

有珠山 2000 年 3 月 31 日噴火の推移

国方 まり・大野 希一・本松 史年

Eruptive Sequence of Phreatomagmatic and Phreatic Explosions Occurred on March 31, 2000, in the Usu Volcano

Mari KUNIKATA, Marekazu OHNO and Fumitoshi MOTOMATSU

(Received September 30, 2002)

We constructed the sequence of the eruption on March 31, 2000, the Usu volcano using video and photograph images taken by mass media and research organizations. Takada *et al.* (2001) divided the Usu 2000 eruption into four stages, and March 31 eruption is called the stage 1. On the basis of the characteristics of the column height and eruption style, this eruption can be divided into four sub stages as follows; the stage 1-1 (13:07 to 13:27): Eruption column rose intermittently to 1000m in altitude. The stage 1-2 (13:28 to 14:51): The climactic eruption phase. Column always rose above 1500m, and at 14:00, reached 3500m, which is the maximum height in this eruption. The stage 1-3 (14:52 to 15:39): The eruption calm down and only white ash plume rose to about few 100m in altitude. The stage 1-4 (15:40 to 17:26): Eruptive cycle that extrusion of cock's tail jets and then emission of white vapor plume was observed. From the analyses of video and photograph images, it was observed that, in the stage 1-1 and 1-2, pyroclastic surge occurred at least 7 times by collapsing of a part of eruption cloud rising up vertically. There are north distribution deposits at the ranges that surges passed, and they are recognized 4 lithic (pumice) layers ($S_1 \sim S_4$) which developed bedding structure. Judging from the occurrences of the pyroclastic deposit around proximal area and video images that surge occurred after several minutes since eruption column was generated, S_1 was formed 13:28-13:39, S_2 was 13:48-13:58, S_3 was 14:01-14:15, and S_4 was 14:27-14:51, respectively.

Keywords: The Usu 2000 eruption, Phreato magmatic explosion, Eruptive sequence, Pyroclastic surge

はじめに

マグマ水蒸気爆発に伴う噴煙の種類や到達高度の時間変化を記載し解析することは、その噴火メカニズムを解明する上できわめて重要である。一方、小規模なマグマ水蒸気爆発や水蒸気爆発に由来する堆積物はその分布域がせまいため、それらの堆積物と噴火の推移とを正確に対応させるためには、火口近傍堆積物の詳しい調査研究が不可欠である。このようにして、噴火の推移と火口近傍堆積物との対応関係を明確にでき

ば、過去の類似した堆積物から、それをもたらした噴火の推移や噴火メカニズムを詳細に明らかにできる可能性が生まれてくる。

有珠山は2000年3月31日13時07分に、有珠山西麓に位置する西山(320m)の西山麓で噴火した(Fig.1, 2)。火口は当初複数個開き、それらはN1, N2, N3火口として残った(Fig.2; 宇井・他, 2002a)。3月31日の噴火は、有珠山2000-2001年噴火の中で最大規模であり(大野・他, 2002; 宝田・他, 2002)、噴煙は最盛期には高度3000m以上に達した(川辺, 2000)ほ

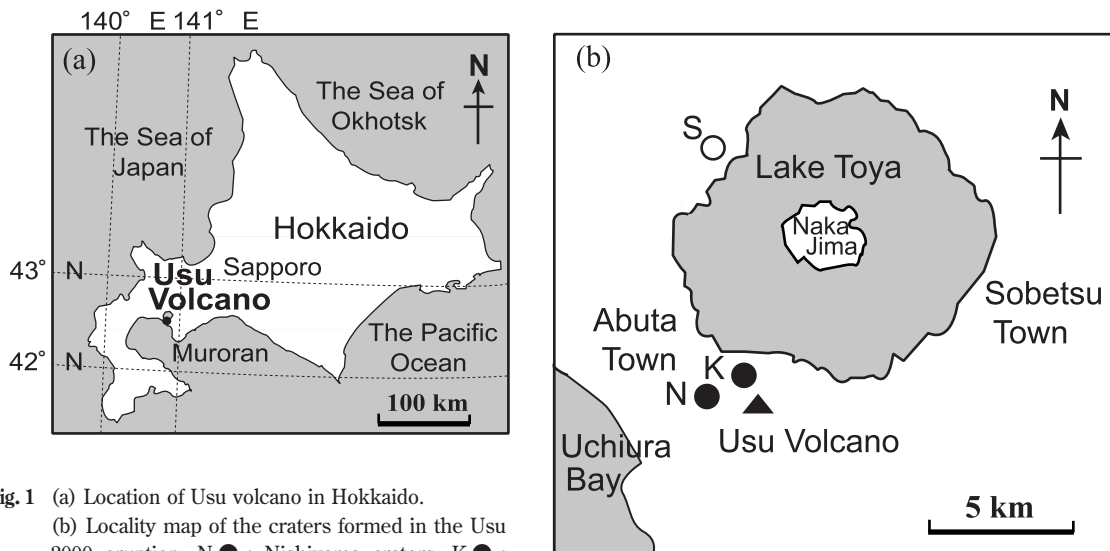


Fig. 1 (a) Location of Usu volcano in Hokkaido. (b) Locality map of the craters formed in the Usu 2000 eruption. N ● : Nishiyama craters, K ● : Kompirayama craters, and S ○: Sairo observation point.

か、火砕サージも発生した(宇井・他, 2002b)。4月1日には有珠山北西麓に位置する金比羅山 (Fig. 1, 2; 297m) の北西山腹にも火口が開き(東宮, 2001), 2つの火口群に分かれて噴火が継続した。4月8日以降は金比羅火口群の火山活動も低調となった(稲葉・他, 2000; 宇井・他, 2002a; 中田, 2001)。

有珠山 2000 年噴火はマグマ水蒸気爆発および水蒸気爆発であったことが明らかにされており(東宮・他, 2001), 本質マグマ物質の含有量から, 両タイプの噴火がどのように推移したかという事(例えば, 中川・他, 2002)や, また堆積物の粒径分布からどのような堆積メカニズムであったのかということが議論されている(長井・他, 2002)。しかし, 3月31日のマグマ水蒸気噴火に関しては, 映像から火砕サージが発生したことは明らかにされているもの(例えば, 遠藤・他, 2001; 宇井・他, 2002b), 遠望観測による噴火推移記載が主であるため, 火砕サージの発生時間や発生回数の詳細は明らかになっていない。本稿では, 有珠山 2000-2001 年噴火の中で最大規模である3月31日の噴火をとりあげ, 遠望観測データ(風早・他, 2001)に火口近傍域の空撮データ(北海道開発局ヘリ空撮映像)を加え, 大野・他(2002)では紙面の都合で掲載できなかった火砕サージの発生実態を含む詳細な噴火の推移を明らかにし, 噴火推移と堆積物の対応関係を

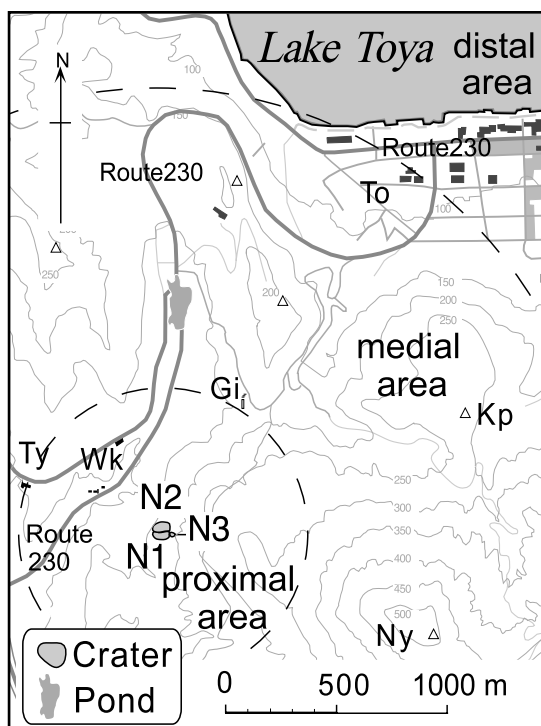


Fig. 2 Topographical map of the area of about less than 3km distance from the craters formed in the Usu 2000 eruption. Ny: Nishiyama, Kp: Kompirayama, To: Toyako Onsencyo town, Gi: Garbage incinerating facilities, Wk: Wakasaimo cake factory, Ty: Toyako Kindergarten.

