

## 最近約1万4千年間の摩周火山のテフラ層序と噴火様式

岸本博志\*†・長谷川 健\*・中川光弘\*・和田恵治\*\*

(2008年6月13日受付, 2009年1月13日受理)

Tephrostratigraphy and Eruption Style of Mashu Volcano,  
During the Last 14,000 years, Eastern Hokkaido, Japan

Hiroshi KISHIMOTO\*†, Takeshi HASEGAWA\*, Mitsuhiro NAKAGAWA\* and Keiji WADA\*\*

The eruptive history of Mashu volcano, located at the southeastern rim of Kutcharo caldera in eastern Hokkaido, Japan, has been divided into three stages: stratovolcano building, caldera-forming and central cone building. Tephrostratigraphy and eruption styles of the latter two stages were reinvestigated in conjunction with petrological analysis. We found new evidence of several eruptions from the volcano. These data, combined with recent  $^{14}\text{C}$  ages and the presence of wide-spread tephtras, allow us to evaluate the temporal evolution of eruptive activity and styles of Mashu volcano during the last 14,000 years.

After the formation of the stratovolcano, activity of the caldera forming stage started with plinian eruption (Ma-l) about 14 cal ka. Approximately 7.5 cal ka, climactic caldera-forming activity began with a phreatomagmatic eruption (Ma-j) followed by plinian falls (Ma-i~g), and a catastrophic pyroclastic flow (Ma-f) occurred resulting to the formation of the summit caldera,  $7.5 \times 5.5$  km in diameter. Total volume of the climactic eruption deposit is estimated to be  $18.6 \text{ km}^3$ . Temporal variation of pumice/lithic fragment and white (silicic)/gray (mafic) pumice ratio with eruption sequence suggest withdrawal of a zoned magma chamber with more silicic magma overlying more mafic one through the newly opened and enlarging vent. In the central cone building stage, at least eight eruptions (Ma-e, Ma-e', Ma-d, Ma-c4~-c1 and Ma-b, in ascending order) have occurred repeatedly during the last 6,000 years. The latest eruption (Ma-b: ca. 0.9 cal ka) was the largest one in this stage. Although most of the tephra layers in this stage are composed of pyroclastic fall deposits, thin pyroclastic flow deposits can also be recognized from the two eruptions (Ma-e and -d).

Juvenile materials in the Mashu tephtras are commonly pyroxene dacite ( $\text{SiO}_2 = 64\text{--}72 \text{ wt.}\%$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 0.5\text{--}0.7 \text{ wt.}\%$  in whole-rock compositions). The pumice of the caldera-forming stage are nearly aphyric (1~6 wt.%), whereas those of the central cone building stage are more porphyritic (13~24 wt.%). They can be also distinguished in  $\text{SiO}_2$ -oxides diagrams.

Most of Mashu tephtras consist of gray fine ash layers including blocky lithic/pumice fragments and accretionary lapilli, indicative of magma-water interactions. In the case of large eruptions, such as the climactic caldera-forming eruption (Ma-j~f) and Ma-b, eruptive styles changed from the wet to dry due to increase of the magma/water ratio. The long-term magma discharge rate was 0.8 and  $0.3 \text{ km}^3 \text{ DRE/ky}$  during the last 14,000 and 6,000 years, respectively. Mashu volcano can be interpreted as one of the most productive and active volcanoes in Japan during Holocene.

**Key words:** Mashu volcano, tephrostratigraphy, zoned magma chamber, magma water interaction, active volcano

\* 〒060-0810 札幌市北区北10条西8丁目  
北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門  
Department of Natural History Sciences, Graduate  
School of Science, Hokkaido University, N10 W8,  
Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

\*\* 〒070-8621 旭川市北門町9  
北海道教育大学旭川校地学研究室  
Earth Science Laboratory, Hokkaido University of  
Education at Asahikawa, Hokumon-cho 9, Asahikawa  
070-8621, Japan.

† 現所属: 〒215-0004 神奈川県川崎市麻生区万福寺1-2-2  
アジア航測株式会社防災地質部防災地質課  
Department of Disaster Prevention, Asia Air Survey  
Company with Limited Liability, 2-2, Manpukuji-1,  
Asao-ku, Kawasaki 215-0004, Japan

Corresponding author: Takeshi Hasegawa  
e-mail: hasegawatakeshi@mail.sci.hokudai.ac.jp

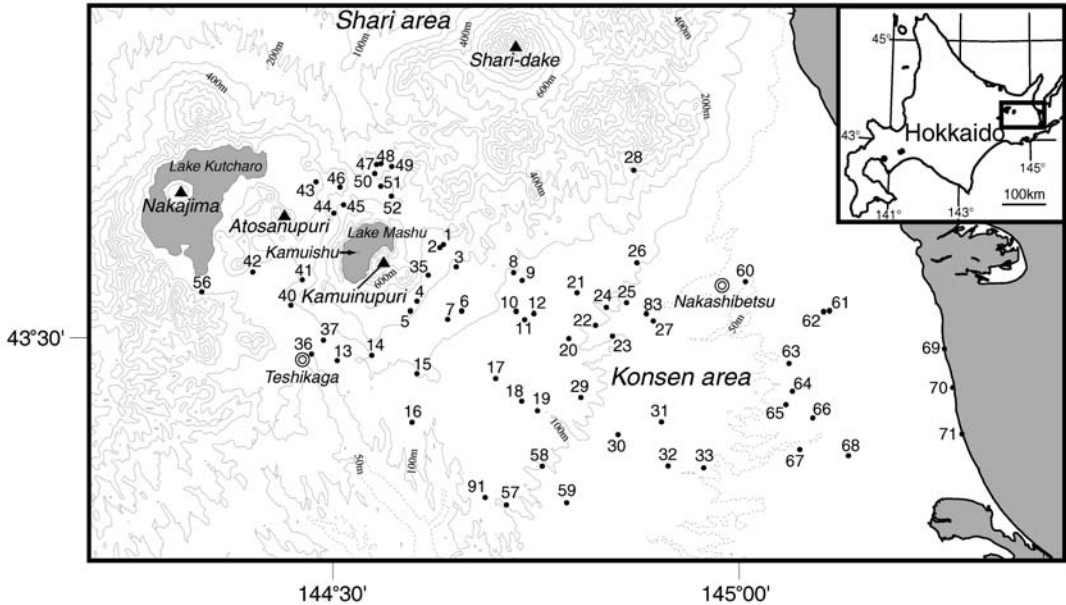


Fig. 1. Index map of the studied area. Points and numbers indicate the localities of columnar sections and samples. Lakes are shown by shaded pattern. Double circles indicate towns. Solid triangles show summits of volcanoes. Contour interval is 100 m (dashed line indicates 50 m contour above sea level). Longitude and latitude (WGS) of type localities are as follows; Loc.1: 43°35'7" N, 144°37'54" W; Loc. 3: 43°33'56" N, 144°38'52" W; Loc. 25: 43°32'00" N, 144°51'26" W; Loc. 46: 43°38'13" N, 144°30'17" W.

## 1. はじめに

摩周火山は北海道東部、阿寒—知床火山列南部の屈斜路火山地域に位置し、屈斜路カルデラ (26×20km) 形成後、アトサヌプリ・中島火山と共に活動を開始した後カルデラ火山である (Fig. 1). 勝井 (1955, 1958, 1961, 1962), Katsui *et al.* (1975) は、山体及び山麓におけるテフラ層序や岩石学的検討から、摩周火山の形成史を明らかにした。これによれば、本火山は約1万7千年前より活動を開始し、その後の大規模な火砕噴火によって摩周カルデラ (7.5×5.5 km) を形成した。カルデラ形成後も主として摩周カルデラ南東部で火砕噴火を繰り返し、最新の噴火は約千年前に発生している。摩周火山では、有史時代における噴火記録はないが、2003年に火山性地震 (最大マグニチュード M 3.8) が多発していることから (気象庁, 2005)、噴火活動の再開が懸念される。しかしながら、勝井らの研究以降、本火山に関する詳細な地質学的及び岩石学的な研究は公表されておらず、特に噴火様式やマグマ系の変遷については未解明の点が多い。

そこで我々は、摩周火山の噴火履歴の再検討と、個々の噴火推移を解明するため、噴火様式が爆発的となったカルデラ形成期以降に注目して地質学的・岩石学的研究を行った。これまで行われていなかった噴出物の構成物

分析や火山ガラスの化学組成分析なども行った。その結果、新たな噴火堆積物を複数認識し、さらに個々の噴火の推移、噴出量、様式などを明らかにした。これらのデータと最新の<sup>14</sup>C年代値を統合して、中長期的噴火予測の上で重要な基礎データとなる時間—累積噴出物量図 (階段図) を作成したので報告する。以下、<sup>14</sup>C年代値を示す場合は、新たに算出した校正暦年代の中央値 (cal ka) を併記する。暦年校正曲線には IntCal04.14 (Reimer, *et al.*, 2004) を、暦年校正プログラムには Calib5.10 (Stuiver *et al.*, 2005) を用いた。

## 2. 地形および先行研究による地質概要

摩周火山は、屈斜路火山南東部に、屈斜路軽石流堆積物 (勝井・佐藤, 1963) を基盤として形成された、基底直径約20 kmの成層火山である (勝井, 1955)。山頂部には摩周カルデラがあり、その南東部にはカムイヌプリ中央火口丘 (標高858 m) が、カルデラ中央にはカムイシュ島溶岩円頂丘が存在する。

Katsui *et al.* (1975) は摩周火山の活動を、成層火山形成期、カルデラ形成期、中央火口丘形成期に区分し、伊藤・他 (2007) は、後者2期のテフラについて、加速器質量分析法 (AMS法) による<sup>14</sup>C年代を報告した (Fig. 2)。

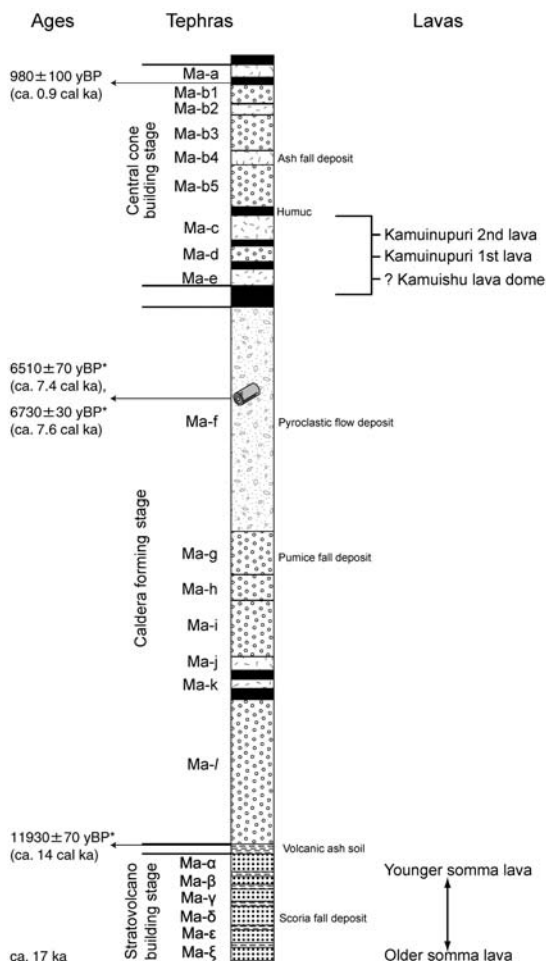


Fig. 2. Schematic column and representative radiocarbon dates of Mashu Tephra and Lavas after Katsui *et al.* (1975, 1986). \*: New radiocarbon dates by Itoh *et al.* (2007).

