように、近年は主として水蒸気爆発のみを繰り返しており、また山頂には火口湖（池）が存在しているような火山においては

ある程度予想しうることであった。ところが、その後の調査で、桜島や浅間山などのように、近年は主としてマグマ性噴火のみを繰り返していると考えられる火山でも、時には変質粘土鉱物などを含んでいる場合もあることが明らかになった。しかしこれらの事実を最初に発表した1960年頃には、日本の火山学会では粘土鉱物に関心をもたれる方は至って少なく、このためそれらに関する研究成果は、日本鉱物学会誌（小坂・平林, 1981）、あるいは日本粘土学会誌（小坂, 1982）に報告するよりほかになかった。

ところが近年、有珠山1977年（近堂・他, 1979）、御嶽山1979年（小坂・他, 1983）、十勝岳1988年（小坂・他, 1989）、雲仙岳1990～1995年（Nogami *et al.*, 2001）などの噴火では、抛出された火山灰中に粘土鉱物が含まれていることが示され、その存在が注目されるようになってきた。このためあえて本誌に火山噴出物に含まれる粘土鉱物に関して、その初期の頃からの成果を、重複をも顧みずにとりまとめさせていただくことにした。本稿がこの問題に関心をもたれる方々に、少しでも参考になれば幸甚である。

\* 〒152-0012 東京都目黒区洗足 2-5-7  
東京工業大学名誉教授

Professor emeritus of Tokyo Institute of Technology,  
2-5-7 Senzoku, Meguro, Tokyo 152-0012,  
Japan.

## 2. 火山噴火により抛出された固形噴出物中の粘土鉱物およびその他の二次生成鉱物

### 2-1 火山噴出物中に含まれる粘土鉱物の同定と記載に関する問題点

粘土鉱物の同定には、その粒子が非常に微細であり、顕微鏡などによる判断が困難なため、通常はX線粉末回折法(XRD)が用いられている。1950年代には未だX線回折装置の普及が十分ではなく、やむを得ず示差熱分析(DTA)などによって粘土鉱物の同定や存在量の推定を行ったこともあった(例えば、Sudo and Ossaka, 1952)。しかしこの方法を用いるにしても、以下に述べるいくつかの問題点があり、それらに留意して同定作業を進めることが望ましい。

一般に火山灰などの火山噴出物が抛出されるまでに変質が十分進行しているとは限らない。したがって噴出物中の粘土含有量は少ない場合が多く、このため噴出物そのまま粘土鉱物の同定を試みても、その検出を行い得ない場合がある。このため火山噴出物中の粘土鉱物を同定するには、多くの場合試料に水懸などの操作を行っ

て、その細粒部分(例えば $2\mu\text{m}$ 以下)を濃縮して、同定を行うのが普通である。

粘土鉱物はいずれも層状の含水アルミナ珪酸塩であるため、構造が類似している。このためX線回折の結果 $14\text{Å}$ 、 $10\text{Å}$ 、 $7\text{Å}$ などの回折ピークを示すものが多く、それゆえその相互の区別は困難な場合が多い。そこでエチレングリコール処理、あるいは酸性溶解操作、または加熱処理などを行って、その結果初めて同定が可能になる場合が多く、化学分析が必要になる場合もある。montmorillonite 類似の鉱物相互や、kaolinite, halloysite などの区別も簡単にはできないため、その記載にあたっては、それらの鉱物のグループ名である smectite (鉱物)、あるいは kaolin 鉱物などを用いた方が無難であろう。

粘土鉱物のような低結晶度の鉱物の記載にあたっては、その特徴あるX線回折像をそのまま掲載して、読者の理解や判断にゆだねる方が望ましく、またその際にはその横軸の $2\theta$ に必ず測定に使用したX線の対陰極名あるいは波長名を記入する(例えば $2\theta\text{ Cu-K}\alpha$ など)必要がある。また、このような低結晶度の粘土鉱物と、高結晶

Table 1. Major volcanic activities and ejecta on the volcanos in Japan in recent years.

No.	eruption year	volcano	eruption types <sup>1)</sup>	ejecta types <sup>2)</sup>	source <sup>3)</sup>	last eruption	paragraph
1	1941-46	Sakurajima	M	E+A	b	1860	2-2 1)
2	1950-51	Izu-Oshima	M	E	a	1940	
3	1952	Myojinsho	M	E	a	1946	
4	1955	Sakurajima	M	E+A	a	1946	2-2 1)
5	1959	Kirishimayama	F	A	b	1832	2-2 2)
6	1960	Sakurajima	M	E	b	1955	2-2 1)
7	1962	Yakedake	F	A	a	1925	2-2 3)
8	1962	Miyakejima	M	E	a	1940	
9	1966	Kuchinoerabujima	M	E	a	1933	
10	1970	Myojinsho	M	E	a	1952	
11	1970	Akita-Komagatake	M	E	a	1932	
12	1973	Asamayama	M	E+A	a	1961	2-2 4)
13	1973	Chachadake	M	E	b	1812	2-2 5)
14	1973-74	Nishinoshima	M	E	a	---	
15	1974	Niigata-Yakeyama	F	A	a	1949	2-2 6)
16	1976	Kusatsu-Shiranesan	F	A	a	1942	2-2 7)
17	1977	Usuzan	F+M	A+E	a	1792	2-2 8)
18	1977	Azuma-Issaikyo	F	A	a	1966	
19	1979	Asosan	M	E+A	a	1965	
20	1979	Ontakesan	F	A	a	---	2-2 9)
21	1982-83	Kusatsu-Shiranesan	F	A	a	1976	
22	1983	Miyakejima	M	E	a	1962	
23	1986	Izu-Oshima	M	E	a	1951	
24	1988-89	Tokachidake	F+M	E+A	a	1962	2-2 10)
25	1990-95	Unzendake	F+M	E+A	a	1792	2-2 11)
26	1991	Kirishimayama	F	A	c	1959	2-2 12)
27	1995	Kujusan	F	A	c	1738	2-2 13)
28	1996	Hokkaido-Komagatake	F	A	c	1942	2-2 14)
29	1997	Akita-Yakeyama	F	A	c	1949	2-2 15)
30	2000	Usuzan	F	A	c	1977	2-2 16)
31	2000	Miyakejima	M	A+E	c	1983	2-2 17)

1) M: magmatic eruption, F: phreatic eruption

2) E: essential ejecta, A: altered ejecta

3) a: field survey and sample analysis, b: only sample analysis, c: survey of literature

度の quartz, gypsum などとが混在する回折像で、結晶度による回折像のブロードネスを考慮しないで、その混在量や、量比を論ずることは危険である。しかしこの回折像が示されることによって、対象とした鉱物の結晶度、あるいは非晶質物質 (opal, allophane, 火山ガラスなど) の存在や、著者が認定・主張した以上の発見も期待されて有意義なものと考えられる。

上記の理由で、X 線回折結果の記載にあたって、その測定条件の記述も加えるのなら、単に測定電圧、電流のみならず、使用対陰極、フィルター、波長、あるいはスリット幅も併記されれば、その回折像がより有意義に活用されることになる。

2-2 火山噴出物に含有される粘土鉱物とその考察

日本各地で近年噴火した主な火山の噴火形態と噴出物の状況を Table 1, Fig. 1 に示した。それによると、それぞれの噴火で抛出された、固形噴出物中の約 60% のものが噴出前に何らかの変質作用を受けており、粘土などの二次生成鉱物を含んでいることが明らかになった。同

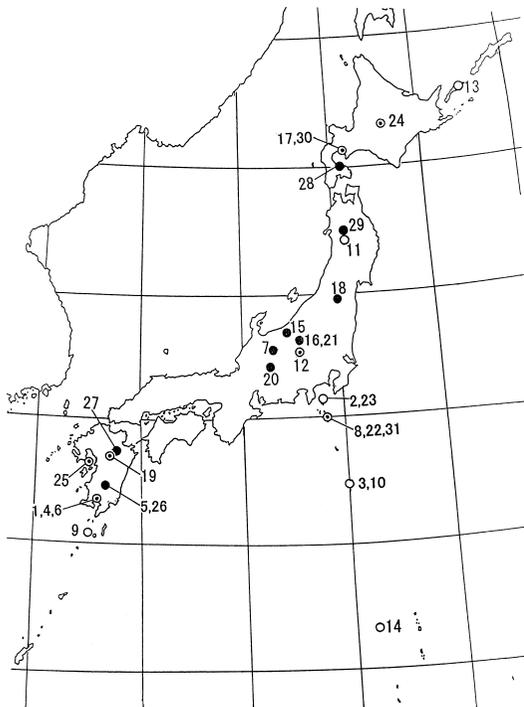


Fig. 1. The locations of volcanoes in Japan having erupted in recent years and constituents of their ejecta. Each number corresponds to that in Table 1. ○: essential ejecta ●: altered ejecta ⊙: essential + altered ejecta

図 1 日本で近年噴火した火山の位置と、その固形噴出物による噴火形式。○: 本質岩片 ●: 変質岩片 ⊙: 本質岩片 + 変質岩片

表の第 7 列はその噴火以前の噴火発生年、第 8 列は以下に述べる本編における記載項である。

1) 桜島火山の 1941~1960 年の火山灰

桜島火山は近年活発なマグマ性の噴火活動を繰り返していることで知られている。鹿児島大学理学部には、同大学の前身である旧制第七高等学校時代から山口鎌次先生によって桜島の噴火のたびごとに採取された火山灰が保存されていた。同大学理学部化学教室の鎌田政明先生から、これらの試料の一部ずつをご分与いただき、火山灰の構成物、特に粘土鉱物について検討した。

粘土鉱物の同定に最も適切な手段である X 線粉末回折 (XRD) 装置は、当時の筆者の所属していた研究所には設備されていなかったため、やむを得ず、これら粘土鉱物の種類までは同定できないまでも、それらの存在のみは認定できる示差熱分析法 (DTA) によってこれらの試料を検討した。

その結果得られた DTA 曲線を Fig. 2 に示す。同図中の 1914 年、1946 年、1960 年の試料のように、吸熱ピークも発熱ピークもあまり顕著に認められず、おおむね一直線に近いものはほとんど未変質の火山灰と見なされる。これに対して、1935 年、1955 年のもののように顕著な吸熱ピークや発熱ピークをもつものがあつた。吸熱ピークは、火山灰が変質を受けて粘土鉱物などが生成し、それらがもっている構造水が、DTA 測定の際の加熱による脱水に伴う吸熱反応により生ずるものである。また発熱ピークは変質現象により生じた二次生成鉱物が加