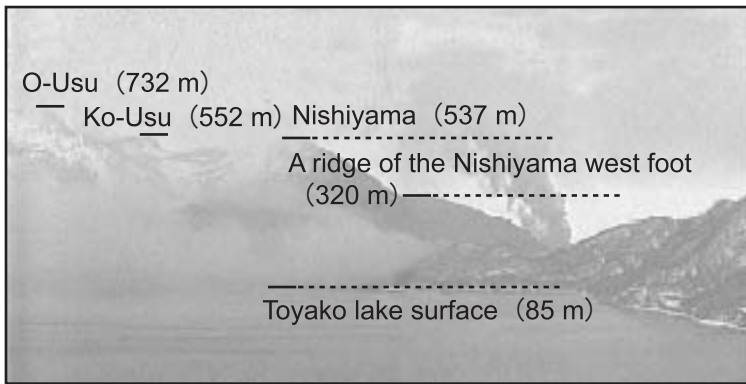


Fig. 3 A measurement method of column height. The column heights were estimated from video and photographic images taken by the Sairo observation point (Fig. 1b). In order to estimate the height of eruption clouds, five standard points were used; O-Usu: 732m, Ko-Usu: 552m, Nishiyama: 537m, a ridge of the Nishiyama west foot: 320m, and Toyako lake surface: 85m.

一致させることを試みる。本稿では特に、大野・他 (2002) で触れられていない火砕サージ堆積物と降下火砕堆積物の関係について議論する。なお、有珠山 2000 年噴火のうち、2000 年 4 月 1 日から 4 月 7 日までの推移は本松・他 (2003) で記載・議論を行う。

2. 手法

総合観測班地質グループ・工業技術院地質調査所 (現 産業技術総合研究所地質調査総合センター)・工業技術院地質調査所北海道支所 (現 産業技術総合研究所北海道地質調査連携研究所) および北海道立地質研究所は、噴火開始の前から、有珠山より 8km 北方のサイロ展望台 (Fig. 1b) においてビデオカメラによる連続撮影を行っていた。高田・他 (2001) は有珠山 2000 年噴火の推移を、噴煙のプリュームの到達高度及びその形状の特徴から以下の 4 つのステージに分けた；ステージ 1 (2000 年 3 月 31 日噴火)、ステージ 2 (同年 4 月 1 日から 4 月 7 日)、ステージ 3 (同年 4 月 8 日から 4 月 10 日) そしてステージ 4 (同年 4 月 11 日以降)。これらの各ステージのうち、本論では、特にステージ 1 に着目し、主にサイロ展望台から撮影されたこの噴火の遠望観測資料 (風早・他, 2001) に NHK や民放各社の放送局が撮影・放送した映像記録、北海道開発局が噴火当時にヘリコプターから撮影した空撮映像などを加え、独自に噴煙の到達高度や形状の経時変化をとりまとめた (Table 1)。

噴煙の到達高度は、大有珠 (標高 732m)、小有珠 (552m)、西山 (537m)、西山西麓の尾根 (320m)、及び洞爺湖湖面 (85m) を基準高度として映像から比較・測定した (Fig. 3)。本稿で述べる噴煙の上昇高度

は、風送され水平方向にたなびくプリュームの中央部の高度と定義した。噴煙の形態は廣瀬・他 (2002) の分類を改編し、以下の 4 種類に分類した。これらに加えて以下に示す噴煙形態 (プリュームやコックステールジェット) の前にその色 (黒, 灰黒, 灰, 灰白, 白) をつけ加えて表現した。

- A) 火山灰プリューム：火山灰成分に富み、カリフラワー状の形態を示し、垂直に上昇する濃密な噴煙。
- B) 水蒸気プリューム：そのほとんどが白色の水蒸気からなる噴煙。
- C) (白色) 水蒸気噴煙：噴煙の到達高度の低く (100m 以下)、ほとんど上昇せず風に流され、地表付近を漂う希薄な噴煙。主に白色の水蒸気からなる。
- D) サージ状噴煙：ほぼ垂直に上昇する火山灰プリュームが部分的に崩壊し、側方に突出・流下する上昇高度の低い希薄な噴煙。
- E) コックステールジェット：指向性をもって上方に突出する火山灰と蒸気が入り混じった噴煙で、鶏の尾のような形状を呈する。

3. 3 月 31 日噴火 (ステージ 1) の推移

ステージ 1 の噴火は、活動の消長や噴煙の到達高度および形態の違いから、以下の 4 つのステージに分けることができる；ステージ 1-1 (噴火開始期: 13 時 07 分-13 時 27 分)、ステージ 1-2 (噴火最盛期: 13 時 28 分-14 時 51 分)、ステージ 1-3 (静穏期: 14 時 52 分-15 時 39 分)、そしてステージ 1-4 (コックステールジェット期: 15 時 40 分-17 時 26 分)。