これらによると、約 1 万 7 千年前の成層火山形成期では主として玄武岩～安山岩質の溶岩・火砕物が噴出し、この時の降下スコリアは上位から  $Ma-\alpha$ ～ $\xi$  とされる。カルデラ形成期ではデイサイト質マグマによる爆発的噴火を繰り返し、この時期のテフラ層は下位から約 12 ka (14 cal ka) の  $Ma-l$ 、約 10 ka (12 cal ka) の  $Ma-k$ 、そして約 6.6 ka (7.5 cal ka) の  $Ma-j$ ～ $f$  である。このうちの  $Ma-j$ ～ $f$  は、間に土壌などを挟まない一連の噴火堆積物である。中でも  $Ma-f$  は最大規模の火砕流であり、本火山周辺を広く覆う。その後の中央火口丘形成期でも、主としてデイサイト質マグマによる火砕噴火が続き、カムイヌプリ中央火口丘が形成された。勝井 (1962) は、この時期のテフラを、下位から  $Ma-e$ ～ $Ma-b$  の 4 層に区分している

が、瀬尾・他 (1963) や佐々木・他 (1971) は、さらに  $Ma-c$  を、土壌を介する 4 回の噴火堆積物に細分した。約 1 ka (0.9 cal ka) に発生した  $Ma-b$  の噴火では、カムイヌプリ中央火口丘の山頂火口 (直径約 1 km) が形成された (Katsui *et al.*, 1975)。

なお、Katsui *et al.* (1975) によると、カムイヌプリ第 1・第 2 溶岩は  $Ma-e$  と  $Ma-b$  の間に噴出したとされ、カムイヌ島溶岩の噴出時期は不明である。また、従来  $Ma-a$  と記載された火山灰は、層厚・分布からみて摩周火山起源ではなく、屈斜路火山西隣の阿寒火山にある雌阿寒岳起源のテフラであることが指摘されている (勝井, 1961)。

### 3. 研究方法

#### 3-1 地質調査の手法

本研究の対象は、Katsui *et al.* (1975) によるカルデラ形成期及び中央火口丘形成期のテフラである。野外調査範囲は摩周火山起源のテフラが数多く分布する摩周カルデラ近辺と根釧地域である。本研究では、まず模式的な露頭でテフラの記載・採取を行い、室内で各テフラ層の岩石学的特徴を明らかにした。そして模式露頭から得た層序や岩相及び岩質に基づき、他の露頭において柱状対比を行った。碎屑物の粒度区分は Wentworth (1922) に従った。本論では、細礫サイズ (4 mm) より大きい多孔質火山礫を‘軽石’、これより細粒なものを火山灰と呼ぶ。降下火砕物の体積は、等層厚線がひとつしか描けない堆積物があることや、火口近傍 (10 km 以内) の層厚分布をほとんど追跡できなかったことから、このような悪条件下でも簡便的に体積を見積ることができる Hayakawa (1985) の経験式を用いた。その際は、露頭地点数が最も多く、比較的信頼性の高い等層厚線を採用した。火砕流堆積物の体積は分布面積に平均層厚を乗じて求めた。なお、摩周火山起源のテフラ (以下、摩周テフラ) の名称は既に長く当地域のテフラ研究において使用されていることから、本研究でもこれらの名称を踏襲する。また本論では、一回の噴火堆積物を‘噴火ユニット’と呼び、ユニットを構成する各噴火フェーズの堆積物をサブユニットと呼ぶ。

#### 3-2 室内実験の手法

本質物質の斑晶量は、洗浄・乾燥させた軽石を乳鉢で粉碎し、水簸によって斑晶鉱物を分離して求めた。火山ガラス組成は北海道大学理学部の SEM-EDS システム (JEOL-JMS-T330+LINK ISIS) で測定した。分析条件は加速電圧 15 kv、ビーム径 5  $\mu$ m、測定時間 180 s、カウントレート 2.0 kcps で、補正計算には ZAF 法を用いた。1 つの噴火ユニットにつき 10 ポイント以上測定した。全岩化学組成分析に際しては、粒径 3 cm 以上の軽石からは 1

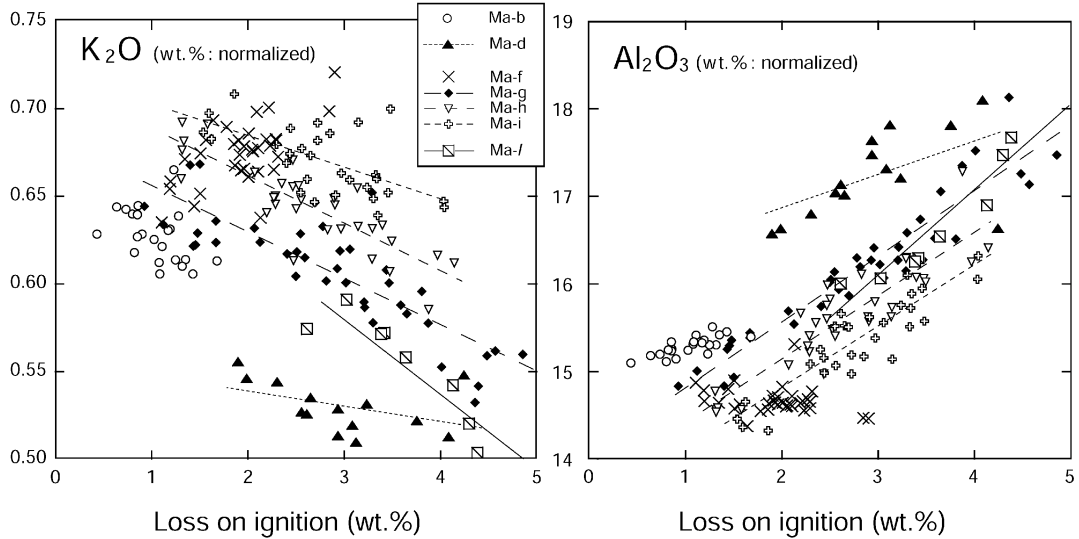


Fig. 3. Correlation diagrams between loss on ignition vs representative oxides ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{K}_2\text{O}$ ). Regression lines are also shown with each unit. Coefficient of determination: ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) Ma-l: 0.88, Ma-i: 0.63, Ma-h: 0.69, Ma-g: 0.78, Ma-d: 0.31; ( $\text{K}_2\text{O}$ ) Ma-l: 0.80, Ma-i: 0.17, Ma-h: 0.55, Ma-g: 0.62, Ma-d: 0.19. The errors ( $2\sigma$ ) are in the range of all plots.

個の粉末試料を作成し、粒径が 5 mm 以上、3 cm 以下の試料については複数個粉碎して 1 つの粉末試料とした。粉末は融剤を用いて 1: 2 に希釈してガラスビードを作成し、北海道大学理学部の XRF (スペクトリス社製 Magix Pro) で測定した。最下位の Ma-l の試料は、最も高い灼熱減量を示し、さらに、灼熱減量に伴う  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ・ $\text{K}_2\text{O}$  の増減量が最も急勾配で、かつその決定係数 (相関係数の二乗) が最大であった (Fig. 3)。したがって Ma-l の試料は、変質の影響が他よりも明らかに大きいと考え、その全岩分析値を本論から除外した。ガラス組成については、鏡下にて新鮮な部分を確認し、そこを選択的に分析した値を示す。

#### 4. テフラの層序・記載

本研究による模式層序を Fig. 4 に示す。各露頭の対比柱状図は Fig. 5 に、識別されたテフラ層の特徴は Table 1 にまとめた。新たな成果として、Ma-e と Ma-d の間に摩周火山起源と考えられる降下火山灰層 (Ma-e') を発見し、またいくつかの既報の降下テフラにおいて、付随する火砕流堆積物を見出し、新たなサブユニット区分を行った。さらにほぼ全ての降下テフラの等層厚線図を作成した。このように本論では、従来認識されなかったユニット区分や詳しい岩相を明示することで、いくつかの層を再定義した。摩周火山周辺では、噴火年代の明らかな広域テフラも報告されており (例えば、徳井, 1989), それ

らと摩周テフラとの関係についても整理した。

なお、摩周テフラに含まれる軽石は様々なタイプが認められる。以下の記載では白色を示す軽石を白色軽石、一様な灰色 (明~暗灰) を呈するものを灰色軽石、いずれかが不均質に混ざり合った軽石を縞状軽石と呼び、単に '軽石' と呼ぶ場合はこれらの総称として用いている。

#### 4-1 カルデラ形成期

カルデラ形成期噴出物について、模式柱状図を Fig. 6 に、降下火砕物の等層厚線を Fig. 7 に示す。Katsui *et al.* (1975) のカルデラ形成期は下位から Ma-l~Ma-f の 7 層が区別され、Ma-l, Ma-k および Ma-j の間にはそれぞれ古土壌層が挟まる。ここで、Ma-j~Ma-f は、1 回の噴火堆積物であることと、総噴出量が Ma-l, k よりも 1 桁以上大きくカルデラ形成に関わった主要な活動と考えられることから、まとめて '摩周火山主カルデラ形成噴火 (または噴出物)' と呼ぶ。

##### 4-1-1 摩周火砕堆積物 I (Ma-l) (勝井 (1962) を再定義)

本層は、弟子屈地域から根釧地域全域の広範囲に分布する降下軽石層を主体とし、その上位に火砕流堆積物を有する。下位の降下テフラを Ma-l2, 上位の火砕流堆積物を Ma-l1 としてサブユニット区分する。本層は多くの露頭で、厚さ数 cm の褐色土壌を介して成層火山形成期 (Katsui *et al.*, 1975) の安山岩質テフラを覆う。Ma-l2 の分布主軸は東南東方向で、Loc. 25 で層厚は 155 cm である。基底には細粒砂サイズで層厚 2~3 cm の灰色火山



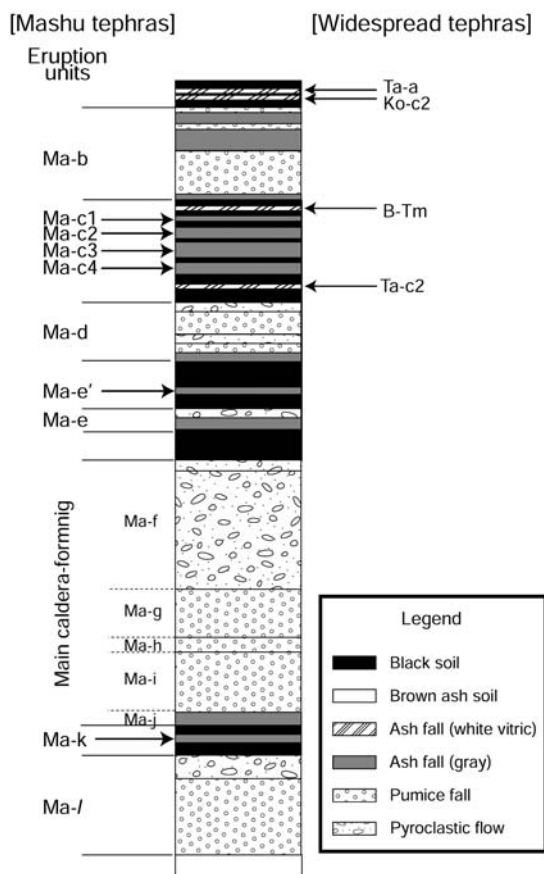


Fig. 4. The schematic tephrostratigraphy above Ma-l in the studied area.

灰がしばしば認められる。また降下軽石からなる主体部の最下部には、層厚約 3 cm で中粒砂サイズの白色火山灰層が、2 層認められる。軽石は全て白色軽石で、平均粒径 2 cm, 最大粒径 8 cm で、上方粗粒化を示す。これらは風化変質を受けており、上部のものほど褐色に変色する。降下軽石層中の石質岩片は、灰色の輝石デイサイトと黒色の安山岩が主体であるが、全体が赤褐色に変質した源岩不明の岩片（以下、同様のものを‘変質岩’と呼ぶ）も少量含まれる。Loc. 18 や 20 では、Ma-l2 の直上に粒径 5 mm 以下の灰色火山灰層 (Ma-l1) が存在する。両者の境界は漸移的であり、土壌層などは存在しない。この火山灰層は石質岩片と遊離結晶および少量の白色軽石を含む。石質岩片は灰色の輝石デイサイト、全体に赤色または白色を帯びる変質岩、新鮮な黒曜岩である。基質支持で淘汰が悪く、軽石・石質岩片が円磨されており、下部には径 1 cm 以下の炭化木片が点在することから、Ma-l1 は火砕流堆積物であると判断できる。Ma-l1 に含ま

れる軽石の斑晶鉱物は斜長石、斜方輝石、単斜輝石、及び不透明鉱物である。Ma-l1 中の遊離結晶は、自形のものが多いが半自形のものもあり、しばしば周縁にはデイサイト質岩片と同質のガラスが認められる。遊離結晶の組み合わせは軽石斑晶のそれと同じである。Ma-l2 の総噴出量は約 6.6 km<sup>3</sup> と見積もられる。

#### 4-1-2 摩周降下火山灰層 k (Ma-k) (勝井 (1962))

本層は、摩周火山南東方約 40 km までの範囲に堆積する粗粒砂サイズの火山灰層で、全体に青灰色を呈する。多くの露頭で、厚さ 15 cm 程度の黒色土壌を挟んで、Ma-l を覆う。Loc. 20 での層厚は 22 cm で、下部は青灰色、上部に向かって灰褐色に漸移する。遠方地域では、黒色土壌中にわずかに灰褐色の火山灰が散在する形で認められる。構成物は石質岩片と遊離結晶で、石質岩片は灰色の輝石デイサイトが主であるが、下部には黒色安山岩および変質岩が、中部には黒曜岩が認められる。灰色のデイサイトは、新鮮なガラス質～半晶質で、鋭利な破面に囲まれる。斑晶は斜長石・輝石・不透明鉱物で、石基はハイアロオフィティック～ハイアロピリティック組織を示す。遊離結晶は自形のものが多いが半自形もあり、しばしば周縁にはデイサイト質岩片と同質のガラスが認められる。その組み合わせは斜長石、斜方輝石、単斜輝石及び不透明鉱物である。本層は極少量の褐色軽石片を含むが、これらは変質を受けていることと、繊維状に良く発泡した特徴から、基盤岩である屈斜路軽石流堆積物に由来するものと考えられる。本層の噴出量は 0.46 km<sup>3</sup> である。

#### 4-1-3 摩周火山主カルデラ形成噴出物 (新称)

本堆積物は、土壌を挟んで Ma-k の上位に位置し、層相から 5 つに区分される (Ma-j～f: 勝井, 1962)。これらの間には、土壌や明瞭な侵食面は存在しない。総噴出量は 18.6 km<sup>3</sup> であり、降下火砕物はすべて南東方向の分布主軸を持つ。

#### 摩周降下火山灰層 j (Ma-j) (勝井 (1962))

Ma-j は摩周火山南東方だけでなく西方にも分布する、粗粒砂～細礫サイズの青灰色降下火山灰層である。層厚 15 cm 程度の黒色土壌を挟んで、Ma-k を覆う。Loc. 20 での層厚は 18 cm で、粒径や色調の変化による 10 層の平行葉理が認識できる (Fig. 8)。下部には粒径 1 mm 前後の火山豆石が認められる。本層は石質岩片、遊離結晶および白色の軽石質火山灰から構成される。軽石質火山灰は本層中部のやや粗粒な部分に極少量認められるのみで、大部分は石質岩片・遊離結晶からなる。軽石質火山灰はスポンジ状で、径 0.5 mm 以上の発泡痕は認められず、全体に発泡が悪い。斑晶が認められる場合があり、その組み合わせは斜長石、斜方輝石、単斜輝石及び不透明鉱物である。石質岩片はフレーク状に破碎されてお

Table 1. Summary of eruptive units. Facies; Pfa: pumice fall deposit, Afa: Ash fall deposit, Pfl: pumice flow deposit, Afl: ash flow deposit. Types of lithic fragments; Gd: gray-colored dacite, Ba: blackish andesite, Al: altered rock, Ob: obsidian. Types of pumice; Wp: white pumice, Bp: banded pumice, Gp: gray pumice. Mineral assemblages of isolated crystals are shown in parentheses\*. Grain-size divisions are those of Wentworth (1922); m. s.: medium sand, c. s.: coarse sand.