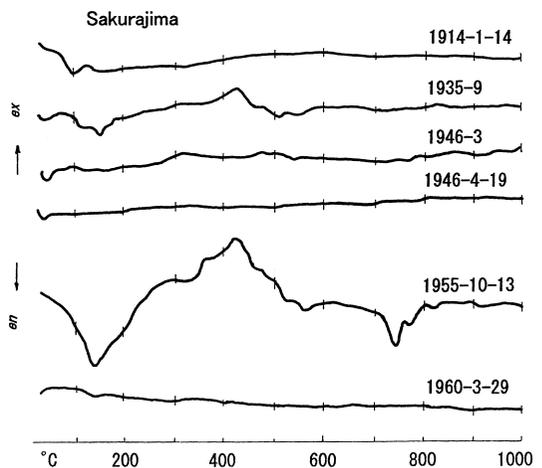


Fig. 2. DTA charts of volcanic ash of Sakurajima volcano between 1914 and 1960. ex: exotherm en: endotherm

図 2 桜島火山から 1914~1960 年に放出された火山灰の示差熱分析曲線。ex: 発熱ピーク en: 吸熱ピーク

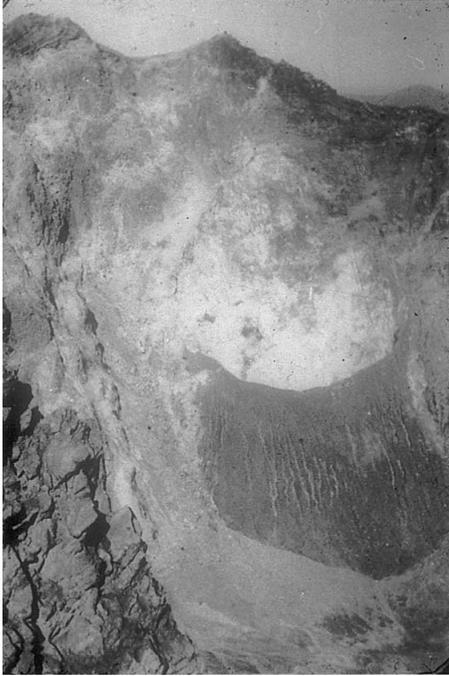


Photo. 1. The inner wall of Mt. Minamidake crater before the eruption of Sakurajima on Oct. 13, 1955.

写真 1 桜島 1955 年 10 月 13 日噴火以前の南岳火口内壁の状況。

熱のための再結晶化や酸化などの発熱反応により発現するものと考えられている。これらのピークの大小によって、粘土鉱物（二次鉱物）の含有量の多寡、したがって受けた変質作用の強弱を認識できるものと考えられる。

このような見方からすれば 1914 年や 1946 年の試料もわずかに変質作用を受けており、1935 年のものはそれが若干進行したものであり、1955 年のものは最も変質が進んだものと言える。Photo. 1 はこの事実をよく説明できるもので、1955 年 10 月 13 日の大噴火の前に撮影された桜島南岳火口壁内側である。同火口壁面にテラス状に堆積した火山灰などの固形噴出物が、その火口から噴出する火山ガスの中に含まれる水蒸気の凝縮によって広範囲に湿潤しているのが認められる。同火山のようにマグマ性の噴火を繰り返している火山でも、その爆発の中断期には、このようにして火山灰の変質が進行しているのうかがわれる。

一方 1955 年からは、ほとんど連続的に激しい噴火が繰り返され、このような状況下では、ほとんど Photo. 1 のような変質の機会が生じなかったとみえて、Fig. 2 の 1960 年の火山灰のように全く未変質の essential な火山灰を抛出することになったと考えられる（小坂, 1960）。

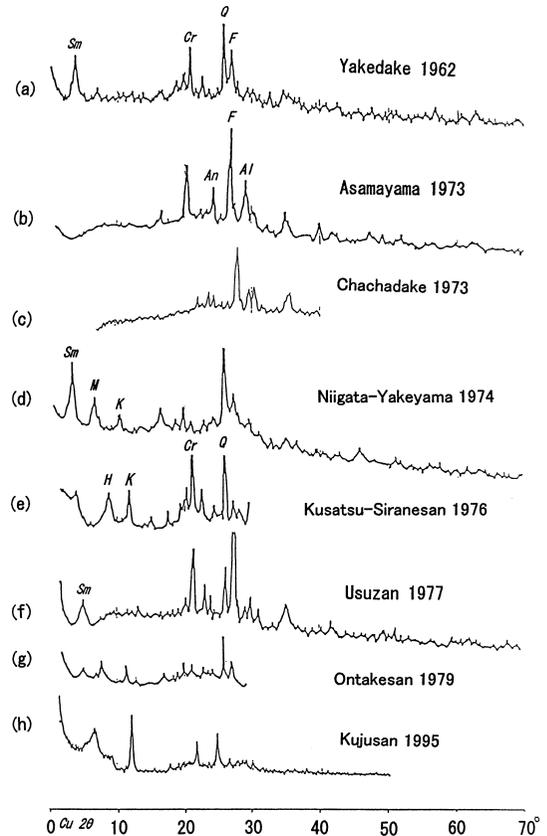


Fig. 3. XRD patterns of volcanic ash of several volcanoes in Japan (I). *Sm*: smectite, *K*: kaolin mineral, *H*: halloysite (10 Å), *M*: mica, *An*: anhydrite, *Al*: alunite, *Q*: quartz, *Cr*: cristobalite, *F*: feldspar

図 3 日本で近年噴出した火山灰のX線回折像 (I). *Sm*: スメクタイト *K*: カオリン鉱物 *H*: ハロイサイト (10Å) *M*: 雲母 *An*: 硬石膏 *Al*: 明礬石 *Q*: 石英 *Cr*: クリソバライト *F*: 長石

## 2) 霧島火山新燃岳の 1959 年の噴火

1959 年 2 月 17 日、新燃岳は 137 年ぶりに噴火し、細粒の火山灰は、宮崎県小林市にまで達した。この噴火は水上・平賀 (1959) により、新燃岳火口内から火口縁を超えて外斜面を西方に走った割れ目 (Photo. 2a) に沿って生じた大小 20 個の火孔 (Photo. 2b) から、火山岩片、火山灰などを噴出したものであると報告された。噴出物はすべて地表近くの山体を構成していた物質のみで、新しい溶岩片は全く抛出されなかった。

山腹に降下・堆積した火山灰試料が筆者に供与されたが、前述のような理由で、DTA を測定したのみで、粘土鉱物が多量に混在していることを確認するとどまった。そのうちに九州農事試験場 (当時) の菅野・他

(1961) によって X 線回折, 電子顕微鏡, 化学分析などを用いて同定が行われ, smectite (当時は montmorillonite と記載), chlorite, kaolin 鉱物などが存在することが確認された。

### 3) 焼岳火山 1962 年の噴火

焼岳は 1962 年 6 月 17 日山頂付近で突然噴火した。1925 年以来 37 年ぶりの噴火であった。一色 (1962), Yamada (1963), Murai (1962), 小坂・小沢 (1966) などによると, 最初トロイデ式の山頂直下の北側斜面の爆発

により開孔して始まった噴火は, その後の活動の継続により長さ 700~800 m の裂弧状の割れ目 (Photo. 2c) に発達し多量の岩塊と火山灰を抛出した。翌 18 日にはその割れ目の北東端の最下部から泥流が流出し始めた。この泥流の流出はその後も続き, 19 日には峠沢 (上々堀沢) に沿って約 2.5 km 流下し梓川に達した。

その後, 6 月 21 日までは降雨はなく, この泥流に含まれていた大量の水は同火山の山体内部から供給されたものと考えられる。抛出された岩片, 火山灰, 泥流物質な

Table 2A. Chemical compositions of altered ejecta and original rocks (wt%).

	(a) Yakedake		(b) Usu 1977		(c) Asama		(d) Tyatyadake		(e) Ontake		(f) Kusatsu-Shirane	
	A	B	A	B	A	B	A	A	B	A*	B	
SiO <sub>2</sub>	60.38	59.7	69.21	57.32	59.45	71.22	53.06	62.42	57.26	59.52	83.94	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.91	12.9	15.32	16.08	17.27	13.73	13.21	15.43	15.55	16.19	3.55	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.45	10.3	1.29	4.21	1.65	0.68	4.59	1.43	4.29	2.02	none	
FeO	---	---	2.44	2.74	4.74	---	6.43	5.41	0.20	5.32	0.62	
MgO	1.72	1.84	1.21	2.60	4.53	none	3.93	0.71	0.87	3.75	0.20	
CaO	4.72	3.24	3.65	3.83	6.65	none	8.54	3.12	3.03	6.93	0.02	
Na <sub>2</sub> O	3.84	1.9	4.59	2.62	2.93	1.13	3.08	5.54	2.26	2.77	0.24	
K <sub>2</sub> O	2.48	2.4	0.84	0.81	1.14	2.24	0.73	4.96	1.92	1.71	0.62	
Ig.loss	4.58	5.06	0.55	8.77	0.44	9.28	0.60	0.10	9.00	0.56	4.08	
H <sub>2</sub> O-	0.82	2.00	0.05		0.02	1.03	0.09	---	4.49	0.17	4.94	
TiO <sub>2</sub>	0.90	0.65	0.41	0.50	0.81	0.66	1.25	---	0.58	0.60	0.96	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.35						0.22			0.11	0.01	
MnO	0.09	0.101	0.17	0.19			0.21	0.20	0.06	0.17	0.02	
Total	100.24 <sup>1)</sup>	100.1 <sup>2)</sup>	99.73	99.67	99.63	99.97	99.94	99.32	99.51 <sup>3)</sup>	99.82	99.20	

A: Original rock

B: Altered ejecta

\* cited from Tsuya (1933)

1) contained SO<sub>3</sub>: 4.01, Cl: 0.07

2) contained S: 3.11

3) contained total SO<sub>3</sub>: 14.59, SO<sub>4</sub> (soluble in water): 2.57

Table 2B.