Table 1 Eruptive sequence on March 31, 2000 at Usu volcano

ステージ	時刻	観察者	現象	噴煙の方向	噴煙上昇高度
1-1	13:07	風早・他(2001)	噴火開始。当初は灰黒色火山灰ブリュームが上昇し、数分後には灰白色水蒸気ブリュームが上昇。	NE	300m
	13:12	廣瀬・他(2002)	灰黒色ブリュームの基部に北及び北西に流下する灰白色サージ状噴煙がみられる。	NE,N,NW	400m
	13:14	風早・他(2001)	灰黒色ブリュームがほとんど停止し、灰白色ブリュームの活動になる。	NE	>1200m
	13:18	風早・他(2001)	新たな灰黒色ブリュームが上昇。	NE	1600m
	13:19	廣瀬・他(2002)	灰黒色ブリュームの基部に灰白色の北及び北西に流下するサージ状噴煙。	NE,N,NW	
	13:20	地震研映像	灰黒色ブリュームが垂直に900mほど上昇、その後北東に流される。	NE	900m
	13:22	風早・他(2001)	断続的に噴火継続。噴煙は上昇高度の高い灰黒色ブリュームと、上昇高度の低い灰白色ブリュームの2つに分かれるが、この時主なブリュームがほとんど停止し、灰白色ブリュームが顕著に見られる。	NE	
13:25	風早・他(2001)	白色ブリュームのみを放出する穏やかな活動になる。	-		
1-2	13:28	廣瀬・他(2002)	灰黒色ブリュームが上昇し始める。コックスステールジェットと噴石がみえる。	NE	
	13:30	風早・他(2001)	ブリュームが断続的に噴出。上昇高度約2600m。	NE	2600m
	13:31	廣瀬・他(2002)	黒色で速い火山灰ブリュームが噴石を伴いながら上昇。火口から側方へ広がるサージ状の灰色噴煙が見られる。	NE	
	13:35	宝田・他(2002)	ブリュームの上昇高度は1500m黒色ブリュームの基部から低い白色ブリュームが北に向かって上昇する。ブリュームは時折南西方向にも湧き出す。	NE,SW	1500m
	13:39	風早・他(2001)	ブリューム弱まる。13:40に噴出停止、有珠山が見渡せる。	-	
	13:41	風早・他(2001)	黒色ブリュームが再び噴出。時折コックスステールジェットが認められる。黒色ブリュームの基部に側方へ地表に沿って移動するサージ状噴煙が見える。	NE	
	13:48	風早・他(2001)	ブリュームの勢いが激しくなる。	NE	
	13:50	川辺(2000) 廣瀬・他(2002)	灰黒色ブリュームが勢いよく上昇。高度2000m以上に達する。時々火山雷。噴石が南西へ降下する。基部に濃密な灰白色のサージ状噴煙が発生し、風上側にも広がる。	NE	>2000m
	13:58	北海道開発局 ヘリ空撮	ブリュームが停滞するが、1分後再び灰黒色ブリュームが上昇し始める。		
	14:00	室蘭気象台発表	ブリュームの高さ3500mに。このあと噴火は徐々に衰退し、14:16に落ち着く。	NE	3500m
	14:01	北海道開発局 ヘリ空撮	灰黒色ブリュームの基底部に灰白色のサージ状噴煙がみられる。		
	14:05	風早・他(2001)	比較的小規模な灰黒色ブリュームが上昇し始め、以後断続的に噴出が続く。	NE	
	14:16	風早・他(2001)	ブリューム白くなり勢い弱まる。		
	14:18	風早・他(2001)	再び灰黒色ブリュームが上昇開始。	NE	1200m
	14:24	NHK	北東方向に移動する灰黒色ブリューム(上昇高度800m)の基部に、低い灰白色ブリュームが認められる。	NE	
14:25	NHK	再び灰黒色ブリュームが勢いよく上昇。灰白色ブリュームが伴われる。			
14:27	NHK	勢いよく上がる灰黒色ブリュームが高度約500mくらいの所から崩壊し、国道上に落ちる。落ちた噴煙がサージ状噴煙となって、国道上を進む。	NE,N	>1700m	
14:30	NHK	灰黒色ブリュームの一部が崩れ落ち、サージ状噴煙が発生。垂直に上昇する高い灰黒色ブリュームと地表を這って流れる灰白色サージ状噴煙がそれぞれ移動。その後ブリュームの勢いがなくなる。	NE	2100m	
14:36	NHK	再び灰黒色ブリュームがさらに勢いよく上昇し始める。南西にも降灰が確認できる。以後、連続的に噴出が続く。	NE,SW		
14:50	NHK	灰白色ブリュームが北東方向に進行、洞爺湖温泉街を包み込む。	NE	>1200m	
1-3	14:52	NHK	黒色ブリューム止まる。火口には白いブリュームのみ。	-	
	15:02	NHK	ブリュームが切れて、約2時間ぶりに有珠山が姿をあらわす。		
	15:16	NHK	白色ブリューム消長を繰り返す。高さ20mぐらい。		
	15:28	NHK	N1,2,3付近の2箇所から灰黒色ブリュームが上昇。一方は北東方向へ300m上昇し、雲中に隠れる。もう一方は北西側の位置から約100m上昇し、南西方向へ流下。	NE, SW	>300m
	15:34	NHK	火口から白色ブリュームが上昇する静穏な状態へ戻る。15:40まで継続。		
1-4	15:46	風早・他(2001)	灰黒色のコックスステールジェットが突出。その後灰黒色ブリュームが放出。16:02まで断続。	NW→S	
	15:56	風早・他(2001)	有珠山周辺の風向が変化。15:46のイベントに伴う灰色ブリュームは南西方向に向かう。	SW	1600m
	16:02	NHK	白色ブリュームの活動になる。		
	16:23	風早・他(2001)	コックスステールジェットの放出されてから数秒後に白色ブリュームを放出するパターンが繰り返される。	SW	
	16:27	風早・他(2001)	ブリュームが停止する。		
	16:54	NHK	コックスステールジェットが複数回噴出。国道230号線上に火砕物を降下。17:06には上昇高度400mに達するコックスステールジェットが発生。17:08まで連続的にコックスステールジェットの放出後に白色水蒸気噴煙を放出するパターンが繰り返される。	SW	400m
	17:09	NHK	小規模な白色ブリュームの活動になる。		
17:18	NHK	コックスステールジェットが上昇。上昇高度は100m。17:21には落ち着く。	SW	100m	
17:26	NHK	雲底高度地表から約200mの高さに。降雪。2分後に高さ100mほどまで低下。火口がほとんど見えなくなる。	-		

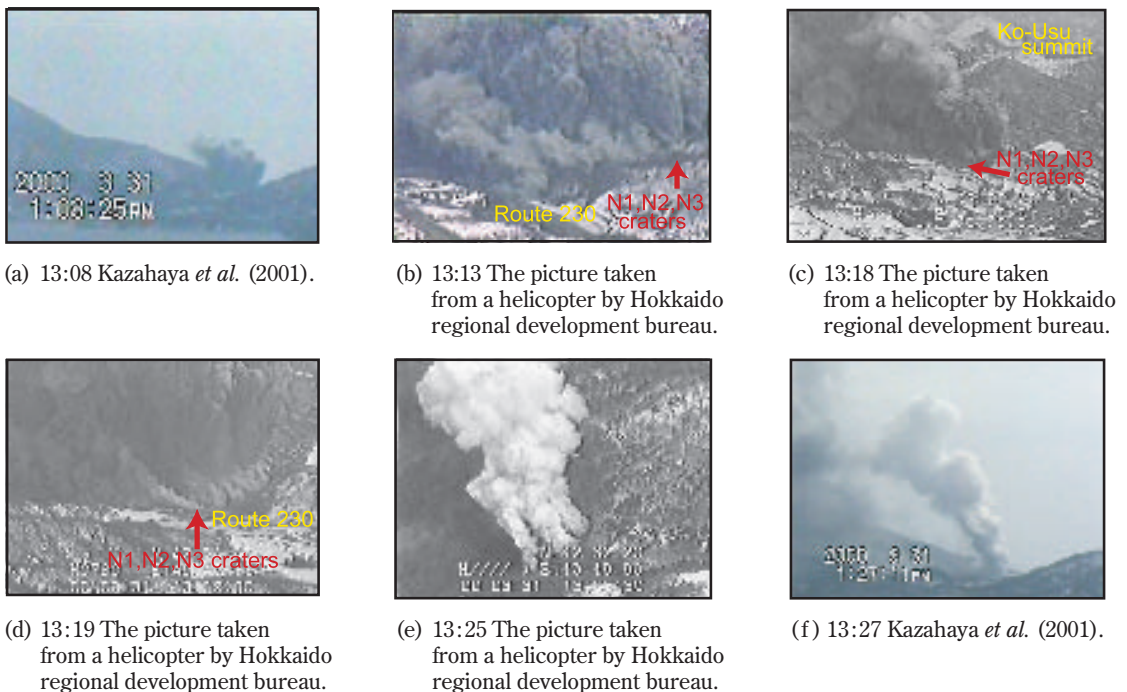


Fig. 4 Pictures of eruption in stage 1-1 (the early phase: 13:07-13:27). Almost pictures taken from Sairo observation point, 8 km north from the Usu volcano. (a)13:08: The column just after an eruption starts. (b)13:13: Pyroclastic surge flows from the base of plume down to the N and NW directions from the craters. (c)13:18: Blackish gray ash plume begins to rise. (d)13:19: Pyroclastic surge flows from the base of plume to the north. (e)13:25: White vapor plume begins to rise. (f)13:27: Eruption calms down, and white vapor plume rises from the craters.