Stage	Eruption unit	Type locality	Subunit	Facies	Thickness at type locality	Volume (km <sup>3</sup> )	Grain size (max.)	Types of lithic fragments	Types of pumice	Mineralogy (*=isolated crystals)
Central cone building	Ma-b	46	Ma-b1	Pfa	20 cm	4.6	2 cm	Gd, Al	Wp	Pl + Opx + Cpx + Opq
		46	Ma-b2	Afa	8 cm		m. s.	Gd, Al	Wp	(Pl + Opx + Cpx + Opq)*
		46	Ma-b3	Pfa	10 cm		5 mm	Gd, Al	Wp	Pl + Opx + Cpx + Opq
		1	Ma-b4	Afa	15 cm		m. s.	Gd, Al	Wp	(Pl + Opx + Cpx + Opq)*
		44	Ma-b5	Pfa	2 m		20 cm	Gd, Al	Wp, Bp	Pl + Opx + Cpx + Opq
	47	Ma-b6	Afa	2 cm	?	m. s.	Gd, Al	Wp	(Pl + Opx + Cpx + Opq)*	
	Ma-c1	1	-	Afa	3 cm	0.005	m. s.	Gd, Ba, Al	-	(Pl + Opx + Cpx + Opq)*
	Ma-c2	1	-	Afa	6 cm	0.02	m. s.	Gd, Ba, Al	-	(Pl + Opx + Cpx + Opq)*
	Ma-c3	1	-	Afa	35 cm	0.26	m. s.	Gd, Ba, Al	-	(Pl + Opx + Cpx + Opq)*
	Ma-c4	1	-	Afa	40 cm	0.21	m. s.	Gd, Ba, Al, Ob	-	(Pl + Opx + Cpx + Opq)*
	Ma-d	1	Ma-d0-f/1	Pfl	20 cm	?	8 cm	Ba, Al	Wp	Pl + Opx + Cpx + Opq
			Ma-d0-fa	Pfa	3 cm		1.5 cm	Ba, Al	Wp	Pl + Opx + Cpx + Opq
			Ma-d0-f/2	Pfl	10 cm		1 cm	Ba, Al	Wp	Pl + Opx + Cpx + Opq
			Ma-d1	Pfa	15 cm		4 cm	Ba, Al	Wp	Pl + Opx + Cpx + Opq
			Ma-d2	Afa	13 cm		c. s.	Gd, Al	-	-
Ma-e'	3	-	Afa	5 cm	0.01	1 cm	Gd, Al	Wp	(Pl + Opx + Cpx + Opq)*	
Ma-e	3	Ma-e1	Afl	20 cm	?	1 cm	Gd, Ba, Al, Ob	Wp	(Pl + Opx + Cpx + Opq)*	
		Ma-e2	Afa	10 cm	0.27	c. s.	Gd, Ba, Al	-	-	
		Ma-e3	Afa	10 cm		c. s.	Gd, Ba, Al	-	(Pl + Opx + Cpx + Opq)*	
Caldera forming	Main caldera forming	9	Ma-f	Pfl	>15 m	9.7	20 cm	Ba, Al, Ob	Gp, Bp, Wp	Pl + Opx + Cpx + Opq
		31	Ma-g	Pfa	75 cm		6 cm	Gd, Ba, Al	Gp, Bp	Pl + Opx + Cpx + Opq
		20	Ma-h	Pfa	33 cm		5 cm	Gd, Ba, Al	Gp, Bp, Wp	Pl + Opx + Cpx + Opq
		6	Ma-i	Pfa	120 cm		30 cm	Gd, Ba, Al	Wp	Pl + Opx + Cpx + Opq
		20	Ma-j	Afa	18 cm		c. s.	Gd, Ba, Al	Wp	(Pl + Opx + Cpx + Opq)*
	20	-	Afa	22 cm	0.46	c. s.	Gd, Ba, Al, Ob	-	(Pl + Opx + Cpx + Opq)*	
	Ma-l	18	Ma-1	Afl	15 cm	?	5 mm	Gd, Al, Ob	Wp	(Pl + Opx + Cpx + Opq)*
25		Ma-2	Pfa	155 cm	6.6	8 cm	Gd, Ba, Al	Wp	Pl + Opx + Cpx + Opq	

り、灰色の輝石デイサイト、黒色安山岩、白色～褐色の変質岩が認められ、変質岩は特に上部に多い。灰色のデイサイトはわずかに発泡し、石基はハイアロピリティック組織を示す。遊離結晶は自形が多いが半自形もあり、しばしば周縁にはデイサイト質岩片と同質のガラスが認められる。組み合わせは軽石質火山灰の斑晶と同様である。本層の噴出量は0.7 km<sup>3</sup>である。

#### 摩周降下軽石層 i (Ma-i) {勝井 (1962)}

Ma-i は、降下軽石とその下部に挟在する2～3枚の火山灰層（火山豆石を含む）からなる。全体に白色～褐色であるため、石質岩片に富み灰色を呈する Ma-j との境界は明瞭である。Loc. 6 において層厚は120 cm で、挟在する火山灰・火山豆石層の厚さは下位から2 cm, 10 cm である。降下軽石はスポンジ状の白色軽石からなる。それらは顕著な上方粗粒化を示し、上部では粒径30 cm を越え、内部が赤色酸化した軽石も認められる。石質岩片の種類は下位の Ma-j と同様である。軽石に含まれる斑晶鉱物は斜長石、斜方輝石、単斜輝石、及び不透明鉱物である。噴出量は4.0 km<sup>3</sup>で、主カルデラ形成噴出物の降下火砕物サブユニットの中で最大である。

#### 摩周降下軽石層 h (Ma-h) {勝井 (1962)}

Ma-h は、縞状軽石が卓越し、Ma-i と比べて細粒化する

ことから区別される。Loc. 20 における層厚は33 cm で、上方粗粒化する。縞状軽石（平均粒径1.5 cm）のほかに、白色・灰色軽石を下部でわずかに含む。軽石はスポンジ状で、縞状軽石は Ma-i の白色軽石に比べて、発泡痕が小さく（最大径0.5 mm）発泡が悪い。石質岩片の種類は下位の Ma-i と同様である。軽石に含まれる斑晶鉱物は、軽石のタイプに関わらず斜長石、斜方輝石、単斜輝石、及び不透明鉱物である。噴出量は1.0 km<sup>3</sup>である。

#### 摩周降下軽石層 g (Ma-g) {勝井 (1962)}

Ma-g は、下位の Ma-h よりもやや南側に分布主軸を持つ降下軽石層である。灰色軽石が主体となり、縞状軽石も含まれるが白色軽石は含まれない。石質岩片の種類は下位の Ma-h と同様である。Ma-h と比べて全体に粒径が大きく、この粒径差と色調の違いによって Ma-h と区分されるが、その境界は漸移的である。Loc. 31 での層厚は75 cm で、上方粗粒化する。灰色軽石の平均粒径は2 cm で、Ma-h の縞状軽石よりもさらに発泡が悪い。本層は酸化作用によって赤褐色を呈する場合が多い。軽石に含まれる斑晶鉱物は、軽石の種類によらず斜長石、斜方輝石、単斜輝石、及び不透明鉱物である。噴出量は3.2 km<sup>3</sup>である。

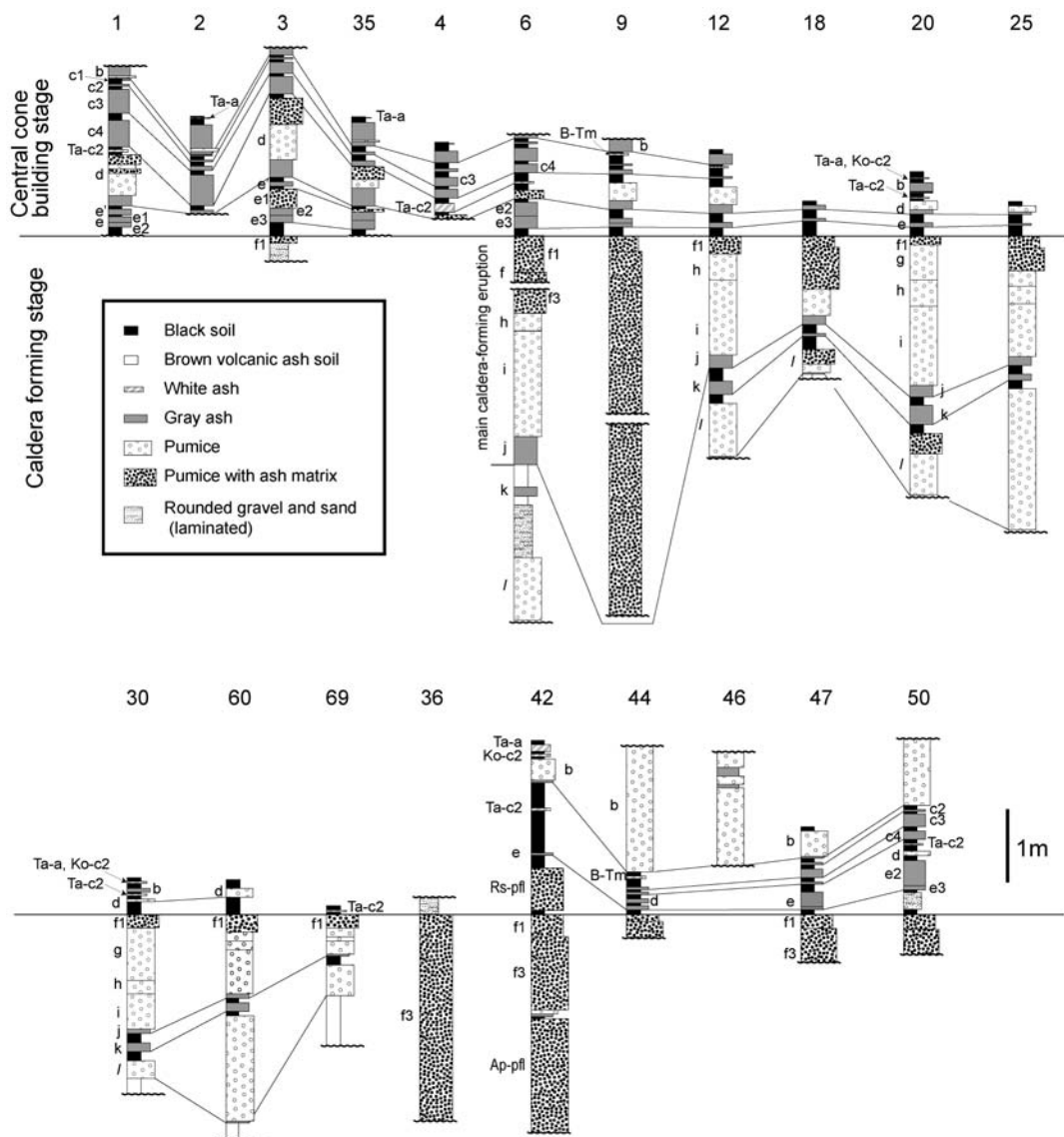


Fig. 5. Selected columnar sections in the studied area. Locality of each section is shown in Fig. 1. Ma-b~Ma-l are abbreviated as “b~l”. Ap-pfl: Atosanupuri pyroclastic flow deposit (Katsui *et al.*, 1986), Rs-pfl: Rishiri pyroclastic flow deposit (Ui *et al.*, 2001).