	(g) Tokachi		(h) Unzen		(i) Kuju		(j) Usu 2000		(k) Miyakejima	
	A <sup>(1)</sup>	B <sup>(2)</sup>	A <sup>(3)</sup>	B <sup>(4)</sup>	A	B	A <sup>(5)</sup>	B <sup>(6)</sup>	A <sup>(7)</sup>	B <sup>(5)</sup>
SiO <sub>2</sub>	55.93	87.80	62.60	60.87	51.817	69.82	69.21	56.02	53.70	47.25
TiO <sub>2</sub>	1.25	0.18	0.85	0.71	0.787	0.90	0.41	0.86	1.39	0.91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.39	6.76	15.80	15.54	16.353	11.16	15.32	20.05	14.95	14.88
FeO*	9.01	0.54	4.99	4.89	6.592	1.48	1.29 2.44	9.18	3.02 9.65	11.13
MnO	0.19	none	0.09	0.08	0.144	0.02	0.17	0.17	0.22	0.15
MgO	4.10	0.02	2.91	1.83	3.017	0.18	1.21	2.48	3.76	2.68
CaO	8.83	0.17	5.53	3.76	6.307	0.42	3.65	5.01	8.77	9.01
Na <sub>2</sub> O	2.40	1.86	3.70	2.69	3.133	0.91	4.59	1.87	2.66	1.31
K <sub>2</sub> O	1.43	2.85	2.17	2.08	1.851	1.62	0.84	0.55	0.56	0.32
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15	0.21	0.24	0.20	0.186	0.22	n.d.	0.09	0.14	0.10
Ig.loss	H <sub>2</sub> O+ H <sub>2</sub> O-	0.17	0.58	4.31		14.61	0.55 0.05	4.60 4.64	0.62	2.06 9.75
Total	101.85	100.39	99.46	96.96	90.187	101.34	99.73	105.52	99.44	99.55

(1) Tada and Tsuya (1927)

(2) Oosaka *et al.* (1989)

(3) Yamamoto (1960)

(4) Nogami *et al.* (2001)

(5) Nogami, K. private communication

(6) Matsuo *et al.* (1977)

(7) Soya *et al.* (1984)

どは、活動全期にわたって高温のマグマから直接由来したと思われる新鮮な岩片を含んでいなかったこと、調査期間中噴気温度はほとんど 100°C を大幅に超えることはなかったなどから、焼岳のこの噴火は水蒸気爆発であったと考えられている。

この噴火で抛出された火山灰 (Photo. 2d) や泥流物質の細粒部分の X 線粉末回折像の一例を Fig. 3(a) に示した。また、これらの試料について、示差熱分析等に加えて、エチレングリコール処理、160°C、600°C 加熱処理をして、X 線回折を行い、含有される粘土鉱物を同定した。その結果、主要な粘土鉱物は smectite であり、これに少量の mica 族鉱物や pyrite が含まれていることが明らかになった。

さらに、この火山灰の原土と、比較のために 1925 年に同火山から噴出した火山灰の化学分析値を Table 2A(a) に示した。この火山灰はほとんど変質を受けていない新鮮なものであり、加藤 (1912) が示した焼岳上部溶岩の成分とも近似したものであった。1912 年には同火山山頂の温度が 400°C 以上あった (小平, 1932) ことを考えると 1907 年から約 20 年間激しい噴火を続けていた同火山の当時の活動状況では、火山灰も essential なものが抛出されていたものと考えられる。これに対して、1962 年噴火で抛出された火山灰は、その化学成分の変化傾向と、smectite の存在から、この粘土は地表ではなく、地表下の浅いところで変質が進行してできたものであろうと考えられた。このような事実から、この焼岳では、噴火前の山体内部には、長い噴火休止期間中に醸成された大量の粘土が貯留されており、これに多量の水が吸収されて泥漿状になった、泥漿溜まり (mud reservoir) というべきものの存在が想定された。このときの焼岳の噴火では、この泥漿溜まりに、さらに地下深所から高温のガスが上昇・突入したため、泥漿中に含まれていた大量の水が一挙に水蒸気化し、その圧力によって地下の泥漿を、周囲の岩片もろともに噴出したものと解釈した (小坂・小沢, 1966)。

噴火直後の山頂付近の噴気孔温度は、この標高の水の沸点である 92°C を超えるものは認められなかった。しかしその後の同火山の活動の継続により、この地点の水分が涸渇・乾燥し、それ以後同火山のガス観測を続けられた杉浦・水谷 (1978) によれば、1965 年には噴気ガス温度は 163°C にまで上昇した。

また筆者は焼岳 1962 年噴火の前に、同火山山頂付近の地表をくまなく踏査し、火山ガスなどによる変質生成鉱物を詳しく調査していた。その結果、焼岳山頂噴気地域では、alunite, opal, hallotrichite, alunogen など、地表の酸性条件下で生成する二次鉱物のみで (小坂, 1961;

南・他, 1966), 噴火後に大量に認められた smectite や pyrite が全く見当たらなかった。この事実からも、このときの噴出物が、噴火によって地表下の山体内部から供給されたものであることを裏付けるものと考えられる。

#### 4) 浅間山 1973 年の噴火

浅間山は 1973 年 2 月 1 日、1961 年 11 月以来 11 年 2 カ月ぶりに噴火を再開した (Photo. 2e)。その後数回にわたり激しい爆発を繰り返し、その爆音は広範囲にわたって聞かれ、岩片を主として東北東に 3~5 km 飛散させた。火山灰 (Photo. 2f) は東南東から東北東の方向に広く降下し、前橋、伊勢崎から時には宇都宮、小山、水戸、相馬などを経て太平洋に達することもしばしばあった。またそれぞれの噴火前には B 型地震が頻発し、さらに比較的大きな噴火の前には A 型地震も記録されている。さらに 2 月 1 日、3 月 6 日、3 月 10 日などには小規模ながら火砕流も発生している (下鶴, 1973; 荒牧, 1973)。

このようにマグマ性の噴火と思われる活動でも、長い噴火休止期の後の噴火では、その初期の噴出物中には、多量の変質岩片や変質火山灰が含まれていた。それらの変質物は Fig. 3(b) に示すように anhydrite, gypsum, alunite などの硫酸塩鉱物を含んでおり、また化学分析の結果 (Table 2A(c)), opal (蛋白石-非晶質珪酸) を多量に含んでいることも明らかになった。

また、変質物の成分比は Table 2A(c) や Fig. 6(a) に示すような変化をしている。これは浅間山のようにそれまで、高温で活発な噴火を繰り返していた火山では、噴火の休止期間中に閉塞した火口の中で、fall back した火山灰や噴出岩片などが、なお続いている噴気活動や、雨水、凝縮水の影響を受けて、酸性環境で変質作用を受けていたものと考えられる。しかしこのような変質規模はさほど大きくなく、したがって変質物の生成量も少ないため、噴火活動再開後、高温の噴火が繰り返されれば、火口付近に蓄積していた変質生成物はたちまち涸渇し、あとは essential な噴出物のみとなると考えられる。実際にこの時の一連の噴火でも、噴火開始 1 カ月後の 3 月 11 日の噴火からは大量の新鮮な軽石のみの噴火となり、変質物はほとんど認められなくなった。

#### 5) 国後島爺々岳 1973 年の火山灰

1973 年 7 月 22 日に千島列島国後島北端にある爺々岳が噴火し、北海道東部地域にかなりの降灰を見た。ところがこの噴火が 1812 年以來 161 年ぶりの噴火 (気象庁, 1991) にもかかわらず、その火山灰は顕微鏡による所見でも、X 線粉末回折 (Fig. 3(c)) や化学分析の結果 (Table 2A(d)) からも全く変質の進行が認められなかった。これは風向の関係から、北海道東部に降灰があったのは爺々岳の噴火開始から 8 日後であり、激しい噴火に

よってこの間に火口周辺に堆積していたかもしれない変質生成物が、すでに拋出されてしまい、次々に拋出される essential な火山灰のみが道東に降下したのではないかと推察した(小坂・他, 1974)。その後 1999 年に行われた現地調査の結果などから、当時の火口周辺には顕著な噴気はなく、風化変質作用はほとんど進んでいないことなどが明らかになった(小坂・野上, 2000)。

#### 6) 新潟焼山 1974 年の噴火

1974 年 7 月 28 日に発生した新潟焼山の噴火は、1949 年 2 月から 9 月にかけての一連の噴火以来で、山頂中央ドーム付近に新たに生じた割れ目に沿って発生した水蒸気爆発であると考えられている。

茅原・他(1975)によると、この時噴出した火山噴出物中には類質物質のほか異質物質が多量に含まれており、異質物質には焼山火山の基盤を成す第三紀層起源のもの、さらにその基盤と考えられる結晶片岩および塩基性、超塩基性岩石起源のものがあるとされている。

噴出物中には Fig. 3(d) に示すように smectite, illite, kaolin 鉱物が含まれていた。このうち illite, kaolin 鉱物は前記の基盤岩中の第三紀層に含まれておりこれに由来すると考えられるが、smectite はそれら各層にも、またその下の塩基性もしくは超塩基性基盤岩にも存在しないので、これは山頂火口直下の浅所に存在していたと考えられる熱水性泥漿中で生成したものと推定した(小坂・他, 1977)。

#### 7) 草津白根山 1976 年の水釜の噴火

1976 年 3 月はじめ、草津白根山の山頂火口の一つ、水釜が突然爆発し、火山岩片や火山灰を北西数百メートルにわたって飛散させた(Photo. 2g)。同火山としては 1942 年以来 34 年ぶりの噴火であったが水釜での噴火はそれまで記録されていない(東京工業大学工学部・他, 1976)。

この噴火は、噴出物の落下地域の積雪がほとんど溶けていない(Photo. 2h) こと、噴出物はほとんど変質したもののばかりであり、地震その他の前兆現象が少なかったこと、さらに火山ガスの成分などからも、比較的低温の水蒸気爆発であったと解釈されている。

その噴出物は、既述のものとはかなり趣を異にしており、smectite, kaolin 鉱物のほか alunite, pyrophyllite, gypsum, sulfur, cristobalite などの変質鉱物を多量に含んでいた(Fig. 3(e))。またその化学成分も Table 2A(f), Fig. 6(a) に示すようにその原岩と思われるものの成分より大幅に変化して、SiO<sub>2</sub> が著しく増加していた。これは、次のように説明できる。強酸性の湖水をたたえる湯釜は水釜に隣接する草津白根山の山頂火口の一つで、その湖底では強酸性条件下で変質作用が進んでいる。生成

している変質鉱物は 1882 年以来たびたび繰り返している湯釜の噴火によって拋出され、近年噴火していない水釜の湖底に厚く堆積した。今回の噴火で拋出されたものはそれに他の諸火口からの噴出物も加ったものであると考えられる。

また pyrophyllite の存在は、同火山は近年、水蒸気爆発が起こる深さがしだいに深くなり、この鉱物を含む層に達したのではないかと、黒崎・他(1990)は論じている。

#### 8) 有珠山 1977 年の活動

北海道有珠火山は 1977 年 8 月 7 日、約 30 時間の前兆地震の後、山頂カルデラ内の小有珠火口丘の南東麓に新しい火口を開き、噴火を開始した(Photo. 3a)。噴煙の高さは最高 12,000 m に達し、軽石を南東-北西の方向に約 6~8 km 飛散させた。細粒の火山灰は、同火山以東の北海道全土に及び、オホーツク海にまで達した。