3.1 ステージ1-1(噴火開始期:13時07分-13時27分)

2000年13時07分西山西山麓のN1火口から噴火が開始した(Fig.4a:例えば,風早・他,2001;宇井・他,2002a;宝田・他,2002)。このステージでは、噴煙は当時の卓越風の方向に従い、北東方向に流された。最初の噴火は灰黒色火山灰プルームが高度300mに達し、以後灰黒色火山灰プルームと白色水蒸気プルームが混ざった噴煙が上昇した。13時10分には白色水蒸気プルームの活動が主体となった。13時11分からは灰黒色火山灰プルームが上昇した。その時のプルームは高度400mに達した。13時12分には火山灰プルームの基部に灰白色のサージ状噴煙(大野・他(2002)の横殴り噴煙)がみられた(Fig.4b)。サージ状噴煙はN1, N2, N3火口の北及び北西方向に流下し、主にN1, N2, N3火口の北西側にある国道230号付近(Fig.2)を流れた。13時14分には灰黒色火山灰プルームの噴出はほとんど止まり、同時刻か

ら灰白色水蒸気プルームを高度1200m以上まで上昇させる活動に移行した。13時18分には再び灰黒色火山灰プルームが上昇し、高度1600mに達した(Fig.4c)。13時19分には主な火山灰プルームの基部から北・及び北西方向に灰白色のサージ状噴煙が流下した(Fig.4d)。13時22分には火山灰プルームがほとんど停止し、基部の灰白色水蒸気プルームが火口付近にたちこめた。13時24分から再び灰黒色火山灰プルームが上昇し始めたが、1分後には白色水蒸気プルームを放出する活動になり、噴火はやや落ち着いた(Fig.4e)。その後、13時27分まで白色水蒸気プルームの活動は続いた(Fig.4f)。

3.2 ステージ1-2(噴火最盛期:13時28分-14時51分)

13時28分、勢いのよい灰黒色火山灰プルームが上昇し始めた(Fig.5a)。この火山灰プルームを放出する活動では、コックステールジェットと噴石の放出



(a) 13:28 The picture taken from a helicopter by Hokkaido regional development bureau.



(b) 13:35 Kazahaya *et al.* (2001).



(c) 13:36 Kazahaya *et al.* (2001).



(d) 13:40 Kazahaya *et al.* (2001).



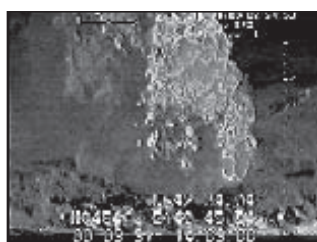
(e) 13:48 Kazahaya *et al.* (2001).



(f) 13:51 The picture taken from a helicopter by Hokkaido regional development bureau.



(g) 14:00 Kazahaya *et al.* (2001).



(h) 14:03 Thermal image taken from a helicopter by Hokkaido regional development bureau.



(i) 14:17 Kazahaya *et al.* (2001).



(j) 14:27 The picture by NHK.



(k) 14:39 Kazahaya *et al.* (2001).

Fig. 5 Pictures of eruption in stage 1-2 (the climactic eruption phase: 13:28-14:51).

(a)13:28: Blackish gray ash plume begins to rise. (b)13:35: The plume with high velocity rises. (c)13:36: The plume ejects to a SW direction. (d)13:40: White vapor plume becomes more dominant, suggesting calmness of the eruption. (e)13:48: Blackish gray ash plume begins to rise with high velocity. (f)13:51: Pyroclastic surge occurs from base of plume. (g)14:00: The climax time of this eruption. The column reaches its maximum height of 3500m. (h)14:03: Pyroclastic surge begins to occur from base of plume. (i)14:17: The plume weakens, and white vapor plume begins to rise. (j)14:27: The plume collapses from its height of 500m, and pyroclastic surge occurs (①). Pyroclastic surge flow on route 230, after that some of them rise (②). (k)14:39: The plume rises with high velocity.



(a) 14:53 The picture by NHK.



(b) 15:28 The picture by NHK.

Fig. 6 Pictures of eruption in stage 1-3 (the calmness phase: 14:52-15:39). (a) 14:53: Only white vapor plume of an height of several 10 meters rises, the eruption became calm. (b) 15:28: Blackish gray ash plume rises from two sites, and spread in NE and SW directions. Broken arrows indicates plume direction.



(a) 15:56 Kazahaya *et al.* (2001).



(b) 15:57 Kazahaya *et al.* (2001).



(c) 16:54 Kazahaya *et al.* (2001).



(d) 16:55 Kazahaya *et al.* (2001).



(e) 17:06 The picture by NHK.

Fig. 7 Pictures of eruption in stage 1-4 (the cock's tail jets phase: 15:40-17:26). (a) and (b) 15:56-15:57: Plume carries away to a N direction from SW direction due to a change of the direction of the wind. A broken arrow indicates plume direction. (c) and (d) 16:54-16:55: cock's tail jets begins to rise (c). After the several seconds, white vapor plume begins to rise (d). (e) 17:06: Cock's tail jet rises height of 500m from the craters. It is the largest event in this sub stage.

が伴われた (廣瀬・他, 2002). プリュームの上昇高度はその 2 分後に約 2600m に達し, N1, N2, N3 火口の北東方向に大量の火山灰を降下させた. 13 時 31 分には激しい噴石を伴う上昇速度の速い黒色火山灰プリュームが立ち上がった (廣瀬・他, 2002). またプリュームの周辺部は上昇しきれずにゆっくり (約 13m/s) 落下した. このプリュームにも側方へ広がる灰色のサージ状噴煙が伴われた (廣瀬・他, 2002). 13 時 35 分には灰黒色火山灰プリュームが上昇高度 1500m に達したほか, 白色水蒸気プリュームが噴出

し, 北に上昇した (Fig. 5b). 同時刻には南西方向に湧き出す灰黒色火山灰プリュームが認められた (Fig. 5c: 宝田・他, 2002). 13 時 39 分にプリュームは弱まり, 1 分後に噴出が停止した (Fig. 5d).

13 時 41 分, 再び灰黒色火山灰プリュームが噴出した. ほぼ垂直に上昇する灰黒色火山灰プリュームの基底部に, サージ状噴煙が認められたほか, コックスステールジェットも発生した. 13 時 48 分にはより勢いの激しい灰黒色火山灰プリュームが上昇し (Fig. 5e), 2 分後に高度 2000m 以上に達した. 時々火山雷が発

生し、噴石が南西方向に降下した(廣瀬・他, 2002)。13時50分には、火山灰プリュームの基部からより濃密な灰白色のサージ状噴煙が発生し、風下側だけでなく、風向きの直行方向にあたる火口の北西方向にも広がった(Fig.5f)。また、この時20m/s前後で濃密な火山灰ジェット(廣瀬・他, 2002)が1~5分おきに垂直~南西に20°程度倒れて立ち上がった。これらの火山灰ジェットは高度数100mで火山灰プリュームへ移行し、北東へ流された(廣瀬・他, 2002)。

13時58分に火山灰プリュームの放出は一度停滞したが、1分後には再び灰黒色火山灰プリュームが上昇し始めた。プリューム高度は14時00分に3500mに達し、噴石は多量に放出され、その後徐々に衰退した(Fig.5g)。14時01分に火山灰プリュームの基部に、より濃密で規模の大きい灰白色のサージ状噴煙がみられた(Fig.5h)。14時05分には比較的小規模な灰黒色火山灰プリュームが上昇し、以後断続的に小規模な噴煙を形成した。14時16分に噴火は一時落ち着き、穏やかな白色水蒸気プリュームを放出する活動になった(Fig.5i)。14時18分には再び灰黒色火山灰プリュームが上昇し始め、高度1200mに達した。14時24分には、北東方向に移動する灰黒色火山灰プリューム(上昇高度800m)の基部に、低い灰白色噴煙が認められた。