摩周軽石流堆積物 f (Ma-f) (勝井 (1958))

Ma-f は、Ma-g を覆う非溶結の火砕流堆積物である。下部の粗粒な灰色部と上部の細粒な褐色部に大別できる。石塚・他 (1953) は、前者を Ma-f3、後者を Ma-f1 とし、さらに両者の間にみられる斜交葉理の発達する軽石質砂礫層を Ma-f2 とした。本研究では Ma-f2 を認識できなかったため、ここでは Ma-f3 と Ma-f1 について記載する。

Ma-f3 は、摩周カルデラ周辺の河川流域で谷埋め状に厚く堆積し、斜里岳や屈斜路カルデラ壁などの高所を避

けて分布する。Loc. 9 での層厚は 15 m 以上で、多数の炭化木片を含む。基質部は、粗粒砂サイズの、灰色火山ガラス・石質岩片及び結晶片からなる。軽石の大部分は灰色軽石であるが、明灰色と暗灰色からなる縞状軽石や赤色酸化した白色軽石もわずかに存在する。軽石の平均粒径は 4 cm であるが、粒径 20 cm 大の軽石がしばしば認められる。灰色軽石の発泡は、下位の Ma-g よりも悪い。本層は最大 40% 近い石質岩片を含み、それらは黒色～灰色の輝石安山岩、変質岩および黒曜岩からなる。石質岩片

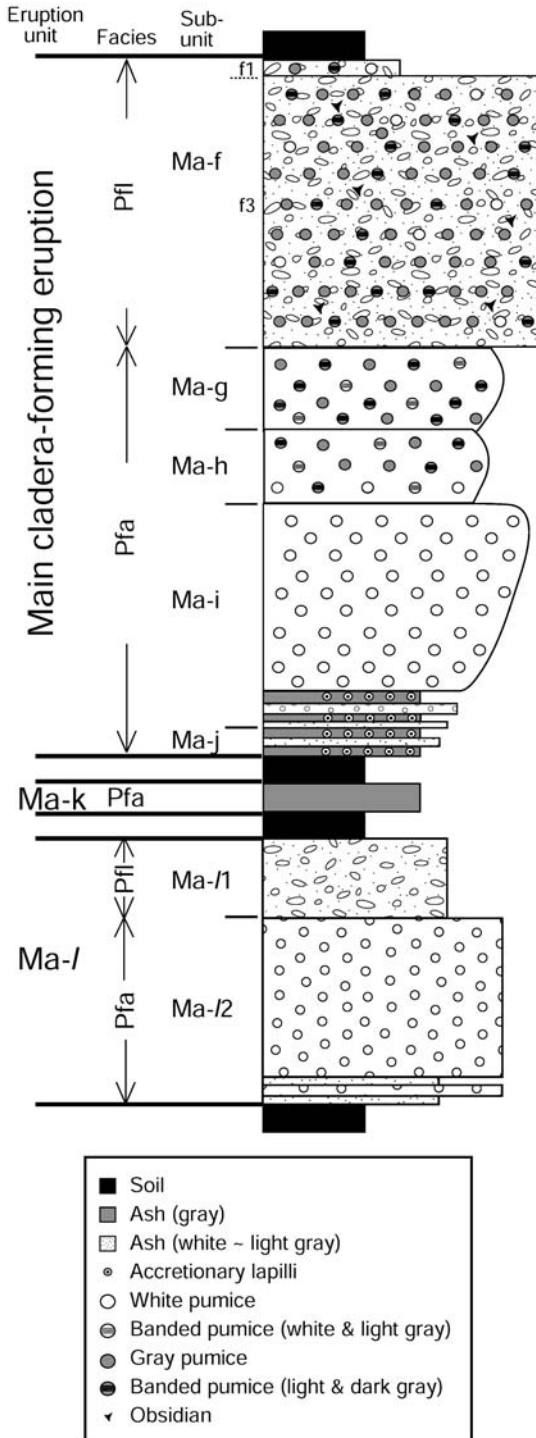


Fig. 6. The schematic column of pyroclastic deposits during the caldera-forming stage. The horizontal extents of beds are proportional to grain size.

の最大粒径は 8 cm で、黒曜岩は最大 1.5 cm である。

Ma-f1 は、東は根釧原野全域、北は斜里地域、西は阿寒火山地域の広範囲に分布する。多くの露頭で Ma-f3 を覆って堆積し、粒径と色調から f3 と区別できるが、両者の間に明瞭な侵食面やフローユニット境界は認められない。高所や遠方の Loc. 3, 69 などでは、Ma-f3 が欠如し、Ma-f1 が Ma-g を直接覆うのが観察できる (Fig. 5)。Ma-f1 は細粒火山灰と軽石からなる淘汰の悪い層で、全体に風化変質を受け褐色を呈する。層厚は、Loc. 9 および Loc. 69 (カルデラからそれぞれ約 15 km と 60 km) で、それぞれ 20 cm および 15 cm であり、Ma-f3 と比べて明らかに層厚変化が小さい。軽石の最大粒径は Loc. 9 で 5 cm, Loc. 69 で 1 cm である。Ma-f3 に比べて軽石・石質岩片に乏しく、極細粒砂サイズのガラス質火山灰に富む。その他の特徴は Ma-f3 と同様である。従来、火砕流堆積物と記載されているが (勝井・他, 1986; など)、隅田 (2003) は軽石混じりの降下火山灰と判断しており、本層の堆積・運搬機構は今後詳しく検討する必要がある。Ma-f の軽石に含まれる斑晶鉱物は、軽石タイプによらず斜長石、斜方輝石、単斜輝石、及び不透明鉱物である。噴出量は勝井・他 (1986) で示されている Ma-f3 と f1 の推定分布面積を用いて、 $9.7 \text{ km}^3$  という値が得られた。

#### 4-1-4 主カルデラ形成噴出物の構成物量比

Ma-j~f の岩相上の違いを定量的に検討するため、構成物のタイプと量比変化を測定した。Loc. 25 において、サブユニットごとに粒径 2.8~22.4 mm の試料を 500~1000 g 採取した (Ma-i, h, g では各単層を上・中・下部に細分)。これらの試料を室内で洗浄・乾燥させ、肉眼観察で軽石と石質岩片とに分け、さらに軽石はタイプごとに分類し、それぞれの量比を重量%で算出した (Fig. 9)。

最下位の Ma-j は大部分 (>98%) が石質岩片からなり、粗粒部に極少量含まれる軽石質火山灰はすべて白色である。Ma-i の軽石は白色軽石のみで、最下部でその量比は 64% である。上部に向かって白色軽石が増加し、石質岩片の量比は逆に減少する。さらに上位の Ma-h では、その下部で白色軽石が 14% と急減し、上部では白色軽石が含まれない。代わりに白色一明灰色の縞状軽石が卓越し、灰色軽石および明灰色一暗灰色の縞状軽石も出現する。石質岩片の量比を見ると、Ma-h では、直下の Ma-i 最上部 (3%) よりもやや多くなり、上部に向かって増加する (6→13%)。次の Ma-g では、下位の Ma-h で卓越した白色一明灰色の縞状軽石が無くなり、灰色軽石が大半を占める。石質岩片の量は直下の Ma-h 最上部よりやや少ない。Ma-f3 では、灰色軽石が 49% と最も多いが、明灰一暗灰色の縞状軽石も比較的多く (12%)、白色軽石も極少量 (2%) 存在する。そして、石質岩片の量は直下の



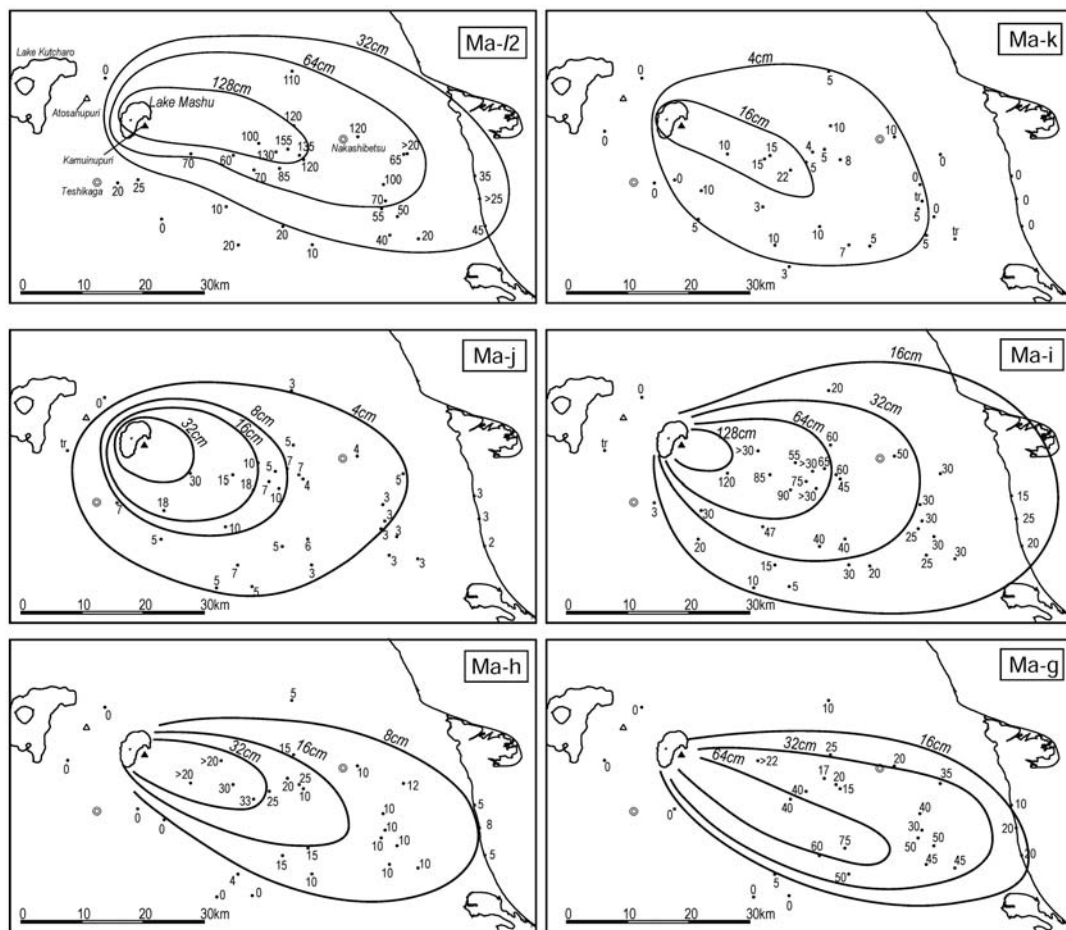


Fig. 7. Isopach maps of pyroclastic fall deposits during the caldera-forming stage. Thickness is centimeters.

Ma-g 最上部に比べて急増する。

#### 4-2 中央火口丘形成期

中央火口丘形成期噴出物について、模式的な露頭の柱状図を Fig. 10 に、各噴火ユニットにおける降下火砕物の等層厚線を Fig. 11 に示す。

##### 4-2-1 摩周火砕堆積物 e (Ma-e) (勝井 (1962) を再定義)

摩周火山周辺約 10~20 km の範囲に分布する、青灰色~灰褐色の粗粒砂サイズの火山灰層である (Fig. 12-a)。下位に約 15 cm の黒色土壌を介して Ma-f を覆う。従来は降下火砕物と認識されてきたが、今回、その上位に火砕流堆積物を認識したことなどから、本層を下位から Ma-e3, e2, e1 の 3 つにサブユニット区分する。

Ma-e3 は、青灰色で粗粒砂サイズの、平行成層する降下火山灰で、火山豆石を含む。層厚はカムイヌプリ中央火口丘南東方の Loc. 3 で 10 cm, 北方の Loc. 50 では 5 cm である。Ma-e2 は無層理な粗粒砂サイズの降下火山灰で、明灰色~灰褐色を呈し、層厚は Loc. 3 と Loc. 50

でそれぞれ 10 cm, 35 cm である。Ma-e3 と e2 の合計層厚の等層厚線は、南東方と北方の 2 つの主軸を持つように見えるが (Fig. 11), これは Ma-e3 の分布主軸が南東に、e2 のそれは北に向いていたためと考えられる。Ma-e1 は層厚 20 cm, 塊状無層理で、基質部分は極細粒砂~粗粒砂サイズの火山灰からなるが、1 cm 大の円磨された白色軽石・石質岩片が散在し、淘汰度が悪い。堆積時に高温であった証拠は得られていないが、基質の火山ガラス・結晶片と含まれる軽石の岩質が一様であることを加味すると、火砕流堆積物である可能性が高い。

Ma-e1 の白色軽石は、径 0.2 mm 程度の斜長石・輝石・不透明鉱物の斑晶を少量含む。Ma-e1~e3 は共通して、灰色の輝石デイサイト、黒色安山岩及び褐色・白色の変質岩を含み、Ma-e1 は特徴的に黒曜岩を含む。デイサイトは新鮮で、Ma-e2 に多い。自形~半自形の遊離結晶も Ma-e1~e3 に共通して認められ、その組み合わせは軽石の斑晶と同様である。Ma-e2, e3 の総噴出量は 0.27 km<sup>3</sup>