1 年 3 カ月の噴火期間中の噴出物総量は約 9,000 万 m<sup>3</sup> と見積もられている。この噴火は 1943 年昭和新山の活動以来 34 年ぶりであるが、山頂カルデラ内での活動としては 1853 年より、124 年ぶりであった。その活動経過は北海道大学理学部地質鉱物学教室(1978)および Katsui *et al.* (1978) に詳しい。

この軽石はデイサイト質のごく新鮮な未変質なものであったのに対して、粒径 10 μm 以下の火山灰は Fig. 3(f) に示すように smectite を主体とし、これにわずかの kaolin 鉱物, cristobalite, 斜長石を含むもので、著しく変質作用を受けたものであった。

このように、新鮮(未変質)と考えられる軽石岩片と極度に変質した火山灰とが同時に噴出したのは、有珠山形成の末期に生じたカルデラ底(おそらくは湛水していたと考えられる)に堆積した火山灰などの噴出物が、カルデラ湖水や、その後の火山活動による埋没などによって、大気と遮断された状況で、噴気や熱水作用を受け、アルカリ条件下で変質が進行した結果、この火山のカルデラ底の地表下には膨大な量の滞水粘土層が堆積していたと考えられる。この多量に水を含む堆積層に、さらに深部から上昇してきた高温のデイサイトマグマが貫入し、堆積層中の水を急激に水蒸気化して、爆発が始まったものと考えられる。この時の噴火が、いわゆる“マグマ水蒸気爆発”と呼ばれるゆえんである。

さらに 1977 年 8 月中旬頃、活動による地下圧力の増加と、地形変動により、小有珠南麓と銀沼間に生じた亀裂から、カルデラ底に粘土流が押し出されているのを発見した。これは近堂・他(1979)にも記載されているが、これらの粘土流の表面は Photo. 3b のように茶褐色を呈しているのに対し、その切断面は灰黒色をしており、地

表下の還元性の状況下におかれていたものと推定された。この粘土流物質を検討した結果、より smectite の含有量の多いものであることが判明し、有珠山カルデラ床の下にはこれらの smectite 層が存在していることが推測された。

また同じ有珠山でも 1943 年の昭和新山の活動は戦時中のため、その本格的調査研究はかなり遅れて始められた。その噴出物中に smectite に加えてかなりの量の kaolin 鉱物が含まれていたことが近堂 (1963) によって明らかにされている。この噴火は有珠山東方山麓の、中央火口の噴出物で覆われていた麦畑から起こったことから、噴火前の表層が地表風化により、smectite から kaolin 鉱物に変化していたことも考えられる。このため 1977 年の噴出物のように中央カルデラ底の地表下から直接由来し、しかも噴出直後に採取されたものに比べ kaolin 鉱物が多いことも十分に考えられることである。

#### 9) 木曾御岳 1979 年の噴火

木曾御岳火山は有史以来活動の記録がなかったが、1979 年 10 月 28 日 5 時 20 分頃、山頂南端の剣が峯南斜面の北西-南東方向にほぼ一直線に配列する大小約 10 個の爆裂火口を作って噴火が始まった。その後徐々に噴煙活動を強め、山頂付近には噴石を、また主として東北方向に火山灰を降らし、時には約 100 km 離れた諏訪市や、130 km 離れた長野市にまで降灰が見られた。同日午後には灰色の噴煙が 2,000 m にまで上昇したが、翌 29 日にはほとんど白色の水蒸気のみになった (Photo. 3c)。また爆裂火口下端からは泥流が流出し、地獄谷、濁川を経て大滝川に達した。

小林 (1979) によれば、噴火発生時は晴天にもかかわらず、降下火山灰は異常に湿っており、直径 2~3 mm の球粒状を呈していた。この噴火も活動開始前後の状況や、固形噴出物中に新鮮な岩片を含まなかったこと (Table 2A(e), Fig. 6(c)) などから、水蒸気爆発であったと考えられている。

降下火山灰や泥流物質中の粘土鉱物の同定は小坂・他 (1983) のほかにも石岡・他 (1980)、杉崎・他 (1980) によっても行われており、Fig. 3(g) に示すように smectite のほかにも halloysite (7Å)\* とその他の kaolin 鉱物などの存在が認められている (\*明らかにその存在が同定されるので、他の kaolin 鉱物と区別して記載した)。これは同火山が有史以来の噴火の記録が認められないほど長く活動を停止している間に、地表下の泥漿溜まりのほか、山頂付近の岩石の地表風化による変質作用が長期間継続したため、halloysite, kaolin 鉱物のような地表風化変質特有の粘土鉱物が生成し、これらと地表下で生成していた smectite とが共に抛出されたものと考えられる。その

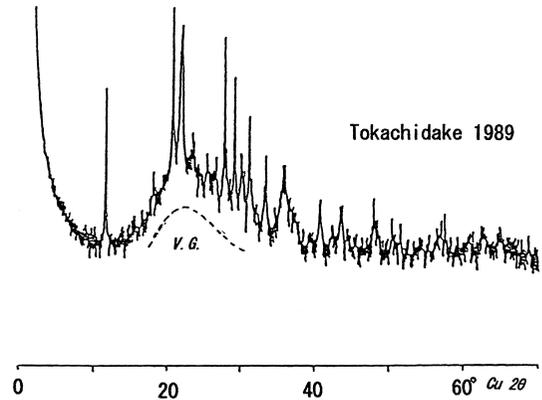


Fig. 4. XRD pattern of volcanic ash of Mt. Tokachidake in 1989. V.G.: volcanic glass

図 4 十勝岳 1989 年噴火の噴出物の X 線回折像。  
V.G.: 火山ガラス

後、噴気活動のみは長く継続した (Photo. 3d)。

#### 10) 十勝岳 1988~1989 年の噴火

北海道十勝岳は 1988 年 12 月 16 日に、62-II 火口から、1962 年以来 26 年ぶりの噴火を開始した (Photo. 3e)。最初は小規模な水蒸気爆発と思われる噴火であったが、次第に高温化の様相を呈し、12 月 25 日には火砕流が発生した。その後は火砕流の発生と火山爆発を繰り返し、火山灰は主として北海道の南東から東北東にかけての広範な地域に降下した。

これら火山灰や火砕流物質の中に含まれるガラス片やガラス質岩塊 (Fig. 4; Photo. 3f) の中には、Table 2B(g), Fig. 6(b) に示すように SiO<sub>2</sub> の量比が著しく大きいものに対して、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, K<sub>2</sub>O などの割合が著しく小さく、通常の火成岩にはあり得ない特異な組成をもつものもあった。

これらの結果を種々検討し、次のように推論した。すなわち 1962 年あるいはそれ以前の噴火でいったん抛出された本質岩塊である玄武岩質安山岩が、62-II 火口内に fall back し、火口または火道内に堆積した。噴火終息後も引き続き放出されていた火山ガスによって、これらの岩石が著しい酸性変質を受け、opal などを主体とした珪化岩に変質した。これが火道内での温度上昇に伴って溶融し、ガラス化したものが抛出されたものと解釈した。これは火山噴火予知連絡会で報告したが、後に勝井・他 (1989) や Ikeda *et al.* (1990) によっても支持された。

#### 11) 雲仙普賢岳の 1990~1995 年の噴火

雲仙普賢岳は 1990 年 11 月 17 日、1792 年以来 198 年ぶりに噴火した (Photo. 3g)。最初に爆発したのは地獄跡火口、九十九島火口の 2 カ所で、この付近は噴火前には全面的に土壌化が進み、一面に草木に覆われ、普賢池

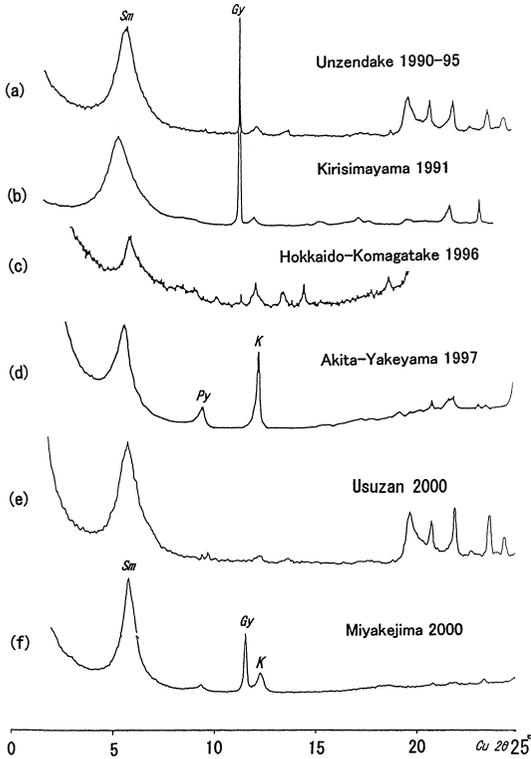


Fig. 5. XRD patterns of volcanic ash of several volcanoes in Japan (II). Sm: smectite, Py: pyrophyllite, K: kaolin mineral, Gy: gypsum

図5 日本で近年噴出した火山灰のX線回折像(II). Sm: スメクタイト Py: パイロフィライト K: カオリン鉱物 Gy: 石膏

をはじめいくつかの火口池が存在していた。このため、噴火初期には火山灰などの固形噴出物は一様に湿潤しており、噴火は多分に水蒸気爆発の要素を具え、噴出物中には多量の粘土を含んでいた (Fig. 5(a); Table 2B(h); Fig. 6(d)).