14時25分、勢いのよい灰黒色火山灰プリュームが上昇した。14時27分には火山灰プリュームが火口上空約500mから崩れ落ちた。崩れ落ちた噴煙は、灰白色のサージ状噴煙となり、国道230号を17m/sの速度で流下した(Fig.5j)。14時30分、噴煙高度が2100mに達し、北方向に地表を這うように流れる厚さ約100~200m程度の灰白色のサージ状噴煙が認められた。一時、噴煙の勢いは弱くなったが、14時36分には再び灰黒色火山灰プリュームが勢いよく上昇し始めた(Fig.5k)。以後断続的に噴火が続いた。14時52分は灰黒色火山灰プリュームの噴出が停まり、白色水蒸気プリュームを放出する穏やかな活動になった(Fig.6a)。

3.3 ステージ1-3(静穏期:14時52分-15時39分)

14時52分以降、白色水蒸気プリュームの噴出が続いた(Fig.6a)。15時03分には比較的勢いのよい灰白色灰混じりプリュームが上昇し、高度300mほどに達した。プリュームの噴出は7分ほど継続したのち、勢いの弱い白色水蒸気プリュームの上昇に移行した。15

時16分に噴出は停滞した。その後、高度20mぐらいの白色水蒸気噴煙が消長を繰り返しながら噴出した。15時28分はN1, N2, N3火口付近の2箇所から灰黒色火山灰プリュームが上昇した(Fig.6b)。そのうちの1つのプリュームは北東方向へ300mほど上昇した後、雲の中に隠れた。もう1つのやや北西側の位置から上昇したプリュームは100mほど上昇し、南西方向へ流下した(Fig.6b)。1分後、灰黒色火山灰プリュームが南西方向に上昇した。15時34分には火口から白色水蒸気噴煙が上昇する静穏な状態へ戻り、15時39分まで継続した。

3.4 ステージ1-4(コックステールジェット期:15時40分-17時26分)

15時40分からは火口から盛んにコックステールジェットが発生した(宇井・総合観測班グループ, 2000)。15時42分はN1, N2, N3火口付近から高度1100mの灰白色の希薄な噴煙が上昇し、南東方向に流された。15時46分、灰黒色のコックステールジェットが突出し、1分後に灰黒色火山灰プリュームに変化した。16時02分からは白色水蒸気プリュームの活動になった。

15時56分、灰色火山灰プリュームは火口をでて北東方向に流されたが、有珠山周辺の風向がその時に変化したため、南西方向へ流された(Fig.7a, b)。16時07分からは断続的に高さ数100m程度の火山灰プリューム又は白色水蒸気プリュームが南西方向へ流された(廣瀬・他, 2002)。

16時23分からはコックステールジェットの放出後に白色水蒸気プリュームが噴出した。白色水蒸気プリュームは4分間継続した。16時27分にプリュームは停止し、火口には高度10m程度の白色水蒸気噴煙が漂っていた。16時44分には白色水蒸気プリュームが上昇し始め、南西の方向に流された。16時49分には今まで噴出していた火口よりやや東側の斜面から多量の噴石を伴ったコックステールジェットが西へほぼ45°傾いて射出し、高度100~200m程度まで到達した(廣瀬・他, 2002)。その数秒後、白色水蒸気プリュームが噴出し南西方向にたなびいた。以後、16時53分に主なプリュームが停止するまで、断続的にコックステールジェットと白色水蒸気プリュームの噴出が繰り返された。その後は白色水蒸気噴煙が地表付近に漂った。

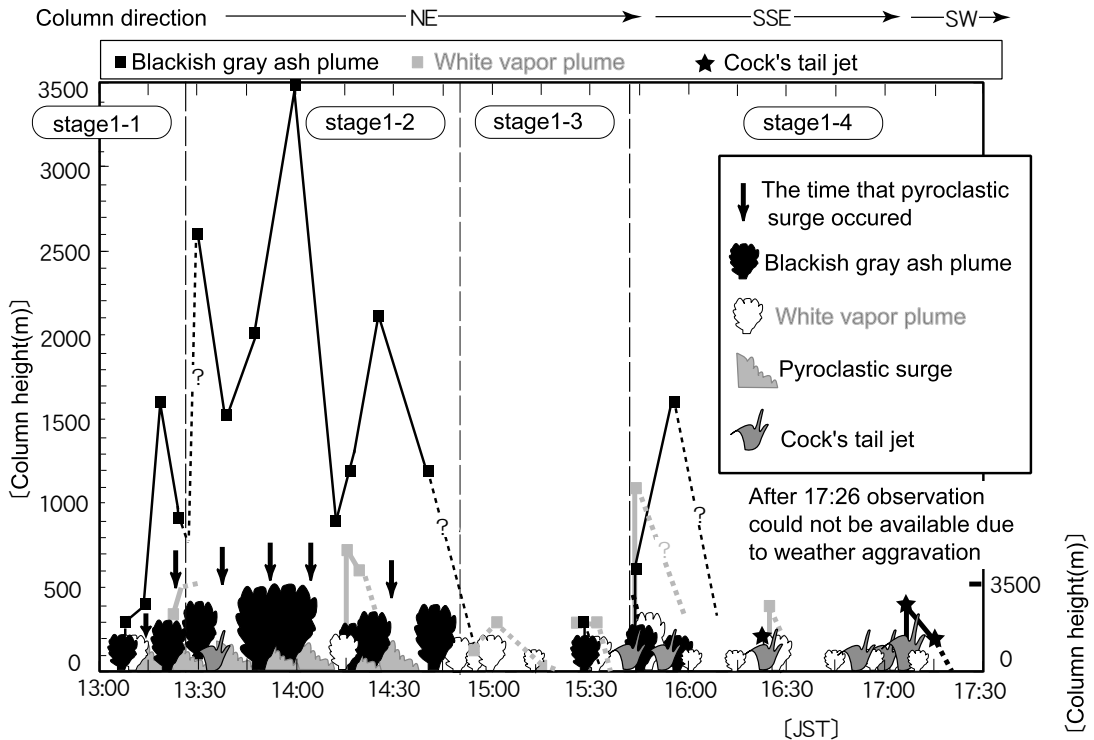


Fig. 8 Temporal variation of eruption column height. A vertical axis expresses column height, and a cross axis expresses time. In this diagram, the schematic illustrations of eruptive phenomena also show.