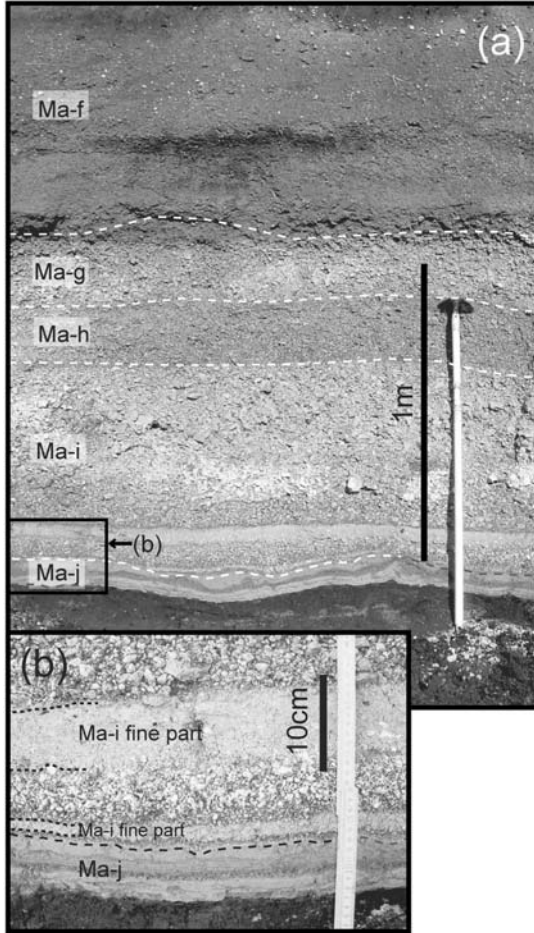


Fig. 8. Field occurrences of eruptive deposits during the main caldera-forming stage. Overview (a), and close-up of Ma-j and the lower part of Ma-i (b) at Loc. 25.

である。

#### 4-2-2 摩周降下火山灰層 e' (Ma-e') (新称)

本層は Loc. 1 及び Loc. 3 において見出された青灰色～灰褐色の火山灰層である (Fig. 12-a, b)。下位に層厚約 3 cm の黒色土壌を挟んで Ma-e を覆い、上位には層厚約 5 cm の黒色土壌を挟んで、後述の Ma-d に覆われる。Loc. 1, Loc. 3 ともに層厚 5 cm で、マントル・ベディングする。淘汰がよく、粗粒砂～細礫サイズの角ばった石質岩片・自形～半自形の遊離結晶を主体とするが、最大径 1 cm の白色軽石も含まれる。軽石は Ma-e1 のそれより斑晶がやや大きく斑晶量も多いが、その他の特徴は同じである。石質岩片はわずかに変質を受けた灰色の輝石デイサイトが大部分を占める。白色・褐色の変質岩も少量含まれる。遊離結晶の組み合わせも Ma-e と同様で

ある。以上の岩相・岩質記載および層序と、後述のガラス組成が他の中央火口丘形成期のテフラと類似することから、本層はカムイヌプリ中央火口丘起源の小規模な噴火により堆積した降下テフラと考えられる。噴出量は 0.01 km<sup>3</sup> 程度と見積もられる。

#### 4-2-3 摩周火砕堆積物 d (Ma-d) (勝井 (1962) を再定義)

本層は、下位に約 5 cm の黒色土壌を介して Ma-e' を覆う火砕堆積物で (Fig. 12-b)、カムイヌプリ中央火口丘南東方に分布軸を持つ。従来、構成物の違いにより、下位から Ma-d2 と -d1 の 2 つのサブユニットに分けられていた (石塚・他, 1953)。今回新たに Ma-d1 の上位に 2 層の火砕流堆積物とこれに挟む降下火山灰を見出した。その結果 Ma-d を、下位から Ma-d2, Ma-d1, Ma-d0-f1/2 (新称), Ma-d0-fa (新称) として Ma-d0-f1 (新称) の、5 つのサブユニットに細分した。Ma-d0-f1/2 及び Ma-d0-fa は Loc. 1 で、Ma-d0-f1 は Loc. 1 及び Loc. 3 で見出される。以下に示す Ma-d の記載は、露頭地点が明示されていない限り Loc. 1 のものである。

Ma-d2 は青灰色～灰褐色を呈する粗粒砂～細礫サイズの降下火山灰で、粒径や色調の異なる平行に成層した数十枚の薄層からなる。層厚は 13 cm で、構成物は大部分が灰色の輝石デイサイトと赤褐色の変質岩である。灰色デイサイトは新鮮なガラス質で、鋭利な破面に囲まれたフレーク状である。含まれる斑晶は、斜長石・輝石および不透明鉱物であり、石基はハイアロオフィティック～ハイアロピリティック組織を示す。また Ma-d2 には火山豆石が少量含まれる。Ma-d1 はやや風化変質して赤褐色を帯びる白色の降下軽石で、層厚は 15 cm、軽石の平均粒径は 2 cm である。上方粗粒化する。黒色の緻密な安山岩片 (最大径約 1 cm) を下部で多く含む。

Ma-d0-f1/2 は、土壌層などを介さず直接 Ma-d1 を覆い、Ma-d1, d2 よりも層厚変化が大きい (2 cm～最大 10 cm 程度に膨縮)。塊状で淘汰が悪く、火山灰基質中に白色軽石が散在する。軽石は円磨を受け、平均粒径は 1 cm である。石質岩片には黒色安山岩と変質岩が多く含まれる。

Ma-d0-fa は、岩相が Ma-d1 に類似するが、より細粒な降下軽石で、層厚は 3 cm。軽石は白色で平均粒径は 5 mm である。Ma-d0-f1 は、Ma-d0-f1/2 に岩相が類似するが、白色軽石はより粗粒 (平均粒径 3 cm) で上方粗粒化する。層厚は 20 cm である。下位の Ma-d0-fa との境界は漸移的である。下部には細粒な石質岩片が濃集する。Ma-d0-f1/2 および f1 が堆積時に高温であった証拠は得られていないが、基質部の火山ガラス・結晶片と含まれる軽石の岩質が一緒であることなどから、火砕流堆積物であると考えられる。本層に含まれる軽石の斑晶は共通して斜長石、斜方輝石、単斜輝石、及び不透明鉱物である。

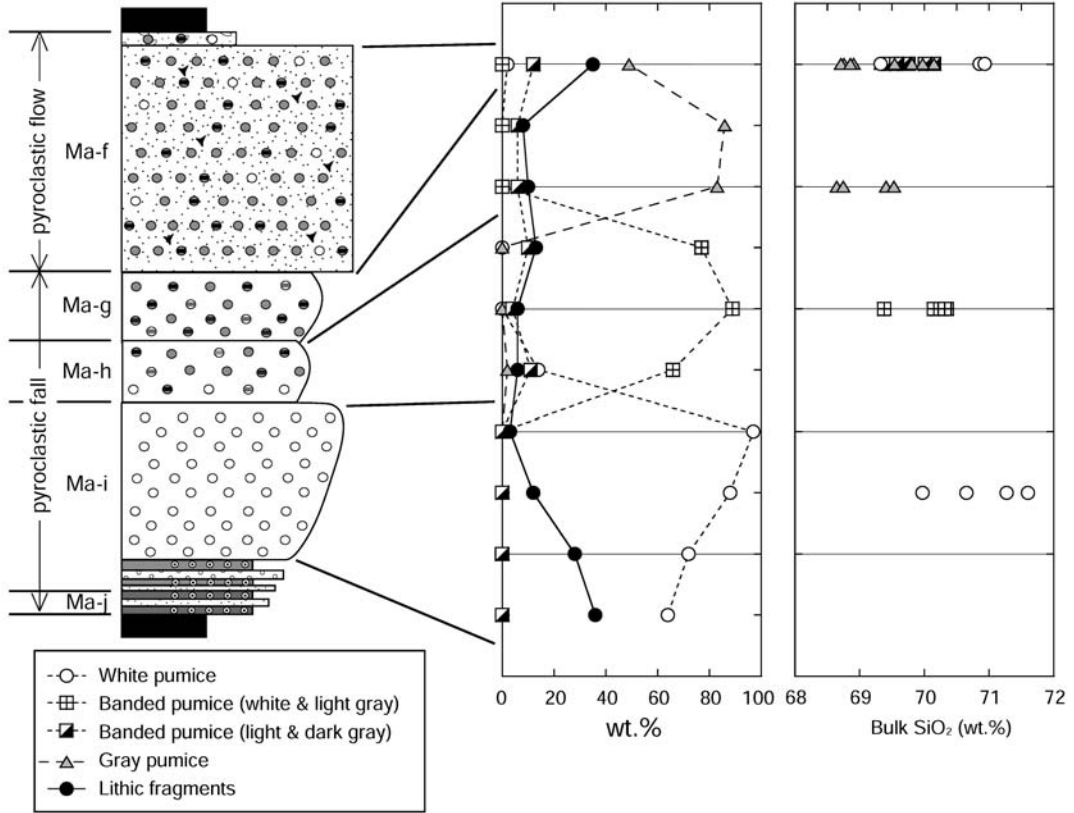


Fig. 9. Stratigraphic variations of rock-type proportions (left), and whole-rock SiO<sub>2</sub> contents for juvenile materials (right) during the caldera-forming stage. The geological column is that of Fig. 5.

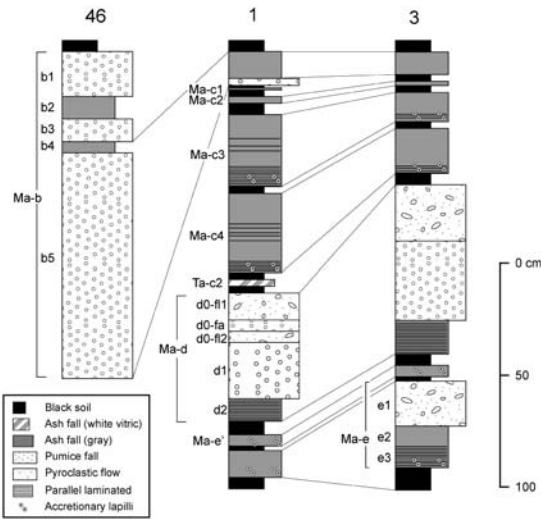


Fig. 10. Detailed information of type localities (Loc. 1, 3 and 46) for eruptive units during the central cone building stage.

Ma-d1, d2 の総噴出量は 0.32 km<sup>3</sup> である。

#### 4-2-4 摩周降下火山灰層 c (Ma-c) (勝井 (1962) を再定義)

Ma-c は、勝井らの研究では、1 層の降下火山灰層として記述されているが、瀬尾・他 (1963) や佐々木・他 (1971) では、4 回の噴火堆積物 (Km-b~Km-e) に細分されている。本研究でも、Ma-d と Ma-b の間に 4 層の降下火山灰層が認められた (Fig. 12-c)。これら 4 層の間には、黒色土壌が介在することから、以下では Ma-c を 4 回の噴火堆積物として記載する (下位から Ma-c4, Ma-c3, Ma-c2, Ma-c1)。いずれも細粒サイズ以下の石質岩片および遊離結晶からなる。Ma-c4~c1 には、共通して灰色のデイサイト質岩片が含まれるが、これらは新鮮なガラス質であり、鋭利な破面に囲まれる。斑晶は、斜長石・輝石および不透明鉍物であり、石基はハイアロオフィティック~ハイアロピリティック組織を示す。また遊離結晶は、自形が多いが半自形もあり、しばしば周縁にはデイサイト質岩片と同質のガラスが認められる。その組み合わせは共通して斜長石、斜方輝石、単斜輝石、