山頂での火口活動は翌1991年2月12日に新たに屏風岩火口を開口するなど、さらに激化し、同年5月20日、地獄跡火口から溶岩ドームが出現する (Photo. 3h) に及んでその様相を一変した。溶岩ドームの成長は続き、その一部が山頂東および北東斜面を崩落するたびに火砕流が頻発し、山麓地域に多大の被害をもたらした。

またこの火砕流に伴って発生する細粒の火山灰はほとんどマグマからの本源物質が主体であり、粘土鉱物の含有量は激減した (Nogami *et al.*, 2001)。このように火山灰中の二次変質鉱物の含有量からも、上記の噴火様式の変化がはっきりと認められた。

12) 霧島新燃岳 1991~1992年の噴火

霧島火山新燃岳では1991年11月13日夕刻から火口直下において微小地震の群発が始まり、同年12月1~4

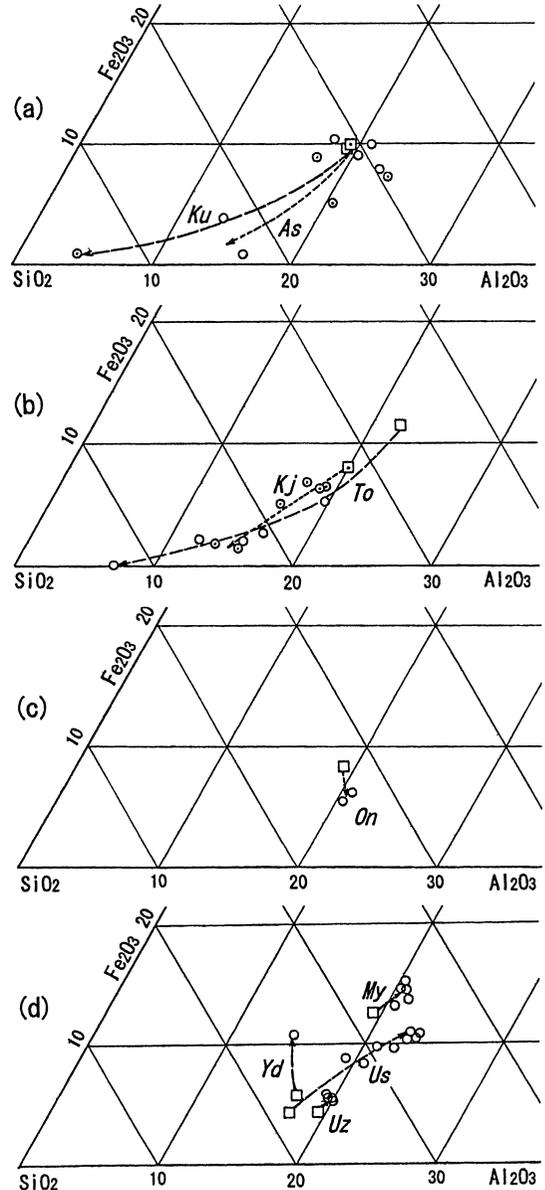


Fig. 6. Variation of relative proportions of SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the ejecta of several volcanoes. □: original rock, ○: altered rock, Ku: Kusatsu-Shiranesan, As: Asamayama, Kj: Kujusan, To: Tokachidake, On: Ontake, Yd: Yakedake, Uz: Unzendake, Us: Usu, My: Miyakejima

図6 変質噴出物の化学組成変化 (SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>図による). □: 原岩 ○: 変質岩 Ku: 草津白根山 As: 浅間山 Kj: 九重山 To: 十勝岳 On: 御岳 Yd: 焼岳 Uz: 雲仙岳 Us: 有珠 My: 三宅島

日、翌1992年1月26日、3月19日、4月19日などに火山灰を含む噴煙を上げた。5月10日には火口東内壁より泥流が流出し、1822年の火口底にたまっているのが認められた。降灰域は主として火口内に限られており、その総量で2000~3000 ton以内と推定されている(井村, 1992; 東京大学地震研究所・他, 1992)。

平林・他(1996)は、1991年12月、あるいは1992年1月に噴出した火山灰の $2\mu\text{m}$ 以下の細粒部分について、未処理、エチレングリコール処理、加熱処理をして、X線回折を行った。その結果、smectiteのみが同定され、菅野・他(1961)が記載したkaolin鉱物は含まれていなかった(Fig. 5(b))。1959年の噴火では含まれていたkaolin鉱物が今回の噴火では存在しなかった。このことについては、前回の噴火は1822年から137年ぶりの噴火であったのに対し、今回の噴火はそれ以来で32年ぶりであり、この休止期間の長短が、この相違を招いたものとも考えられる。

### 13) 1995年の九重山の噴火

江原(1995)、京都大学理学部附属火山研究施設(1996)などによれば、1995年10月11日、九重火山星生山東側山腹に生じた、東西約500mにわたる火口列から突然噴火が始まった。噴煙は火山灰を多量に含む黒煙で、約1,000mまで上昇した。抛出された火山灰は初めの頃は湿っており、泥流となって北方へ約200m流下した。地質調査所(1995a)によれば、九重火山の噴火は1738年以来257年ぶりのものである。その後も同年10月18日頃より約25日頃までに数回の降灰が認められている(京都大学理学部附属火山研究施設, 1996)。

この活動で噴出した火山灰並びに泥流物質中に含まれる粘土鉱物などの二次生成鉱物は、宮本・他(1996)および地質調査所(1995b)によればその細粒部分にsmectite, kaolin 鉱物, alunite などを含んでいた。特に宮本・他(1996)は今回の噴火による火山灰層下部のsmectiteの一部に脱水相が認められることから、噴火初期の爆発開始箇所が、噴火以前は $100^{\circ}\text{C}$ 以下であったが、噴火に伴って百数十度まで上昇したと推定している(Fig. 3(h))。

しかしこれらの噴出物の化学組成は、いずれもTable 2B(i)やFig. 6(b)のようになり、その大部分が酸性変質を受けたものであった。これはこの火山が九重硫黄鉱山で知られるように、強酸性の噴気ガス、降水などにより、長期間地表で、強酸性の変質作用を受けていたために $\text{SiO}_2$ の多い酸性変質物の分厚い堆積層が地表を覆っており、それが地表下での泥漿溜まりで発生した水蒸気爆発で、地表下で生じた泥漿物質を伴って吹き飛ばされたものであろう。このように火山噴出物質に含まれる粘土

の種類は同定ばかりでなく、その化学成分の変化を考慮しなければならない場合もある。

### 14) 北海道駒ヶ岳1996年の噴火

北海道駒ヶ岳は1996年3月5日、山頂部の1929年火口、1942年火口付近に生じた割れ目に沿って新たに開口した火口列から始まった。1942年の噴火以来54年ぶりの噴火であった。噴出物は主として南東麓へ約30kmに分布する降灰と、山頂付近に飛散した拳大の岩片が認められた。しかしこれら岩片の落下した地点の積雪はほとんど溶融しておらず、噴石の温度はさほど高くなかったと推定されている。

火山灰中の粘土鉱物は、宇井・他(1997)によると、smectiteを多く含んでおり、これは山頂直下の熱水変質作用が進行中の部分から供給されたものであり、新しいマグマの上昇によって生じたものは見当たらなかったとしている(Fig. 5(c))。

### 15) 秋田焼山1997年の噴火

秋田焼山は1997年8月16日11時頃、山頂の北東の空沼火口の東側の内壁から小規模な水蒸気爆発が発生した。1949年以来48年ぶりの噴火であった。

噴出物は泥流、火山灰、噴石などであるが、その量は少なく、また降下範囲も $150 \times 250\text{m}$ の狭い区域に限られていた(林・他, 1997)。Nogami *et al.* (2000)によれば、この噴出火山灰中にはkaolin 鉱物, smectite, pyrophyllite (Fig. 5(d))が含まれていた。このうちkaolin 鉱物, smectite は地表付近から噴出されたものであろうことを示しているが、pyrophyllite は山頂から1km下で生成したと想定される(番場・窪田, 1997)ので、今回の浅い噴出源にそれが含まれていたのは、過去の噴火で火道付近に堆積していたものが再び噴出したものと考えられている。

### 16) 有珠山の2000年の噴火

2000年3月31日13時10分頃西山西麓で爆発が発生し、噴煙の高さは3000mに達した。4月9日には熱泥流も発生し、6月中旬にはコックステール型噴火も見られたが、その後活動は徐々に衰え、7月中旬にはほぼ停止に近い状態になった。

この一連の噴火で抛出された火山灰、泥流物質中の粘土鉱物はFig. 5(e)、Table 2(j)に示すように、その大部分はsmectiteであり、これに少量のkaolin 鉱物が含まれていて、全般的に極めて湿潤であった。

外輪山外斜面に堆積している火山灰層は、山頂カルデラ底に堆積していた変質物とその後の噴火活動により抛出されたものであることが近堂(1963)によって示されている。このことから、今回の火山灰は、噴火の起きた外輪山外斜面に堆積していた古い火山灰層が再抛出され

たものと考えられる。

17) 三宅島の2000年の噴火

三宅島では2000年6月26日18時頃より、同島直下に地震が発生した。その後震源範囲は西北西方向に移動し、翌6月27日には同島西方2km沖の海域で、海底火山活動の発生に伴う小範囲の黄変色海水が発見された。その後7月8日、14~15日、8月10日、18日、29日に雄山山頂からの噴火が引き続いて発生し、8月29日には温度の低い火砕流状の現象も見られた。この間、黒色ないし灰白色の噴煙が、最高8,000mの高度まで達した。

この期間に上空からの観測により、雄山山頂部に直径

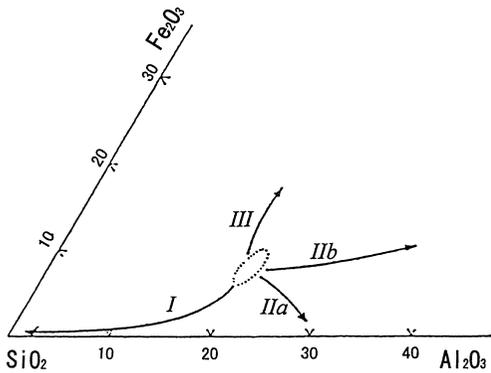


Fig. 7. Classification of change in chemical composition of alteration products by chemical conditions. I: strongly acidic IIa: weakly acidic IIb: neutral III: basic

図7 各変質条件下におけるSiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>組成変化。I: 強酸性 IIa: 弱酸性 IIb: 中性 III: 塩基性

約1.5km、深さ500mに及び陥没が起っていることが視認された。主として東方山麓に降下した火山灰の量は、総量 $11 \times 10^6 \text{ m}^3$ と推算(中田・他, 2001)されている。

同火山の1962年噴火で抛出された火山灰は黒色粗粒のラビリ状のものばかりであったのに対して、1983年の火山灰は黒灰色細粒混じりであり、今回の火山灰は灰白色、細粒のものが多かった。2000年の噴出物中の含有粘土鉱物は、野上(私信)によれば多くはsmectiteであったが、最初の7月8日のもののみにはkaolin 鉱物が少量含まれていた(Fig. 5(f), Table 2B(k))。このkaolin 鉱物は雄山山頂の地表部のものであり、その後の噴火では、山頂付近の地表下で造成されたsmectiteのみが抛出されるようになったのであろう。それにしても近年は20年ごとに溶岩を流出する噴火を繰り返していた三宅島の、雄山の山頂直下に、これほど大規模な変質粘土の貯留層があったとは、誰が予想し得たであろうか。

3. 火山噴出物に含まれる粘土やその他の変質物の成因や性質などについての2, 3の検討

3-1 地表および地表下浅所での粘土鉱物の生成環境もともと火山の固形噴出物中に粘土鉱物などの二次生成鉱物を含有するのは、それらの噴出物が、噴出以前に何らかの形の変質作用を受けていたことを意味する。しかも、その変質条件の違いによって、それぞれ異なった鉱物を生成するので、それら含有二次鉱物の同定を行うことによってその生成条件を考慮して、その火山の噴火以前の状態を推察することができる。