16時54から55分の間はコックステールジェットが複数回噴出し、N1、N2、N3火口の北西側にある国道230号線上 (Fig. 2) に火砕物を降下させた (Fig. 7c, d)。17時06分にはステージ1-4の中では最も規模の大きいコックステールジェットが、西側へ傾きつつ上昇し、高度400mまで到達した (Fig. 7e)。以後、17時08分まで連続的にコックステールジェットと白色水蒸気噴煙の噴出が繰り返された。17時09分からは白色水蒸気プリュームの活動になった。17時15分には、活動はより穏やかになった。17時18分から再び高度約100mに達するコックステールジェットが発生し始めたが、17時21分には落ち着いた。その後、有珠山周辺では雪が降り始め、17時26分以降には天候が悪化し、高度200m程度であった雲底は、その2分後には100mほどまで低下し、火口がほとんど見えなくなった。これ以降、肉眼による観測が不可能になった。しかし、これ以降4月1日午前2時半頃まで大きな噴火活動は起きなかったと推定されている (宝田・

他, 2002)。

3.5 映像資料からみられる噴火パターン

Fig. 8は3月31日噴火の噴煙高度の時間変化を示した図である。この図から3月31日噴火の各サブステージの特徴は次のようにまとめることができる。ステージ1-1: 高度約1000m前後の灰黒色火山灰プリュームが断続的に噴出した。灰黒色火山灰プリュームが上昇した数分後に火砕サージ状噴煙が発生した。サージ状噴煙は北及び北西方向に流下した。

ステージ1-2: 高度2000m以上に達する規模の大きな噴煙が少なくとも3回発生し、連続的にプリュームが上昇した。噴煙高度は、ステージ1-1では1000m前後であるのに対して、ステージ1-2では13時30分には2600m、14時00分のクライマックスでは3500mと徐々に高くなった。14時00分のクライマックスを過ぎ、14時30分に2100mに達し、以降、噴煙高度は徐々に低下していった。大規模噴煙が上昇する数分

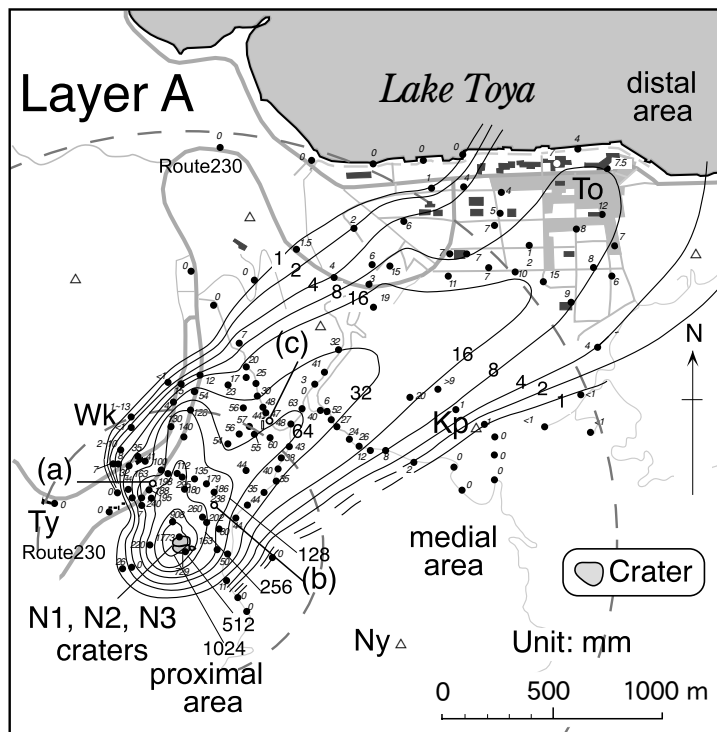


Fig.9 Isopach map of Layer A, which derived from the phreatomagmatic explosions occurred on March 31, the Usu 2000 eruption. The Layer A distributes mainly NE direction from the N1, N2, and N3 craters (Ui *et al.*, 2002), and some minor axes are also observed to N and NW directions. (a), (b), and (c): Locality of the columnar sections shown in Fig.10.

後に、より濃密な火砕サージ状噴煙が発生した。噴火当時の風向が南西方向であったことや約 3m/s の風速であったという観測結果と、サージ状噴煙が 17m/s で北方向に流下したことから、サージ状噴煙は当時の風向とは無関係な方向に独自の速度を持って流れ下ったといえる。

このようなサージ状噴煙の発生は、3月31日噴火全体を通じて少なくとも7回確認された。ステージ1-3：高度 100m 前後の白色水蒸気プルームが断続的に噴出した。ステージ1-4：高度数 100m 前後のコックステールジェットが複数回発生した。コックステールジェットが発生してから、数秒後に白色水蒸気プルームが上昇するというパターンがあるようにみえる。コックステールジェットの噴出継続時間は数秒で終了するが、白色水蒸気プルームの放出は数秒から数分間継続し、コックステールジェットと比べて継続時間が長いという特徴がある。また、コックステール

ジェットの噴煙高度は数 100m 程度であるのに対し、プルームのそれは 1000m 前後に達するものが多く、コックステールジェットより高く上昇する傾向にある。

4. 火口近傍における火砕堆積物の特徴

有珠山 2000 年噴火によってもたらされた火砕堆積物は、西山火口群および金比羅火口群の周辺域において、少なくとも色調や粒径、堆積構造の異なる 19 枚の累層が識別されている (大野・他, 2002)。これらのうち、3月31日の噴火に伴う火山灰層 (Layer A) は、当時の卓越風の方向と一致する北東方向に主な分布軸を示すほか、北及び北西方向にも小規模な分布軸がみられる (Fig.9)。Layer A 中には少なくとも 4 層の軽石層 (A₃, A₅, A₇, A₉) が認められるが、これらは粒径、分布軸、そして噴煙高度などから、噴火最盛期の噴煙高度が 2000m 以上に到達した規模の大きな

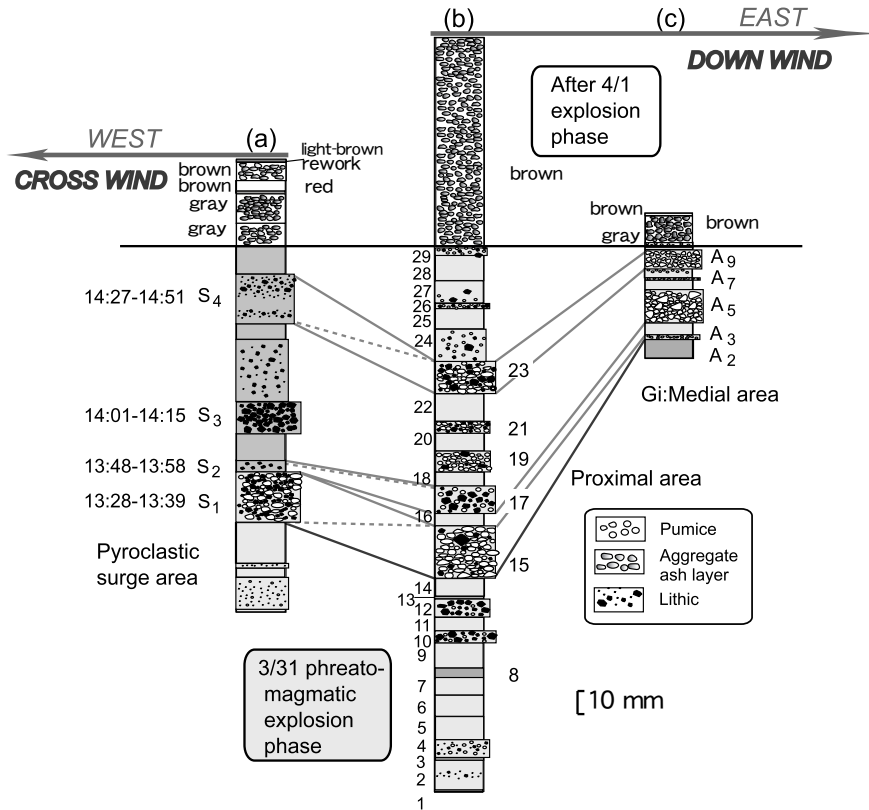


Fig. 10 Typical columnar sections of the deposit in Layer A. (a) 260m NW from N1, N2 and N3 craters. (b) 200m NE from N1, N2 and N3 craters. (c) 650m NE from N1, N2 and N3 craters.