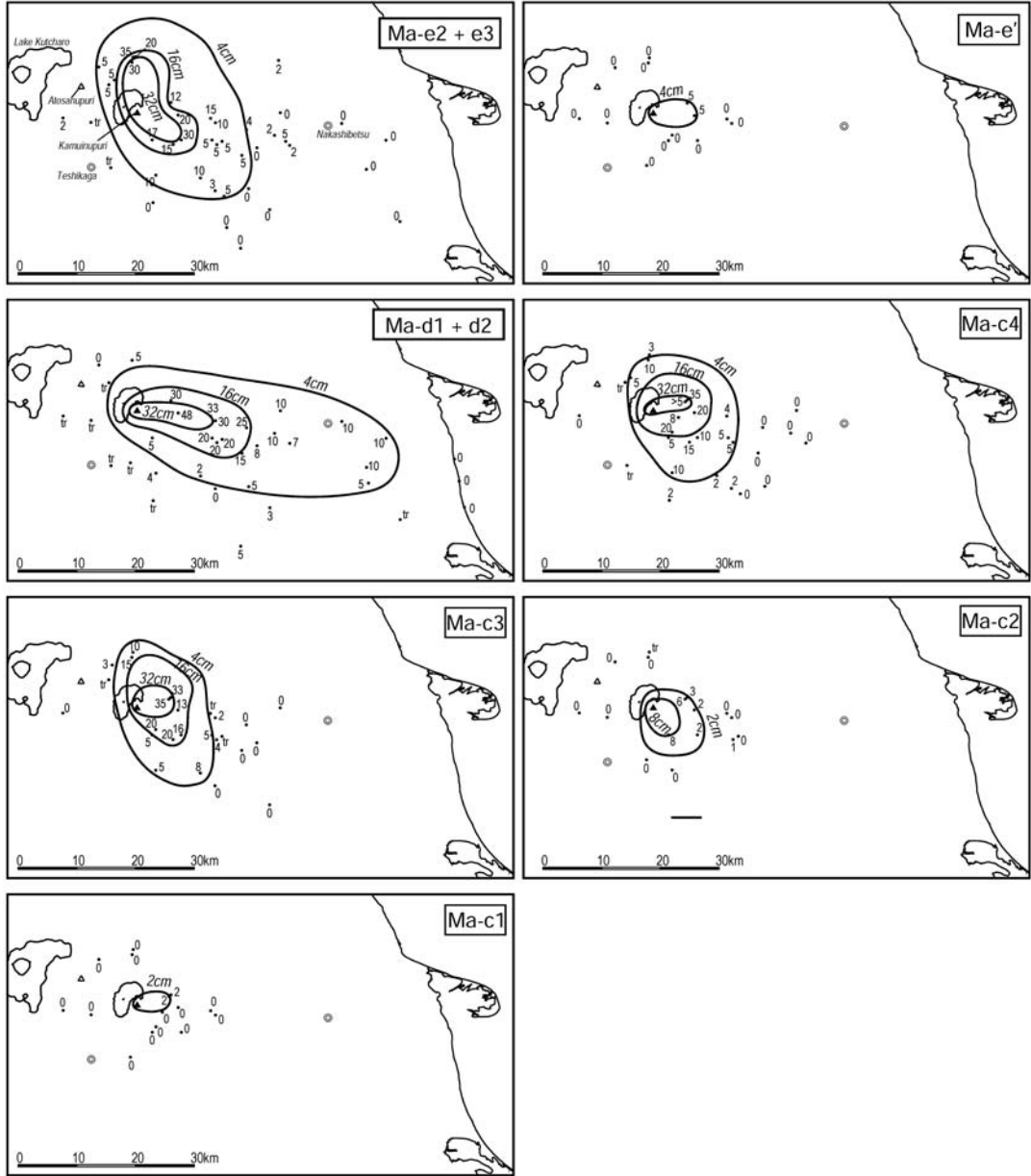


Fig. 11. Isopach maps of pyroclastic fall deposits of the central cone building stage. Thickness is centimeters.

及び不透明鉱物である。

#### 4-2-5 摩周降下火山灰層 c4 (Ma-c4) (瀬尾・他 (1963) および佐々木・他 (1971))

本層はカムイヌプリ周辺約 15 km, 特に南東方に分布する, 青灰色～灰褐色の中粒砂～細礫サイズの降下火山灰層である。下位に層厚およそ 3 cm の黒色土壌を挟んで Ma-d を覆う。Loc. 1 における層厚は 40 cm で, 下部には弱い葉理が認められ火山豆石も含まれる。石質岩片

は多い順に, 灰色の輝石デイサイト, 黒色安山岩, 白色・褐色の変質岩および黒曜岩である。黒色安山岩は下部, 灰色デイサイトは上部に多く認められる。噴出量は 0.21 km<sup>3</sup> である。

#### 4-2-6 摩周降下火山灰層 c3 (Ma-c3) (瀬尾・他 (1963) および佐々木・他 (1971))

本層はカムイヌプリ周辺約 20 km に分布する, 青灰色～暗灰色の中粒砂～極粗粒砂サイズの降下火山灰層であ



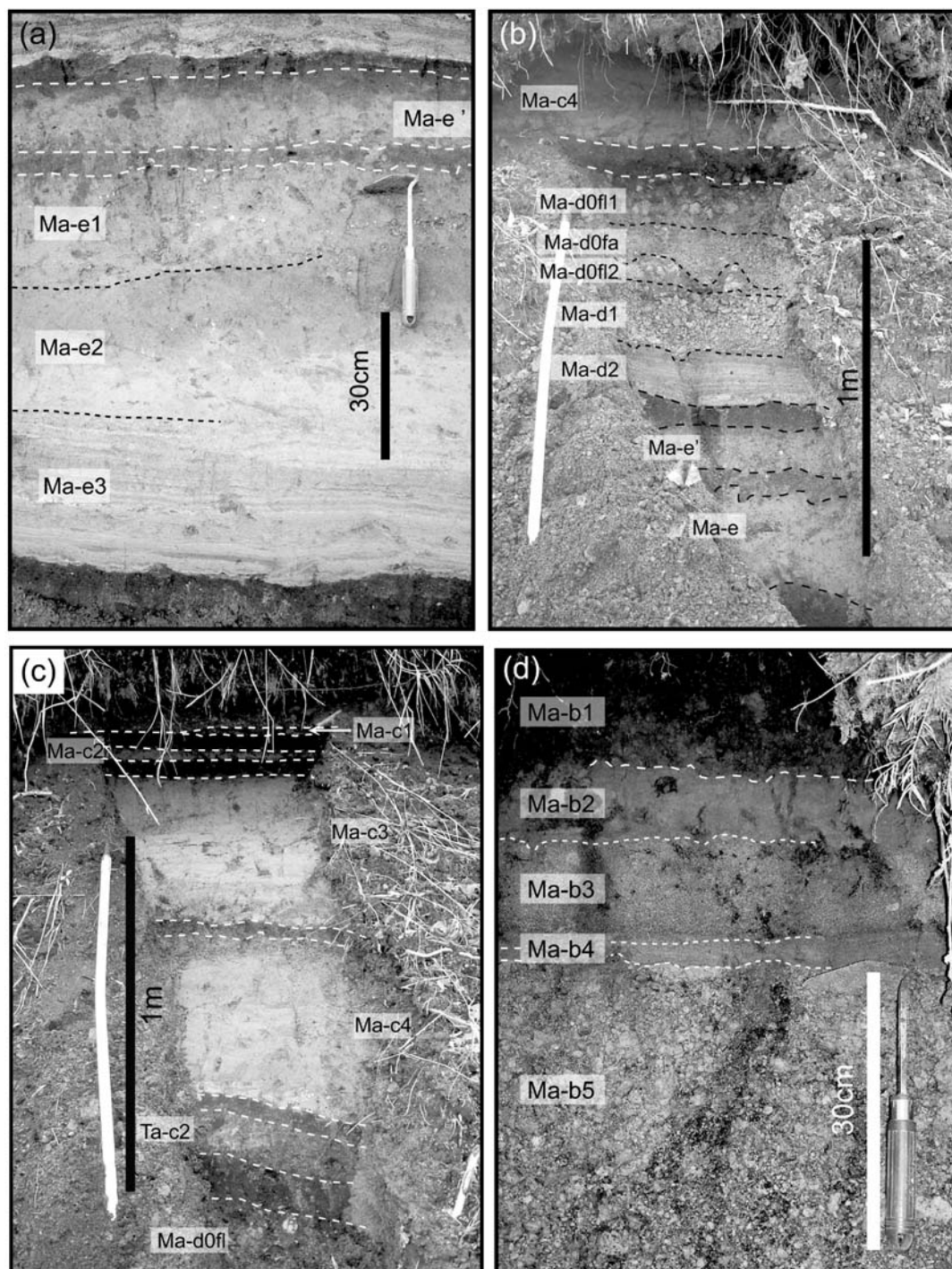


Fig. 12. Field occurrences of eruptive units of the central cone building stage. Ma-e1~e3 and overlying Ma-e', separated by thin humic soil at Loc. 3 (a). Ma-d consists of alternate of pyroclastic fall and flow deposits, at Loc. 1 (b). Ma-c1~c4, in descending order, each separated by paleosols at Loc. 1 (c). Ma-b is composed of three pumice fall and intervening two ash fall layers at Loc. 46 (d).

Table 2. Summary of widespread tephra in this studied area. \*: Soya (1972); \*\*: Furukawa *et al.* (1997); \*\*\*: Hayakawa and Koyama (1998); \*\*\*\*: Machida and Arai (2003), Furukawa *et al.* (2006).

Name	Type locality	Color	Thickness at type locality	Isolated crystals	Age
Ta-a	42	yellowish-white	3 cm	Pl, Opx, Cpx and Opq	1739 AD*
Ko-c2	42	yellowish-white	1 cm	Pl, Opx, Cpx and Opq	1694 AD**
B-Tm	41	white	0~1 cm	Not found (vitric ash only)	946~947 AD***
Ta-c2	4	yellowish-white	10 cm	Pl, Opx, Cpx and Opq	2500~3000 yBP****

る。下位に層厚およそ 5 cm の黒色土壌を挟んで Ma-c4 を覆う。Loc. 1 における層厚は 35 cm で、Ma-c4 と同様、下部では葉理構造と火山豆石が認められる。本層は、下部で暗灰色、中部で青灰色、上部で暗灰色を呈する。石質岩片は多い順に、灰色の輝石デイサイト、黒色安山岩、白色・褐色の変質岩である。このうち安山岩・変質岩片は下部で増加する。噴出量は 0.26 km<sup>3</sup> である。

#### 4-2-7 摩周降下火山灰層 c2 (Ma-c2) {瀬尾・他 (1963) および佐々木・他 (1971)}

本層は主にカムイヌプリ南東方約 10 km の範囲に分布する、中粒砂～粗粒砂サイズの降下火山灰層である。下位に層厚およそ 5 cm の黒色土壌を挟んで Ma-c3 を覆う。Ma-c4, Ma-c3 と同様に青灰色～灰色を呈し、Loc. 2 での層厚は 6 cm である。石質岩片の種類は Ma-c3 と同じである。噴出量は 0.02 km<sup>3</sup> である。

#### 4-2-8 摩周降下火山灰層 c1 (Ma-c1) {瀬尾・他 (1963) および佐々木・他 (1971)}

本層は Loc. 1 及び Loc. 2 において認められる、灰褐色で中粒砂～粗粒砂サイズの降下火山灰層である。下位に層厚約 5 cm の黒色土壌を挟んで Ma-c2 を覆う。層厚は Loc. 1 において 3 cm, Loc. 2 で 2 cm である。石質岩片は、白色・褐色の変質岩に次いで黒色安山岩が多く、灰色デイサイトも少量含まれる。噴出量は約 0.005 km<sup>3</sup> と見積もった。

#### 4-2-9 摩周降下火砕堆積物 b (Ma-b) {勝井 (1962) を再定義}

本層は降下軽石と青灰色火山灰の互層からなり、下位に約 5 cm の黒色土壌を挟んで Ma-c1 を覆う。勝井 (1962) により下位から Ma-b5~b1 のサブユニットに分けられており、Ma-b5, b3 及び b1 は降下軽石、Ma-b4 及び b2 は降下火山灰である (Fig. 12-d)。Ma-b5~b1 の分布主軸はサブユニットによって異なり (Katsui *et al.*, 1975), 下位から順に北、南東、西、南東、西方向である。本研究では、Loc. 47 において、Ma-b5 の直下に土壌を介さず青灰色の火山灰層 (Ma-b6: 新称) を見出した。これら Ma-b6~b1 には共通して白色の軽石 (または軽石質火山

灰) と石質岩片が含まれ、石質岩片は灰色の輝石デイサイトと赤色・褐色の変質岩からなる。Ma-b5~b1 の総噴出量は、勝井・他 (1986) の等層厚線を用いて、4.6 km<sup>3</sup> と算出した。

サブユニットの中で Ma-b5 は最も規模が大きく、摩周火山北麓から斜里地域にかけて広く分布する。Loc. 44 での層厚は 2 m である。軽石の平均粒径は 3 cm, 最大粒径は 20 cm で、径 10 cm を越える軽石は内部が赤色酸化する。軽石は、スポンジ状～繊維状の白色軽石が多く、まれに白色軽石よりも発泡が悪い縞状軽石を含む。Ma-b3 及び Ma-b1 は、Loc. 46 における層厚がそれぞれ 10 cm, 20 cm で、白色軽石が大部分を占め、それらの平均粒径はそれぞれ 2 mm, 1 cm である。Ma-b5, -b3 および -b1 の軽石は斑晶に斜長石、斜方輝石、単斜輝石、及び不透明鉱物を含む。

降下火山灰層である Ma-b6, Ma-b4 及び Ma-b2 は、細粒砂～粗粒砂サイズの青灰色～灰褐色火山灰である。各層の層厚は、Ma-b6 が Loc. 47 において 2 cm, Ma-b4 が Loc. 1 において 15 cm, そして Ma-b2 は Loc. 46 において 8 cm である。これらはいずれも石質岩片と遊離結晶および極少量の軽石質火山灰からなり、石質岩片である灰色デイサイトは鋭利な破面に囲まれる。この岩片は斑晶鉱物に斜長石・輝石・不透明鉱物を含み、石基は新鮮でハイアロピリティック組織を示す。遊離結晶は斜長石、斜方輝石、単斜輝石、及び不透明鉱物からなり、自形～半自形で、しばしばその周縁部にはデイサイト質岩片と同質のガラスが認められる。