筆者はかつて、それまでの多くの研究結果をとりまと

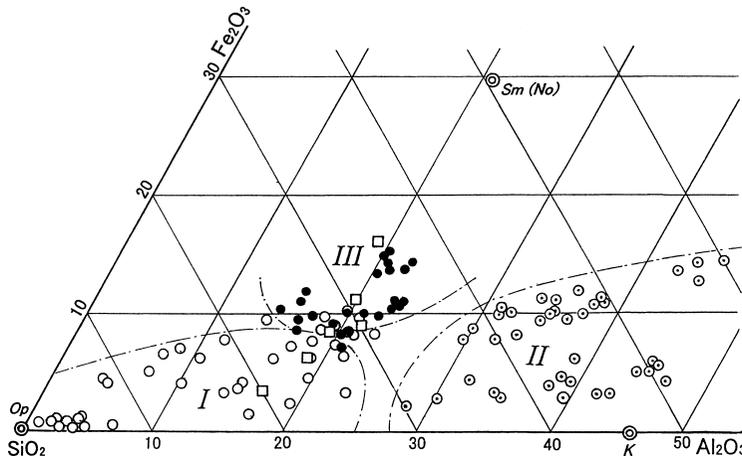


Fig. 8. Classification of volcanic ejecta based on their chemical compositions and secondary mineral assemblage. I and ○: strongly acidic, IIa and ⊙: weakly acidic to neutral, III and ●: basic, □: original rock, Op: opal, Kao: kaolin mineral, Sm: smectite, No: nonttronite

図8 含有二次鉱物による変質物の化学成分の分帯。I and ○: 強酸性 IIa and ⊙: 弱酸性 III and ●: 塩基性 □: 原岩 Op: 蛋白石 Kao: カオリン鉱物 Sm: スメクタイト No: ノントロナイト

めて、岩石特に火成岩が地表あるいは地下浅所（地表下）において、種々の環境下で、それぞれの条件により異なった変質過程をたどることを報告した (Fig. 7) (小坂, 1968; 小坂・平林, 1981; 小坂, 1995)。それによると、

a) 強酸性の温泉水や、雨水などと反応して強酸に作用する火山ガス（例えば HCl, HF, SO<sub>2</sub> など）により、岩石が変質されると、岩石中の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O など、SiO<sub>2</sub> 以外の諸成分は溶脱されて減少し、それに反して SiO<sub>2</sub> のように、この条件では比較的溶脱し難い成分は残留し、上述の各成分の減少によ

り、相対的に増加する形となり、この変化がさらに進行すれば、最終的には SiO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O で示される opal (蛋白石) のみになってしまう。これを I 型の変質系列とする。

b) 前項ほど酸性度が強くなく、弱酸性 (pH 3 以上) として作用する時には Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> が溶脱により減少し、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は溶脱しにくくなり、残留、濃縮、相対的増加の傾向となり最終的には kaolin 鉱物 2SiO<sub>2</sub> · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 2-4H<sub>2</sub>O が生成する。この変化系列を IIa 型とする。

c) 堆積火山灰の地表風化のように、その変質条件が雨水など中性付近（空気中の CO<sub>2</sub> の溶解などにより pH は

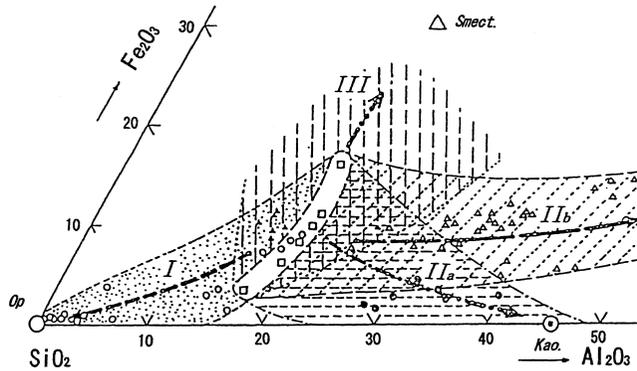


Fig. 9. Variation in chemical compositions of rocks through alteration under several conditions. I and ○: strongly acidic, IIa and ⊙: weakly acidic, IIb and △: neutral, III and ●: basic, Op: opal, Kao: kaolin mineral, Smect: smectite, No: nontronite

図 9 原岩の化学成分範囲を加味した変質傾向 3 成分図。I and ○: 強酸性 IIa and ⊙: 弱酸性 IIb and △: 中性 III and ●: 塩基性 Op: 蛋白石 Kao: カオリン鉱物 Sm: スメクタイト No: ノントロナイト

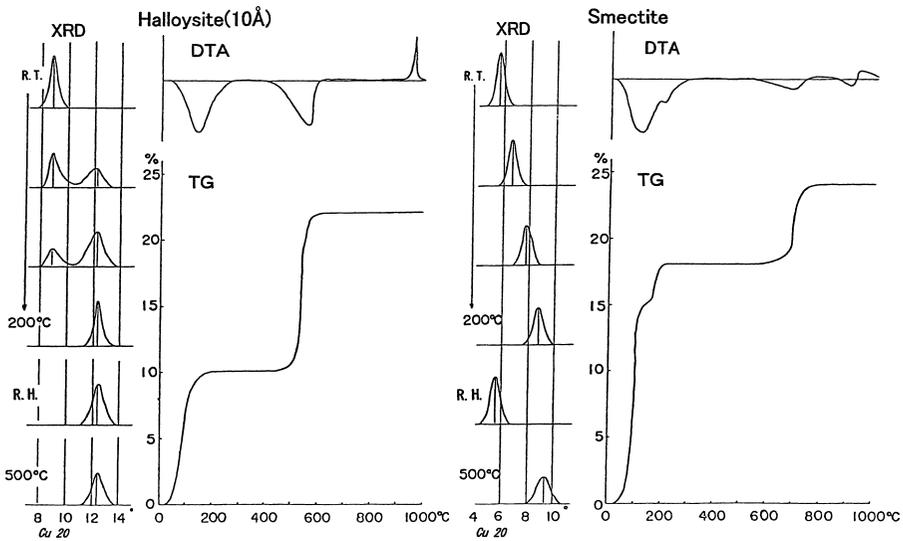


Fig. 10. Dehydration of two clay minerals upon heating (Ossaka, 1972). DTA: Differential Thermal Analysis, TG: Thermogravimetry, XRD: X-Ray Diffraction, R. T. : Room Temperature, R. H. : Rehydration

図 10 粘土鉱物 2 種の加熱脱水変化 (小坂, 1972)。DTA: 示差熱分析 TG: 加熱減量曲線 XRD: X 線回折像 R. T.: 室温 R. H.: 再水和

5位のものが多いと考えられる)のものに限られ、かつ大気中での酸化状態で原岩(火山灰など)中のFeOはほとんどFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に変化しているような場合には、SiO<sub>2</sub>は溶脱され、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は残留・濃縮して、allophane → halloysite (10Å) → halloysite (7Å)と変化する。またこの際鉄は酸化現象のためFeO → Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>となり、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>はあまり溶脱が進まず、それほど減少していない。この変化をIIb型とする。

d) 岩石が地表下(地下浅所)で、大気との接触を断られた状態で熱水的作用を受ける場合には、多くの場合還元性で弱アルカリの状況におかれると考えられる。この際にはFeO(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)をはじめ多くの塩基成分は溶脱しにくくなり、相対的には残留・濃縮の傾向におかれ、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は若干減少の傾向にあるが、一般的に見て、周囲に対しては閉塞状態であり、その他の塩類もあまり溶脱は顕著でない。このような条件下では最終的にはmontmorilloniteなどのsmectite鉱物が生成している。この変化系列をIII型とした。

筆者らのこれまで取り扱った多くの変質噴出物の化学成分を、opal, kaolin 鉱物, allophane, halloysite など、それぞれ含有する粘土鉱物により分類して、先のAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>3成分図にプロットした(Fig. 8)。このように、その成分範囲がかなり広く分布するのは、この変質作用により、原岩の成分は大幅に変化することと、その出発物質である火成岩にもかなりの組成範囲をもつためと考えられる。この図ではこれらの変質物の成分はおおむね、原岩と変質による最終生成物との間に分布し、生成二次鉱物ごとにほぼ分帯できる。Fig. 7の変質傾向曲線に対し、原岩組成の成分範囲とFig. 8の結果を考慮して作成したのがFig. 9である。

3-2 Pyrophyllite の生成条件

このほかに火山噴出物中に希にpyrophylliteの存在が認められることがあるが、この鉱物は上述の地表あるいは地表下浅所で生じる諸鉱物に比べ、それより高温・高圧で生成するものと考えられており(逸見・松田, 1975)、したがって上記諸鉱物よりも深い地点で生成したものであろうと想像される。しかしそのpyrophylliteが地表に達する経路については、未だはっきり示されていない。

3-3 粘土鉱物の安定性

smectite 鉱物のように、地表下の還元的雰囲気のもとで弱アルカリ性の熱水現象で生成した鉱物は、それが噴火活動などにより一挙に大気中にさらされるようになると、その環境条件の急変により、安定を失って分解またはkaolin 鉱物など他の鉱物に変化してしまうことがある。例えば、1953年箱根早雲山で火山性泥流が発生した

が(岸上・小坂, 1955)、その時に流出した泥土中には大量のsmectiteを含んでいた。ところが、そのわずか十数年後の1963~1965年頃の再調査では、その泥流表面にsmectiteはほとんど見当たらなかった(小坂・平林, 1981)。

Smectite や halloysite (10Å) は後述するように、僅か100°C前後で脱水し、他の形の鉱物に転移することも知られている。

また、allophane, halloysite (10Å) など地表風化で生じた粘土鉱物は、同じく地表のままであれば比較的安定で、長年月にわたりその形のまま存在していることも知られている。