イベントに対応すると考えられている (Fig. 10 (c) : 大野・他, 2002). 大野・他 (2002) では火口近傍の堆積物については火砕サージ堆積物と降下火砕堆積物との識別が困難であるため、給源火口から北東方向へおよそ 500m 以遠の堆積物についてのみ対比を行っているが、本論で新たに加わった詳細な噴火推移をもとに、火口近傍 (給源火口から北東方向へ 200m の地点) の堆積物による噴出時間の特定を試みる。本稿では便宜上、大野・他 (2002) で対比が行われた給源火口からの距離 500m から洞爺湖温泉街のある 2000m の範囲を中間域、それ以遠を遠方域、500m より火口側を火口近傍域とする。

Fig. 10 に北西方向の小規模なロープの範囲に位置する国道 230 号上の堆積物 ((a) : 給源火口から北西方向へ約 260m の地点) の柱状図を示す。ここでは堆積物は成層構造がよく発達しているほか、層界面は波打っており、原地形面に対してマントルベッティン

グしていない。粒径はシルトサイズの細粒火山灰から、直径数 mm 程度の粗粒火山灰までに及ぶ。層厚は約 20cm で Layer A は約 16cm、上位には 4 月 1 日以降の噴火によるものとされる灰色と茶色の凝集火山灰層が厚さ約 3cm みられる。地点 (a) では、Layer A は少なくとも 13 枚のサブユニットに細分でき、下位から約 4cm (5 層) は主に灰色の粘土からシルトサイズの細粒火山灰層と 1mm 以下の少量の軽石も含むが主に岩片からなる岩片層の互層からなる。これらの下位層は粒子が細粒火山灰によるコーティングをうけている。それより上位は、直径数 mm の軽石、岩片からなる粗粒火山灰層と砂からシルトサイズの細粒火山灰層の互層で構成されていて、岩片や軽石が大量に含まれる層は顕著なものは少なくとも 4 層 (下位から S₁, S₂, S₃, S₄) みられる。S₁ は層厚 22mm で径約 2mm の軽石が所々含まれるが、S₂, S₃, S₄ は径約 1, 2mm の石質岩片を多く含む。S₂ は層厚 5mm、中に含まれる岩

片の最大粒径は2mmで細粒粒子を全く含まない。S₃は層厚13mm、中に含まれる岩片の最大粒径は8mmで径2mm程度の岩片からなる。細粒粒子を含まない。S₄は2層の径1mm程度の岩片層からなり、両者は細粒火山灰層によって区切られる。S₄全体の層厚は29mmである。また、S₁の軽石は細粒火山灰でコーティングされているが、S₂、S₃、S₄はほとんどコーティングされていない。

一方、分布主軸である北東方向へおおそ同じ距離の地点 (Fig. 10 (b) : 給源火口から北東方向へ約200mの地点) は、堆積物は層厚約37cmでLayer Aは約24cm、上位に茶色の凝集火山灰層が約13cmみられる。Layer Aは少なくとも29枚のサブユニット (下位から第1~29層) に細分でき、下位から約9cm (計14層) は主に粘土からシルトサイズの細粒火山灰からなり、間に1mm以下の岩片・軽石層 (第4層、第10層、第12層) を含む。第8層は黒みがかった細粒火山灰層からなるという特徴を持つ。

それより上位は15cm (計15層) で、シルトサイズの細粒火山灰層と細レキから粗粒砂サイズの軽石層の互層からなる。顕著な軽石層は少なくとも5層 (第15層、第17層、第19層、第21層、第23層) 確認できる。第15層中の軽石は(a)のS₁層と同様、特徴的に細粒火山灰によってコーティングされていて、径2,3mmの軽石を大量に含む。第15層は層厚23mmで、軽石の最大粒径は15mmである。一方、第17層、第21層、第23層は石質岩片を多く含む。第17層は層厚12mmで径2,3mmの軽石・岩片を含み、あまりコーティングされていない。第19層は層厚11mmで径1mm程度の軽石を含む。第21層は層厚5mmで径1mm以下の軽石・岩片を含む。第23層は層厚14mmで径1mm程度の岩片を多く含む。また、細粒火山灰が乏しくコーティングはあまりされていない。

5. 考察

5.1 火口近傍堆積物との対応関係

北及び北西方向のロープを形成する堆積物 (Fig. 10 (a)) が分布する地域は、側方に移動する火砕サージ状噴煙が通過した地域にあたることから映像から確認できる。また、波打つ層理面や現地地形に対してマントルベッティングしないという堆積産状の特徴や分布地域が噴火当時の風向きに対して直交方向にあたるN1、

N2、N3火口の北西に位置することなどから、火砕サージ堆積物であると考えられる。また、同距離における分布主軸の堆積物 (Fig. 10 (b)) でも火砕サージ堆積物と同一の凝集形態や岩相を示す堆積物が確認できる。これらの層位、層厚、及び軽石が細粒火山灰によってコーティングされているという特徴などからS₁と第15層は対比できる。S₂と第17層、S₄と第23層も同様にして層位、層厚、及び岩相の特徴から対比できる。これらの堆積物の特徴と、映像記録から決定したサージ状噴煙の発生時刻 (Table 1) を総合すると、S₁及び第15層は13時28分~13時39分の噴煙高度2600mに達したイベント、S₂及び第17層とS₃及び第18層から第22層付近までは13時48分~14時15分の噴煙高度3500mに達したイベント、そしてS₄及び第23層は14時27分~14時51分の噴煙高度2100mに達したイベントに相当すると考えられる。

これらの結果を中間地点の焼却場 (Fig. 10 (c)) における火砕物の噴出時間 (大野・他, 2002) も対応させると、第15層はA₃に、第17層はA₅に、第23層はA₉にそれぞれ対比できる。

このように火砕サージ堆積物は風向きに対して直交方向に分布し、火砕サージ状の噴煙から堆積したにもかかわらず、火口近傍の火砕堆積物と非常によく似ている。また、火口近傍の堆積物 (b) に関しては、堆積物の特徴を用いることによって、更に火口近傍域まで堆積物を対比させることができうる。

5.2 噴煙高度や表面現象の時間変化

今回明らかになった噴煙高度の時間変化や表面現象の時間変化はマグマ水蒸気爆発の進化過程を表わし、地下で噴煙高度を変化させるような現象が起こったと考えられる。

噴煙高度は噴火開始から噴火のクライマックスの14時00分にむけて上昇し、クライマックス以降は徐々に減衰していった。このようなことを考慮にいれ、噴火メカニズムを考えると、ステージ1-2までは黒色ブリュームを主に吹き上げており、その後は白色水蒸気ブリュームやコックスタールジェットを主に吹き上げるようになった。このような噴煙形態の変化は、噴火最盛期まではマグマと水の反応が激しく起こりマグマの破片が大量に噴出し、黒色ブリュームとして上昇したのに対し、それ以降は、マグマと水の直接の反応

は起きず熱のみが伝わり、水蒸気からなる白色プリュームとして上昇したために生じたと考えられる。このことは、宝田・他(2002)で噴火の初期に本質マグマ物質の含有量が高く、後期ほど本質マグマ物質の含有量が低くなる事と調和的である。また、噴煙プリュームの高度変化は、噴煙のダイナミクス(Wilson *et al.*, 1978 等)から、大気への熱供給率の変化を反映したものであることから、3月31日噴火の場合、途中に短い休止期間や脈動があるものの、噴火開始直後から熱供給率は増加し、13時30分～14時50分頃の噴火最盛期に最も高くなり、その後は減衰していったと考えられる。