#### 4-3 本火山地域に分布する広域テフラ

本火山地域に分布する完新世の広域テフラは、徳井 (1989) に基づいて同定し、火山ガラス組成を用いて対比を確認した (Fig. 13)。本地域の Ko-c2 (北海道駒ヶ岳起源) は Loc. 2 及び Loc. 35 において Ma-b の上位に確認された試料である。B-Tm (白頭山起源) は Loc. 20 において Ma-b 下位から、Ta-c2 (樽前火山起源) は Loc. 4 の Ma-c4 下位から得た。これらの火山ガラス組成は、各広域テフラの報告値と一致する。広域テフラの岩相は、Table 2 に示した。

## 5. 岩石学的特徴

### 5-1 斑晶量及び鉱物組み合わせ

カルデラ形成期以降の摩周テフラは、いずれも斑晶鉱物に斜長石、斜方輝石、単斜輝石及び不透明鉱物を含むデイサイトである。斜方輝石と単斜輝石の量比は、多くの場合、同等もしくは斜方輝石の方がやや多い (Table 3)。同じ噴火ユニットに複数の軽石タイプが含まれる場合でも、タイプによる斑晶量・鉱物モード組成の大きな

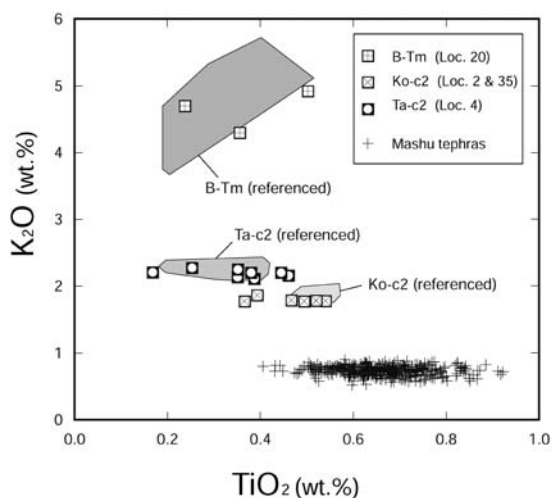


Fig. 13. Glass compositions ( $K_2O$ - $TiO_2$  diagram) of widespread tephra layers. Compositional ranges presented by shaded pattern are from referenced data; Ko-c2: Tokui (1989), B-Tm and Ta-c2 Machida and Arai (2003), Ta-c2: Analysis of proximal deposits of Ta-c2 at Tarumai volcano. All data is normalized to 100% anhydrous.

違いは認められない。カルデラ形成期と中央火口丘形成期噴出物では斑晶量に違いが認められる。カルデラ形成期噴出物 Ma-l, Ma-i~f では斑晶量が 1.0~6.2 wt.% であるのに対し、中央火口丘形成期噴出物 Ma-d は 12.9 wt.%, Ma-b では 18.2~23.5 wt.% と、新しい噴出物ほど斑晶量が多い。

### 5-2 全岩および石基ガラス化学組成

カルデラ形成期以降の摩周火山のテフラは、全岩  $SiO_2 = 64.3 \sim 71.7$  wt.% (無水で 100% 換算, 以下同様) のデイサイト~流紋岩質で、Gill (1981) の分類では低カリウム系列に属する (Fig. 14)。ハーカー図上では、 $SiO_2$  量の増加に対して、 $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $FeO^*$  (全鉄),  $MgO$ ,  $CaO$  および  $MnO$  は負の相関を示し、逆に  $Na_2O$  および  $K_2O$  は正の相関を示す。主カルデラ形成噴出物を除いた、各噴火ユニットは  $SiO_2$  量で 1 wt.% 程度の組成幅がある。一方、主カルデラ形成噴出物は全体として、 $SiO_2$  が 68.0 から 71.6 wt.% であり、摩周テフラの中では組成幅が広い。全体で見ると、 $K_2O$  や  $FeO^*$  のハーカー図では、1 つの直線的なトレンドを形成するが、 $TiO_2$  や  $MnO$  では噴火ユニット間で明瞭な組成範囲のギャップが認められる。主カルデラ形成噴出物ではサブユニット間で組成領域を重ねながら全体として 1 つのトレンドを形成する。同程度の  $SiO_2$  量で比較した場合、Ma-i, h が  $TiO_2$  や  $MnO$  量で Ma-g, f よりやや高い値を示すが、この差異は、噴火

Table 3. Phenocryst contents and modal compositions (wt.%) of pumice in each eruption unit.

Unit	Sampling locality	Pumice type	Phenocryst contents (wt.%)	Modal compositions (wt.%)			
				Pl	Opx	Cpx	Opq
Ma-b5	47	Wp	18.2~18.3	13.2	2.6	1.6	0.9
		Bp	23.5	no data			
Ma-d1	1	Wp	12.9	8.3	1.8	2.1	0.7
Ma-f	9	Wp	2.9	1.9	0.1	0.8	0.1
		Gp	1.1~3.5	0.8~2.5	0.2~0.4	0.1~0.4	0.1~0.2
		Bp	2.8	no data			
Ma-g	20	Gp	1.0~6.1	0.7	0.1	0.1	tr
		Bp	5.9	no data			
Ma-h	20	Wp	4.5	no data			
		Gp	3.8~5.2	4.6	0.3	0.1	0.1
		Bp	4.8	no data			
Ma-i	20	Wp	5.1	4.3	0.5	0.3	0.1
Ma-r2	20	Wp	4.9~5.0	3.9	0.5	0.4	0.1

ユニット間の組成ギャップに比べると明らかに小さい。

石基ガラス組成は  $SiO_2$  で 67.8 から 75.5 wt.% までの範囲にあり、全岩組成よりも広い組成幅を示す (Fig. 15)。主カルデラ形成噴出物を除いた噴火ユニットでは、 $SiO_2$  で 2 wt.% 以内の組成幅がある。一方、主カルデラ形成噴出物の組成幅は広く、この中で初期のサブユニットである Ma-j が最も  $SiO_2$  に富み、Ma-i, h, g と上位にいくにしたがって次第に  $SiO_2$  に乏しくなる (Table 4)。最後の Ma-f では、組成幅が大きくなるが、この特徴は全岩組成にも共通する (Fig 9)。Ma-e' と、最新の噴火ユニットである Ma-b が、摩周テフラの中で最も  $SiO_2$  (wt.%) に富む ( $SiO_2 = 74.2 \sim 75.9$ )。全体として、ハーカー図上のトレンドは、組成領域を重ねながら直線的に変化するが、Ma-b および Ma-e' は、 $MgO$  などにおいて他のテフラと組成領域が異なる。

## 6 議論

### 6-1 摩周テフラに認められる噴火様式の特徴

摩周火山のカルデラ形成期以降のテフラには共通する特徴がある。まず、比較的規模の小さいテフラ (例えば、Ma-k, -e, -e' および Ma-c) は、青灰色の降下火山灰からなり、これらは石質岩片と遊離結晶が主体で、黒曜岩や火山豆石もしばしば含む。規模の大きいテフラ (例えば、Ma-l, Ma-j~f および Ma-b) でも、粗粒な降下軽石の下位には、同様の火山灰が存在する。これらの細粒火山灰層は、下部で石質岩片に富み、岩片は鋭利な破面に囲まれフレーク状の破断面を有すること、火山豆石を含むことなど、マグマ水蒸気爆発堆積物の特徴 (例えば、Wohletz, 1983; 山元, 1994) を有する。Ma-k や Ma-c には、明らかなマグマ物質 (軽石・軽石質火山灰) は認められないが、新鮮なガラス質~半晶質でフレーク状のデイサイトや自



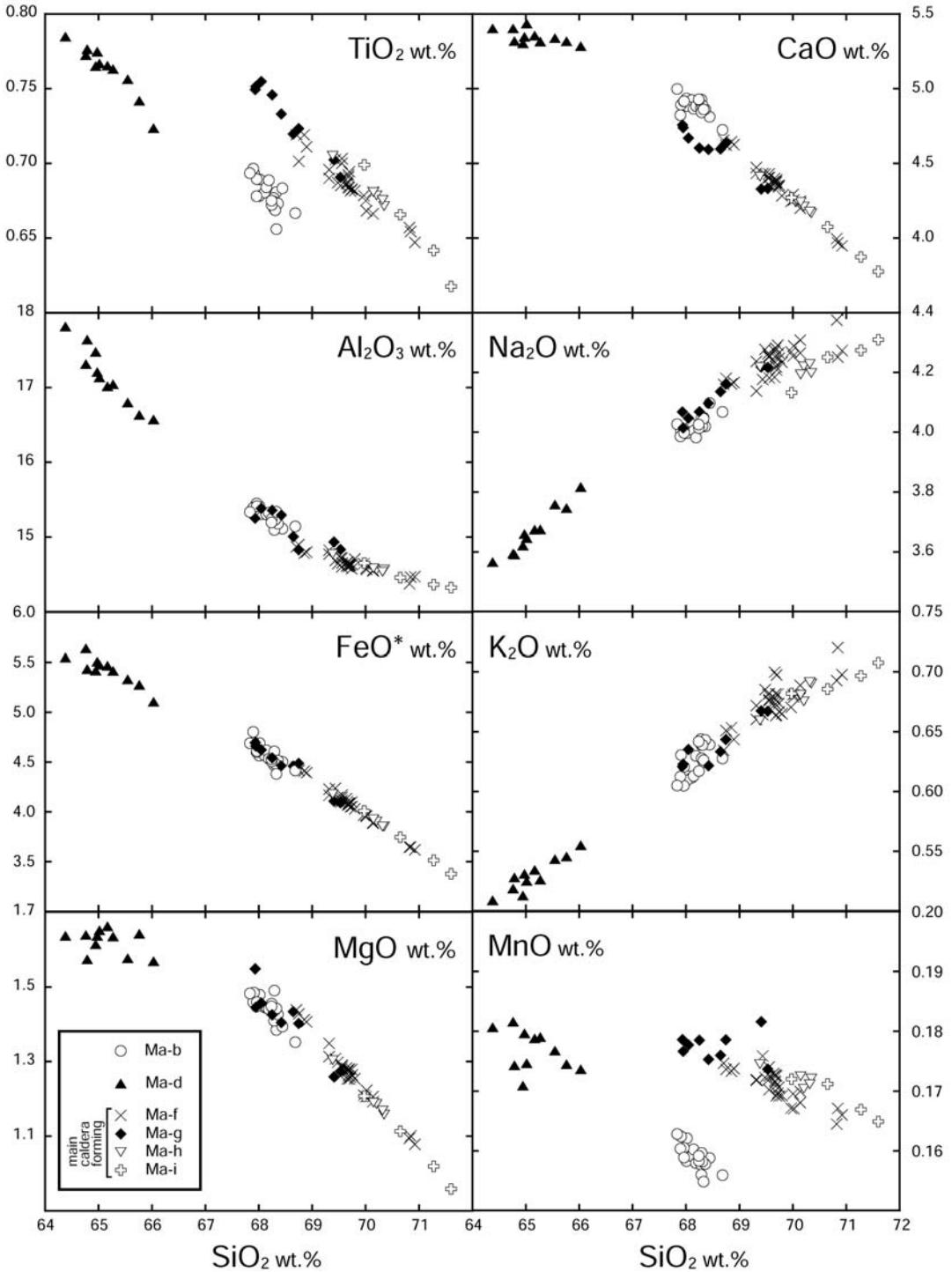


Fig. 14. SiO<sub>2</sub> variation diagrams of major elements for Ma-b~Ma-i (bulk samples). All data is normalized to 100%.