3-4 粘土鉱物に含まれる水の存在状態と加熱脱水特性

粘土鉱物は前述の変質過程において、多量の水を取り込んだ含水アルミノシリケートであるため、多くの付着

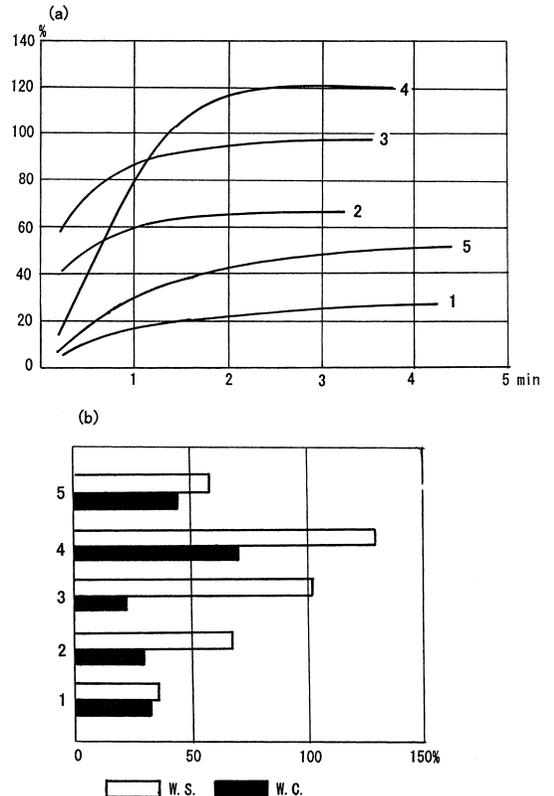


Fig. 11. Comparison of water sorption capacities (a) with natural water contents (b) in wt% of soils (Ossaka et al., 1975). W. S.: water sorption capacity, W. C.: natural water content

図 11 (a) 土壌の吸水能の測定と (b) 自然含水量との比較(小坂・他, 1975). W. S.: 吸水能 W. C.: 自然含水量

水や構造水等各種の水を保有している。また Fig. 10 にもその 1, 2 の例を示したように加熱により脱水し, kaolin 鉱物の halloysite(10Å) は約 100~150°C では 2 水物の halloysite (7Å) と 4 水物の halloysite (10Å) の 2 相に分かれ, 約 200°C で 2 水物のみになり, 500°C で完全に脱水する。

一方, smectite 鉱物の一種である montmorillonite などでは, この加熱による脱水は徐々に行われ, このためそれらの粘土の格子定数は 100~300°C で少しずつ減少し, 300°C ですべて脱水し, その値も約 10Å になる。このような火山灰中に含まれる粘土の加熱脱水特性を利用して, 火山爆発発生時の温度推定も行われている(宮本・他; 1996)。

また smectite など多くの粘土鉱物は, 多量の水を吸着する性質をもっており, それを吸水能として測定しているが (Fig. 11), その量は時には粘土重量の 125% にも及ぶことがある。この特性が火山の山頂付近に貯留されている変質粘土層中に大量の水を保有する原因ともなっている。

またこれらの大量の吸着水は, チキソトロピー (thixotropy) 現象により, 一応山体内では固相の形態を取っているが, これが噴火などの振動や衝撃により, 一挙に液状化し, これが 1962 年の焼岳の噴火後に発生した泥流

のような, 噴火直後, あるいは同時に発生する火山性泥流 (一次的) 発生の原因になっていると考えられている。

#### 4. 火山体で生ずる粘土の生成環境の複合性

前述のように, 粘土鉱物はその生成環境によって, できる鉱物の種類が全く異なるものになる。この特性を利用して, 火山の固形噴出物中に含まれる粘土鉱物の同定によってその火山の噴火前の地下の環境を知り, それによって, そのときの噴火の様式や状況を考究しようとするものである。しかし火山で生成し貯留されている粘土は必ずしも一定条件で生成したものとは限らない。火山活動の盛衰や噴火などにより, その生成環境や条件が一変することも珍しくない。それゆえ, 以下に示すような変質条件 (環境) の複合も考慮しなくてはならない。

たとえば, かつては地表にあって噴気ガスその他の作用によって強酸性条件下で変質が進行していた場合でも, そのうち, 地表活動の衰退があれば, その後は中性付近での風化変質が進むと考えられる。

また山頂近くの地表下で還元性のアルカリ条件の下で長期間造成された粘土でも, 一瞬の噴火でそれが地表に抛出されれば, 以後は地上の酸化雰囲気のもとで中性または酸性条件にさらされて, さらに変質を続けることも考えられる。また爆発により, それ以前から地表にあっ

Table 3. Alteration type and change in chemical compositions of altered volcanic ejecta.

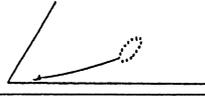
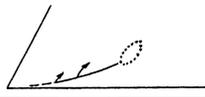
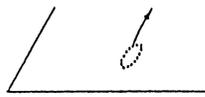
type	Chemical composition	Clay minerals	Volcanoes
I		opal cristobalite	Asama Kusatsu Tokachi
I II		opal alunite kaolin mineral	Asama Kusatsu
I III		alunite smectite kaolin mineral Halloysite(10Å)	Kusatsu (Kuju)
II		Allophane Halloysite(10Å)	Ontake
III		Smectite	Yakedake Usu Unzen Kirishima Miyakejima
III II		Smectite Kaolin mineral Kao.-Smec.Mix-R	Usu(1943) Ontake Miyakejima

Table 4. Clay minerals in volcanic ashes and classification of alteration processes.

		smectite	halloysite	kaolinite	chlorite	pyrophyllit	opal	alunite	gypsum	anhydrite	sulfur	pyrite	sericite	Alteration process
2 Kirishima-Shinmoedake	1959	○		○										III→II
3 Yakedake	1962	○												III
4 Asama	1973						○ ○ ○							I→II
5 Chachadake	1973													not altered
6 Niigata-Yakeyama	1974	○											○	mixed with the minerals form basement rock
7 Kusatsu-Shiranesan	1976	○ ○ ○			○ ○ ○						○			I→II+III
8 Usuzan	1977	○		○										III (→II)
9 Kiso-Ontake	1979	○ ○		○				○				○		II
10 Tokachidake	1988-89						○							I
11 Unzen-Fugendake	1990-95													III
12 Kirishima-Shinmoedake	1991-92	○												III
13 Kujusan	1995	○												III
14 Hokkaido-Komagatake	1996													III
15 Akita-Yakeyama	1997					○								old volcaniclastics
16 Usuzan	2000	○												III→II
17 Miyakejima	2000	○ ○												III (+II)

I: acidic, I→II: acidic → neutral, II: neutral, III: basic, III → II: basic → neutral

た物質も巻き込んで飛散させることもあるであろう。このように火山活動の推移を考えると、酸性→中性 (I→II)、あるいはアルカリ性→中性 (III→II) といったような変質作用の複合による粘土鉱物の生成も加味しなくてはならない。

これまで述べてきたような火山噴出物中に含まれていた、粘土その他の二次変質鉱物の生成条件を、前項で述べたような火山活動にありがちな環境の変化や推移による複合性を考慮に入れた推定を試みた (Table 3)。これらの二次鉱物の多様性が、主として火山の水蒸気爆発における、種々な過程の考察に資することになる (Table 4)。

## 5. あとがき

以上筆者やその他の研究者がこれまでに行ってきた本邦各火山の固形噴出物中に含まれている粘土鉱物その他の二次鉱物の記載と、火山活動の解析に必要と思われる、粘土鉱物の生成条件やその他 2, 3 の特性や粘土鉱物の取り扱いなどについて記し、それらをもとに行った、各火山活動の解析結果について述べてきた。

火山噴出物中に含まれる粘土鉱物を利用して、火山活

動を推定する方法の利点を 2, 3 挙げてみると、

1) 粘土鉱物はその性質上、周囲の温度、圧力、化学的特性などの環境、条件の微妙な変化に、すぐ対応して変化するので、他の一般の鉱物に比べて、はるかに鋭敏な指標になりうる。

2) 噴火前後の火山活動の推移と変化に、随時、随所で関与しているので、その時その地点の情報をとらえて、これを伝えることができるはずである。

3) とかく危険を伴いやすい、活動中の火山の調査に、火口を遠く離れた場所に到達した試料 (火山灰など) から情報の収集が可能である。

以上のような方法で得られる情報の例としては、

1) そのときの火山活動がマグマ性のものかどうか、あるいは水蒸気爆発的なものであるかどうか。

2) 噴火発生源または爆発箇所がその山体のどの位置であるのか、また深さはどのくらいか。

3) 火山体内部の温度や圧力はどうなっているのか。特に水の動向や関与の推定。

4) 噴火のメカニズムが現在はどうで、今後どのように変わっていくか。また、それによって今後火山活動がどのように推移するか。

などを降り続く火山灰などで刻々見届けることができるであろう。

しかしこれらの方法で引き出し得る情報はまだその一部であり、今後粘土鉱物学の基礎的研究と、その火山活動調査に適用する方法が進歩することによって、さらに多くの情報が引き出せるようになることを切望するものである。