6. 今後の課題

3月31日の噴火は噴煙高度の変化のみでなく、上昇する噴煙の部分崩壊によるサージ状噴煙の発生や、水蒸気を放出するステージの後、コックステールジェットの発生が卓越するといった多様な噴火推移をたどった。このような複雑な推移の原因を追求するためには、噴火推移と火口近傍堆積物の特徴を対応させる事が必要不可欠である。

マグマ水蒸気爆発はマグマと水の相互作用によって発生するが、その爆発の規模や激しさはマグマと水の接触様式によって変化することが予想される。具体的には、爆発の規模は堆積物中の本質マグマ物質含有率として、また激しさは粒径分布や粒子形状の特徴として表現される可能性がある。よって堆積物の下位から上位にかけて、系統的に粒径分布や本質マグマ物質の含有率や形状の特徴を検討する事により、有珠山 2000 年 3 月 31 日噴火の表面現象と、水とマグマの接触様式との関係を検討する事ができるであろう。しかし、現段階ではこのことを実証するデータに乏しいため、今後別の論文で展開する予定である。

7. まとめ

有珠山 2000 年 3 月 31 日の噴火に関してビデオ映像を解析し、噴煙高度の時間変化などから 4 つのステージに分けた。ステージ 1-1：噴火開始期(13時07分-13時27分)高度 1000m 程度の灰黒色火山灰プリュームが断続的に上昇した、ステージ 1-2：噴火最盛期(13時28分-14時51分)高度 2000m を超えるような噴火が少なくとも 3 回発生した。火山灰プリュームの噴出

の数分後にサージ状噴煙が発生し、サージ状噴煙は 3 月 31 日全体で少なくとも 7 回発生した。ステージ 1-3：静穏期(14時52分-15時39分)活動が落ち着き、高度数 100m 程度の白色水蒸気プリュームが発生した、ステージ 1-4:コックステールジェット期(15時40分-17時26分)コックステールジェットが複数回発生した、コックステールジェットの放出後、白色水蒸気プリュームが放出され、そのパターンが繰り返された。

また、火山灰プリュームの噴出の数分後に火砕サージが発生しているというパターンから、層位、層厚の関係と照らしあわせることにより堆積物の噴出時間が明らかになった。

謝辞

地球システム科学科の遠藤邦彦教授には終始ご指導とご助言を賜った。同科の宮地直道助教授には有益な議論をして頂いた。北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センターの岡田 弘教授には現地調査にあたり様々な便宜を図って頂いた。北海道大学大学院理学研究科の宇井忠英教授には噴火当時の有珠山の状況や火砕サージの発生状況などに関して貴重なご意見を頂いた。同センターの西村裕一博士には、現地調査に同行して頂いたほか、噴火当時の有珠山の状況についても貴重な情報を提供して頂いた。同センターの渡辺顕一氏、東京大学地震研究所火山噴火予知研究推進センターの寺田暁彦氏には貴重な噴火映像を提供して頂いた。北海道開発局室蘭開発建設部の皆様にはヘリコプターによる空撮映像の引用を許可して頂いた。室蘭地方気象台には、同気象台所有の有珠山 2000 年噴火の噴煙高度に関する観測データの引用を許可して頂いた。産業技術総合研究所地質調査センターの川辺慎久博士、風早康平博士には同研究所が所有する映像資料を頂いた。産業技術総合研究所地質調査センターの宝田晋治博士、東宮昭彦博士には有益な議論をして頂いた。神戸大学大学院自然科学研究科の上野龍之氏には原稿の不備をご指摘して頂くとともに非常に有益なご助言を頂いた。石井みちる氏には噴火当時の報道映像の記録にご協力頂いた。編集担当者及び査読者である地球システム科学科の高橋正樹教授には原稿の不備を指摘して頂いた上、有益なコメントを頂いた。以上の方々に感謝致します。なお、本研究の一部は文部省平成 14 年度科学研究費補助金(課題番号: 14740294, 研究代表者: 大野希一)を使用した。

参考文献

- 遠藤邦彦・大野希一・国方まり・諸星真帆・鈴木正章・西村祐一・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.
- 風早康平・山元孝広・川辺禎久・宝田晋治・吉本充宏・廣瀬 亘・西 祐司・宮城磯治・宇都浩三 (2001) 有珠山 2000 年 3 月 31 日および 4 月 7 日の噴煙画像, 地質調査総合センター研究資料集, no.370, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 川辺禎久 (2000) 速報: 2000 年 3 月 31 日有珠山噴火. 地質雑, **106**, VII-VIII.
- 廣瀬 亘・田近 淳・遠藤祐司・野呂田 晋・八幡正弘・垣原康之・石丸 聡・宝田晋治・川辺禎久・風早康平・吉本充宏 (2002) 有珠山 2000 年噴火の経過—特に降灰調査, 噴煙遠望観測, 地形変形, 火口分布および亀裂について—. 北海道立地質研究所報告, **73**, 1-50.
- 稲葉千秋・並川和敬・片岡達彦・向山 栄・曾我智彦・鈴木 拓・総合観測班地質グループ (2000) 有珠山 2000 年噴火における火口分布の変遷と基盤の構造. 日本火山学会秋季大会講演予稿集, 181.
- 本松史年・国方まり・大野希一 (2003) 有珠山 2000 年 4 月 1 日から 4 月 10 日の推移. 日本大学自然研究所研究紀要 (印刷中).
- 中川光弘・石塚吉浩・吉本充宏・工藤 崇・相澤幸治・北川淳一・平賀正人・松本亜希子・外狩英紀・高橋良・石井英一・江草匡倫・清野寛子・安間一宮坂瑞穂・和田恵治・新井田清信 (2002) 有珠山 2000 年噴火の噴出物: 構成物とその時間変化. 火山, **47**, 297-288.
- 中田節也 (2001) 有珠山 2000 年噴火の推移. 震研彙報, **76**, 203-214.
- 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・陶野郁雄 (2002) 粒度組成と凝集構造からみた有珠山 2000 年 3 月 31 日噴火の火山灰の特徴. 火山, **47**, 607-617.
- 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 年噴火でもたらされた火砕物の層序. 火山, **47**, 619-643.
- 高田 亮・宝田晋治・山元孝広・松島喜雄・西 祐司・廣瀬 亘・垣原康之・田近 淳・遠藤祐司・野呂田晋・北海道大学 (2001) 有珠山 2000 年噴火の噴煙高度変化速報 (4 月 6 日-13 日). 地質調査研究報告, **52**, 199-206.
- 宝田晋治・星住英夫・宮城磯治・西村裕一・宮縁育夫・三浦大助・川辺禎久 (2002) 有珠山 2000 年噴火の火口近傍堆積物. 火山, **47**, 645-661.
- 東宮昭彦 (2001) 有珠山 2000 年噴火の空撮写真—4 月 1 日に次々と形成された火口群—. 地質調査研究報告, **52**, I-II.
- 東宮昭彦・宮城磯治・星住英夫・山本孝広・川辺禎久・佐藤久夫 (2001) 有珠山 2000 年 3 月 31 日噴火とその本質物. 地質調査研究報告, **52**, 215-229.
- 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. 日本火山学会秋季大会講演予稿集, 23.
- 宇井忠英・中川光弘・稲葉千秋・吉本充宏 (2002a) 有珠山 2000 年噴火の推移. 火山, **47**, 105-117.
- 宇井忠英・池田保夫・小山真人・鎌田桂子・岡田 弘・新井田清信 (2002b) 有珠山 2000 年噴火で発生した火砕サージ. 火山, **47**, 333-337.
- Wilson, L., Sparks, R.S.J., Hung, T.C. and Watkins, N.D. (1978) The control of volcanic column heights by eruption energetics and dynamics. *J. Geophys. Res.*, **83**, 1829-1836.