#### 引用文献

- 荒牧重雄 (1973) 浅間火山 1973 年 2~3 月の噴火の際に発生した小型火砕流. 火山, **18**, 79-94.
- 番場光隆・窪田康宏 (1997) 熱履歴からみた北部八幡平一焼山地域の地熱系モデル. 地熱, **34**, 1-13.
- 茅原一也・小松正幸・荒牧重雄 (1975) 新潟焼山 1974 年活動の噴出物—特に異質物質について—. 火山, **20**, 109.
- 地質調査所 (1995a) 古文書に見られる九重火山の噴火. 火山噴火予知連絡会会報, **63**, 53-54.
- 地質調査所 (1995b) 1995 年 10 月 12 日九重山噴火火山灰の XRD 分析. 火山噴火予知連絡会会報, **63**, 51-52.
- 江原幸雄 (1995) 1995 年九重火山噴火. 火山, **40**, 425-427.
- 林 信太郎・伊藤英之・千葉達郎 (1997) 1997 年 8 月 16 日秋田焼山火山の水蒸気爆発 (速報) その 1. 噴出物の地質記載. 日本火山学会 1997 年度秋季大会講演予稿集, Y03.
- 逸見吉之助・松田敏彦 (1975) カオリン, パイロフィライトの平衡境界. 須藤俊男教授退官記念論文集, 151-156.
- 平林順一・大場 武・野上健治 (1996) 1991~1992 年霧島新燃岳の活動と火山ガス組成. 火山, **41**, 263-267.
- 北海道大学理学部地質鉱物学教室 (1978) 1997 年有珠山噴火の推移と噴出物. 火山噴火予知連絡会会報, **11**, 29-37.
- Ikeda, Y., Katsui, Y., Nakagawa, M., Kawauchi, S., Watanabe, T., Fujibayashi, N., Shibata, T. and Kagami, H. (1990) Petrology of the 1988-89 essential ejecta and associated glassy rocks of Tokachi-dake volcano in central Hokkaido, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Jpn.*, **35**, 147-162.
- 井村隆介 (1992) 霧島火山群新燃岳 1991~92 年の小活動. 火山, **37**, 281-283.
- 石岡孝吉・鈴木和博・諏訪兼位 (1980) 御岳山噴火の岩石学的研究. 御岳山 1979 年火山活動および災害の調査研究報告, 13-24.
- 一色直記 (1962) 焼岳の爆発. 地質ニュース, **97**, 20-22.
- 菅野一郎・本荘吉男・桑野幸男 (1961) 1959 年 2 月 17 日噴出の霧島火山群新燃岳火山灰の粘土鉱物. 粘土科学の進歩, **3**, 214-224.
- 加藤鉄之助 (1912) 硫黄岳 (焼岳) 噴火事項. 地質調査報告. 震予調報, **75**, 1-75.
- Katsui, Y. et al. (1978) Preliminary report of the 1977 eruption of the Usu volcano. *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ.*, Ser. IV, **18**, 385-408.
- 勝井義雄・河内晋平・荒牧重雄・近堂祐弘 (1989) 1988 年十勝岳噴火の推移. 1988 年十勝岳火山噴火の推移, 発生機構および社会への影響に関する調査研究, 3-29.
- 岸上冬彦・小坂丈予 (1955) 1953 年 7 月 26 日の早雲山津波の調査. 震研彙報, **33**, 153-161.
- 気象庁 (1991) 日本活火山総覧 第 2 版.
- 小林武彦 (1979) 1979 年御岳山火山活動. 地球科学, **33**, 6 号.
- 小平孝雄 (1932) 焼岳最近の活動. 火山, 1 集, **1**(4), 52-64.
- 近堂祐弘・藤谷朋夫・勝井義雄・新井田清信 (1979) 有珠火山 1977~1978 年火山灰の性質. 火山, **24**, 223-238.
- 近堂祐弘 (1963) 北海道有珠山周辺における第四紀火山碎屑物の粘土鉱物学的研究. 地質学雑誌, **69**, 362-377.
- 黒崎 誠・小坂丈予・松田敏彦 (1990) 草津白根山の噴出物中の粘土鉱物とその噴火形態. 鉱物学雑誌, **19**, 87-91.
- 京都大学理学部附属火山研究施設 (1996) 九重火山の火山活動について (1995 年 10 月~1996 年 1 月). 火山噴火予知連絡会会報, **64**, 29-42.
- 松尾禎士・他 13 名 (1977) 1977 年有珠山噴火直後の地下水, 温泉水および火山灰の地球化学的研究. 火山, **22**, 201-220.
- 水上 武・平賀士郎 (1959) 最近の霧島火山の活動についての一考察. 火山, **4**, 56.
- 南 英一・小坂丈予・小坂知子 (1966) 本邦 2, 3 の火山, 温泉地域における Halotrichite, Alunogen 鉱物の生成と母岩の変質現象について. 温泉科学, **17**, 28-35.
- 宮本知治・中牟田義博・森 康・鈴木武日児・柳 哮 (1996) 九重火山 1995 年 10 月 11 日噴火における火山灰構成物質の X 線回折法による検討. 九重火山の噴火活動に関する検討会資料.
- Murai, I. (1962) A brief note on the eruption of the Yake-dake Volcano of June 17, 1962. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **40**, 805-814.
- 中田節也・長井雅史・安田 敦・嶋野岳人・下司信夫・大野希一・秋政貴子・金子隆之・藤井敏嗣 (2001) 三宅島 2000 年噴火の経緯—山頂陥没口と噴出物の特徴. 地学雑誌, **110**, 168-180.
- Nogami, K., Hirabayashi, J., Ohba, T. and Yoshiike, Y. (2000) The 1997 phreatic eruption of Akita-Yakeyama volcano, northeast Japan: Insight into the hydrothermal processes. *Earth Planets Space*, **52**, 229-236.
- Nogami, K., Hirabayashi, J., Ohba, T., Ossaka, J., Yamamoto, M., Akagi, S., Ozawa, T. and Yoshida, M. (2001) Temporal variations in the constituents of volcanic ash and adherent water-soluble components in the Unzen Fugendake eruption during 1990-1991. *Earth Planets Space*, **53**, 723-730.
- 小坂丈予 (1960) 降下火山灰の変朽度について. 火山, **5**, 138.
- 小坂丈予 (1961) 焼岳火山の噴気孔周辺における変朽現象について. 火山, **5**, 145-153.
- 小坂丈予 (1968) 火山温泉地域における岩石の変質現象について. 地熱, **17**, 65-79.
- 小坂丈予 (1972) 土砂崩壊地における粘土鉱物の分布と

- その性質. 施工技術, 5, 30-38.
- 小坂丈予 (1982) 粘土鉱物による火山活動の解析. 粘土科学, 22, 127-137.
- 小坂丈予 (1995) 岩石の変質と温泉の化学成分. 温泉科学, 45, 159-167.
- 小坂丈予・小沢竹二郎 (1966) 1962年焼岳活動の噴出物とその噴火様式について. 火山, 11, 17-29.
- 小坂丈予・平林順一 (1981) 火山活動に伴う粘土鉱物. 鉱物誌, 15, S223-238.
- 小坂丈予・野上健治 (2000) 国後島爺々岳 1999年日露共同調査と 1973年噴火活動の再検討. 火山, 46, 71-77.
- 小坂丈予・虎谷洋子・平林順一 (1977) 新潟焼山 1974年7月噴火における噴出物の火山化学的意義. 三鉱学会昭和52年秋季連合学術講演会講演要旨集, 46.
- 小坂丈予・小沢竹二郎・大平洋子・山田久夫 (1974) 1973年7月22日爺々岳噴火の火山灰について (演旨). 火山, 19, 25.
- 小坂丈予・大平洋子・岩井津一・森川日出貴 (1975) 関東各地における堆積層中の粘土鉱物の性質と土質特性. 急激な都市化に伴う災害ポテンシャルの変遷過程の研究, 43-57.
- 小坂丈予・小沢竹二郎・酒井均・平林順一 (1983) 木曾御岳火山 1979年噴火後の活動状況と地球化学的研究. 火山, 28, 50-74.
- 小坂丈予・黒崎誠・松田鉦二・野上健治・平林順一 (1989) 十勝岳 1988~1989年活動時の噴出物の化学成分と噴火機構に関する一考察. 日本火山学会 1989年度秋季大会予稿集, 48.
- 下鶴大輔 (1973) 浅間火山の最近の噴火活動について. 火山, 18, 33-34.
- 曾屋龍典・宇都浩三・牧本博・鎌田浩毅・奥村公男・須藤茂 (1984) 三宅島火山 1983年噴火と噴出物. 火山, 29, S283-S296.
- Sudo, T. and Ossaka, J. (1952) Hydrated halloysite from Japan. *Jap. Jour. Geol. Geog.*, 22, 215-229.
- 杉浦孜・水谷義彦 (1978) 焼岳における噴気ガスの同位体および化学組成の変化. 火山, 23, 241-248.
- 杉崎隆一・杉浦孜・水谷義彦・日下部実 (1980) 御岳火山噴火放出物および火山ガスの地球化学的研究. 御岳山 1979年火山活動および災害の調査研究報告, 37-53.
- 多田文男・津屋弘達 (1927) 十勝岳の爆発. 震研彙報, 2, 49-84.
- 東京大学地震研究所・京大学理学部・熊本大学教育学部・合同観測班地質岩石グループ (1992) 霧島火山群新燃岳の活動 (その2). 火山噴火予知連絡会会報, 53, 81-93.
- 東京工業大学工学部・理学部 上智大学理工学部 (1976) 草津白根山 1976年活動とその前後の水質・ガス成分の変化. 火山噴火予知連絡会会報, 7, 11-19.
- 津屋弘達 (1933) 昭和7年10月草津白根山爆発に就いて. 地震 2, 5, 71-97.
- 宇井忠英・吉本充宏・古川竜太・石塚吉浩・吉田真理夫・宮地直道・勝井義雄・紀藤典夫・雁沢好博・野上健治 (1997) 北海道駒ヶ岳 1996年3月の噴火. 火山, 42, 141-151.
- Yamada, T. (1963) Report of the 1962 Activity of Yakedake Volcano, Central Japan. *Jour. Faculty of Liberal Arts and Science, Shinshu University*, 12, part II, 47-68.
- 山本敬 (1960) 雲仙火山地域熔岩の化学的研究. 火山, 5, 69-74.

### Photograph Captions

Photo. 2. a: Fissures formed by the eruption of Mt. Shinmoedake in 1959 (taken by Dr. Shiro Hiraga). b: The explosion crater newly opened by the eruption of Mt. Shinmoedake in 1959 (taken by Dr. Shiro Hiraga). c: Arc-type fissures formed by the eruption of Mt. Yakedake in 1962. d: Clayey volcanic ash ejected by the eruption of Mt. Yakedake in 1962. e: The eruption of Mt. Asama in 1973. f: Fallout around Karuizawa, Nagano Prefecture by the eruption of Mt. Asama in 1973. g: The eruption of Mt. Kusatsu-Shirane occurred at Mizugama crater in 1976. h: Piling of ejecta on snow by the eruption of Mt. Kusatsu-Shirane in 1976.

写真2 a: 新燃岳 1959年の噴火で生じた割れ目 (平賀士郎氏撮影). b: 新燃岳 1959年の噴火で生じた爆裂火口 (平賀士郎氏撮影). c: 焼岳 1962年の噴火で生じた裂弧状の割れ目. d: 焼岳 1962年の噴火で抛出された粘土質の火山灰. e: 浅間山 1973年の噴火. f: 浅間山 1973年噴火における中軽井沢付近の降灰状況. g: 草津白根山 1976年の噴火 (水釜火口). h: 草津白根山 1976年の噴火における抛出物の積雪上への堆積状況.

Photo. 3. a: Ash cloud ascending from Mt. Usu by the eruption in 1977. b: Clay flow spewed from the bottom of the summit caldera of Mt. Usu (taken in Aug., 1977). c: The eruption of Mt. Kiso-Ontake in 1979. d: New craters of Mt. Kiso-Ontake opened at the summit (taken in June, 1982). e: The eruption of Mt. Tokachidake in 1989. f: Pyroclastic flow deposit of Mt. Tokachidake in 1989. g: Inside of Kujukushima crater of Mt. Unzendake at the early stage of the eruption in 1990 (take by Dr. Nogami on Nov. 18, 1990). h: The first lava dome appeared at Jigokuato crater of Mt. Unzendake (taken on May 21, 1991).

写真3 a: 有珠山 1977年の噴火. b: 有珠山山頂カルデラ底に流出した粘土流 (1977年8月撮影). c: 木曾御岳山 1979年の噴火. d: 木曾御岳山山頂に生じた新火口の 1982年6月頃の状況. e: 十勝岳 1989年の噴火. f: 十勝岳 1989年の噴火で発生した火砕流堆積物. g: 雲仙岳 1990年噴火直後の九十九島火口内部の状況 (1990年11月18日野上健治氏撮影). h: 雲仙岳地獄跡火口に出現した溶岩ドーム.



Photo. 2.



Photo. 3.