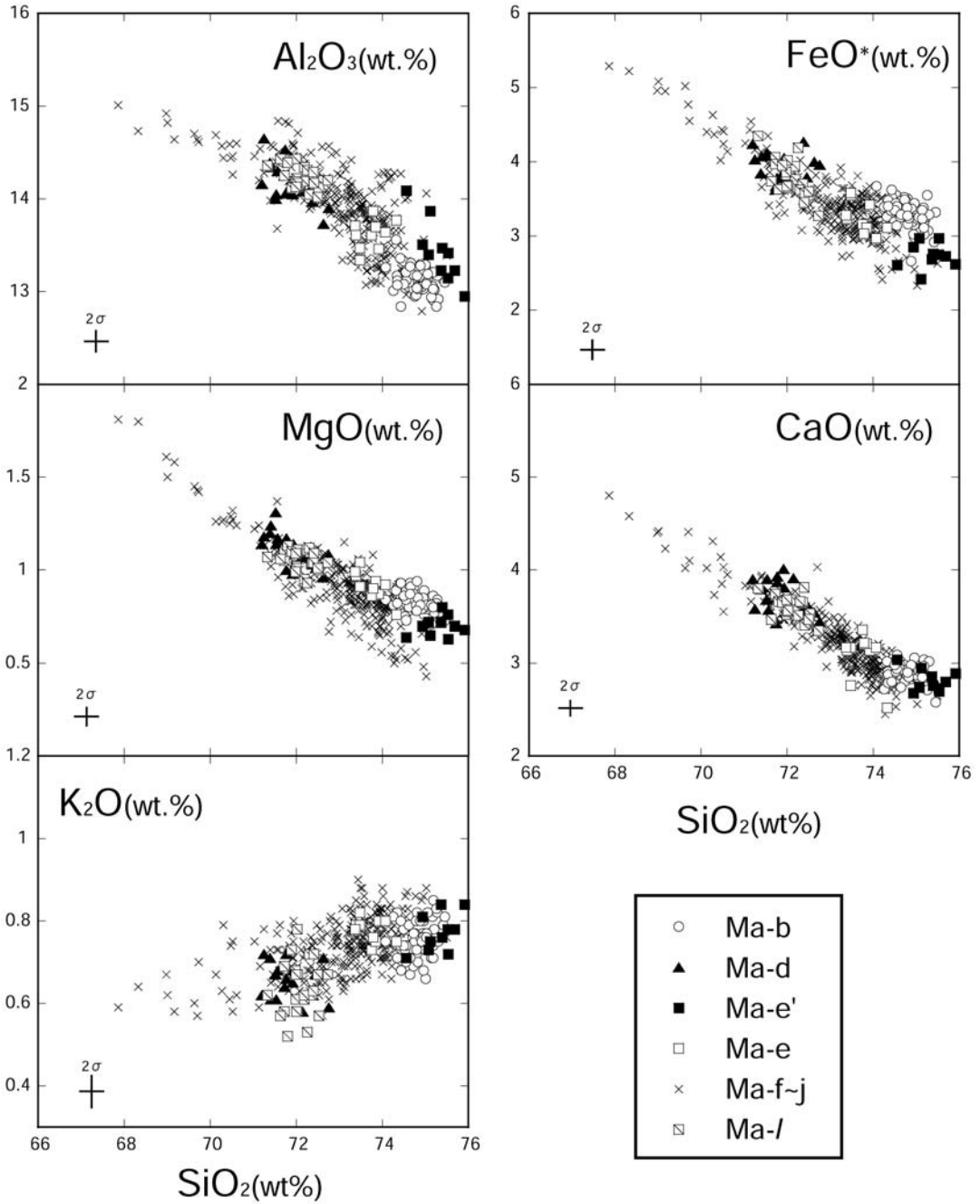


Fig. 15.  $\text{SiO}_2$  variation diagrams of major elements for matrix glass of Ma-b~Ma-l pumices. All data is normalized to 100% anhydrous.

形～半自形の遊離結晶が多数含まれ、これはマグマが水と接触した際の生成物 (Morrissey *et al.*, 2000) と特徴が一致することから、本質物質と考えられる。類質岩片 (例えば、噴火直前に形成された溶岩ドーム由来) である

可能性も完全には否定できないので、今後の詳しい岩石学的検討が必要である。黒曜岩も、噴出マグマの急冷で生成された可能性があり、今後の検討を要する。

摩周テフラは、下部で黒色の安山岩・変質岩片に富む

Table 4. Representative major element compositions of volcanic glass and whole-rock samples.

Unit	Ma-f2	Ma-j	Ma-i	Ma-h		Ma-g	Ma-f3		Ma-e1	Ma-e'	Ma-d1	Ma-b5
Pumice Type	Gp	Wp	Wp	Wp	Gp	Gp	Wp	Gp	Wp	Wp	Wp	Wp
(wt.%)	Glass	Glass	Glass	Glass	Glass	Glass	Glass	Glass	Glass	Glass	Glass	Glass
SiO <sub>2</sub>	69.22	72.95	70.94	70.21	69.94	69.71	71.39	69.46	70.39	73.70	68.11	74.20
TiO <sub>2</sub>	0.74	0.56	0.62	0.55	0.58	0.66	0.49	0.71	0.69	0.54	0.67	0.66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.58	12.94	13.53	13.26	13.72	14.05	13.02	14.36	13.06	12.89	13.38	12.95
FeO*	3.50	2.54	3.30	3.19	3.34	3.70	3.04	3.17	3.10	2.66	3.92	3.20
MnO	0.21	0.02	0.07	0.03	0.27	0.15	0.17	0.13	0.19	0.03	0.07	0.13
MgO	1.06	0.73	0.84	0.77	0.97	1.10	0.78	0.88	0.93	0.68	1.09	0.80
CaO	3.41	2.56	3.23	3.06	3.38	3.36	2.73	3.36	3.01	2.73	3.71	2.91
Na <sub>2</sub> O	3.72	3.60	3.61	3.42	3.67	3.51	4.02	4.03	3.79	3.40	3.67	3.58
K <sub>2</sub> O	0.65	0.73	0.71	0.71	0.62	0.71	0.78	0.71	0.76	0.76	0.58	0.74
Total	96.09	96.63	96.85	95.20	96.49	96.95	96.42	96.81	95.91	97.39	95.20	99.17
			Bulk	Bulk	Bulk	Bulk	Bulk	Bulk			Bulk	Bulk
SiO <sub>2</sub>			70.57	70.26	69.56	68.08	69.74	69.63			64.77	67.93
TiO <sub>2</sub>			0.67	0.68	0.71	0.75	0.70	0.73			0.76	0.68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			14.44	14.53	14.81	15.47	14.86	15.07			17.07	15.16
FeO*			3.74	3.85	4.19	4.67	4.26	4.51			5.46	4.48
MnO			0.17	0.17	0.18	0.18	0.17	0.18			0.17	0.16
MgO			1.11	1.17	1.31	1.45	1.36	1.46			1.65	1.38
CaO			4.07	4.17	4.42	4.75	4.50	4.72			5.42	4.83
Na <sub>2</sub> O			4.25	4.23	4.23	4.02	4.16	4.22			3.63	4.03
K <sub>2</sub> O			0.69	0.69	0.66	0.62	0.68	0.64			0.52	0.62
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			0.18	0.18	0.19	0.20	0.18	0.19			0.17	0.16
Total			99.89	99.92	100.26	100.19	100.62	101.35			99.63	99.42

場合が多く、これらは噴火初期の水蒸気爆発によって破碎された山体や火道に由来すると考えられる。その後の噴出物は、マグマ由来と考えられる新鮮な火山ガラス・軽石およびデイサイト質岩片が卓越することから、火道が確保された後に徐々に本質物を増加させながら堆積したものと考えられる。遊離斑晶は、共存する本質物の斑晶と組み合わせが同じで、大半が自形を示すことから、多くがマグマ破碎時の生成物と解釈できる。軽石は、基盤の屈斜路軽石流のそれと比べて全体に発泡が悪い特徴が明瞭で、これは発泡が十分に進む前に滞水層と接触し、マグマ破碎がおきた結果（例えば、Heiken and Wohletz, 1991; Houghton *et al.*, 2000）と解釈できる。

マグマ噴火に水が関与した場合、マグマ対水の割合が変化することによって噴煙柱の安定度が変わり、堆積物の岩相が多様になることも指摘されている（例えば、Wilson, 2001）。これらの例では、水/マグマ比が大きくなると、噴煙柱は不安定となり、降下テフラを生成する噴煙柱の端からはしばしば火砕流が発生する。上位に降下軽石を伴わず、灰色の薄い細粒火山灰からなる Ma-e や Ma-c4, c3, c2 の等層厚線を見ると、これらは成層圏における強風の影響を受けたような分布を示さない (Fig. 11)。よってこれらは、相対的にマグマ量が少ない（水の関与量が大きい）、噴煙柱高度の低い噴火であったと推測できる。そして不安定な噴煙柱の端から発生する火砕流が、今回

新たに見出された Ma-e1 などに対応すると考えられる。一方、主カルデラ形成噴出物や Ma-b などでは、噴火の後期において軽石が卓越し、偏西風の影響を受けた分布主軸を示す。よってこれらの噴火では、時間とともにマグマの比率が増加し、噴煙柱の安定したプリニー式噴火に移行したと考えられる。

このように摩周火山の最近約 1 万 4 千年間の噴火では、普遍的にマグマ水蒸気爆発が起こることが特徴である (Table 5)。このことは摩周火山が水に富む地域で活動したことを示唆しており、基盤である厚い屈斜路軽石流堆積物が地下水に富む帯水層となっている可能性が考えられる。さらにカルデラ形成初期の Ma-k 以降、マグマ水蒸気爆発の特徴が顕著になることから、その前の大規模噴火である Ma-l で小カルデラが形成され、それ以降はカルデラ湖での噴火が定期的に行っていた可能性がある。

## 6-2 主カルデラ形成噴火の噴火推移とマグマプロセス

ここでは主カルデラ形成噴火に注目し、構成物量比、岩相、岩石学的データから、噴火様式の推移とマグマプロセスを考察する (Fig. 16)。まず前述の通り、主カルデラ形成噴火は、マグマ水蒸気爆発 (Ma-j) から開始した。平行ラミナが発達する岩相は、パルス的に爆発を繰り返したことを示唆する。また、上部ほど変質岩片が多い岩相と、摩周カルデラ壁に変質岩の露出が認められないこ

Table 5. Summary of age, eruptive volume and styles for each eruptive unit from Mashu volcano during the last 14,000 years. PDC: pyroclastic density current. \*: Katsui *et al.* (1975), \*\*: Itoh *et al.* (2007). ⇔: alternative between the two sides. Calibrated ages are calculated by the program of Stuiver *et al.* (2005).

Stage	Unit	$^{14}\text{C}$ Age (yBP)	Age (cal ka)	Volume ( $\text{km}^3$ )	Eruptive style
Central cone building	Ma-b	$980 \pm 100^*$	ca. 0.9	4.6	Phreatomagmatic ⇔ Plinian
	Ma-c1	$1700 \pm 100^*$ , $1850 \pm 90^*$	ca. 1.6 and 1.8	0.005	Phreatomagmatic
	Ma-c2			0.02	Phreatomagmatic
	Ma-c3			0.26	Phreatomagmatic
	Ma-c4			0.21	Phreatomagmatic
	Ma-d	$3660 \pm 40^{**}$	ca. 4.0	0.32	Phreatomagmatic → Plinian ⇔ PDC
	Ma-e'			0.01	Phreatomagmatic
Ma-e	$4720 \pm 40^{**}$	ca. 5.5	0.27	Phreatomagmatic → PDC	
Caldera forming	Ma-f-j	$6510 \pm 70^{**}$ , $6730 \pm 60^{**}$	ca. 7.4 and 7.6	18.6	Phreatomagmatic → Plinian → PDC
	Ma-k	$10130 \pm 60^{**}$	ca. 12	0.46	Phreatomagmatic
	Ma-l	$11930 \pm 70^{**}$	ca. 14	6.6	Plinian fall → PDC

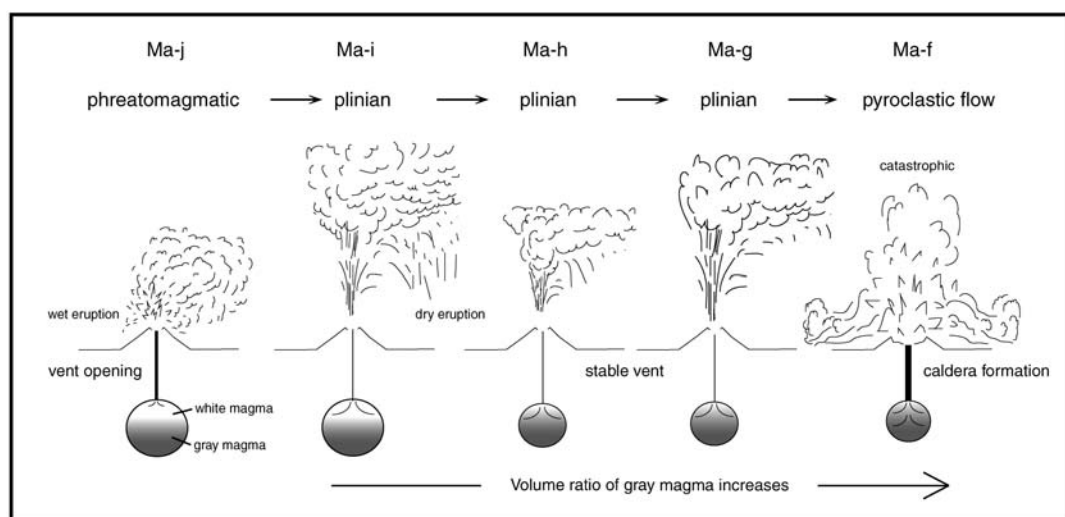


Fig. 16. Schematic illustrations showing eruptive sequence with magma systems during the main caldera-forming eruption.

と (Katsui *et al.*, 1975) から、徐々に深部の地層 (変質岩) を破壊して火道を形成した過程が推測できる。次の **Ma-i** ( $4.0 \text{ km}^3$ ) では、軽石が急増し、火山豆石は下部にしか存在しないことから、安定した火道からのプリニー式噴火に移行したと考えられる。次の **Ma-h** ( $0.98 \text{ km}^3$ ) では、上部で石質岩片 (黒色安山岩・変質岩・灰色デイサイト) がやや増加することから、若干量の火道拡大が示唆されるが、全体としては軽石 (87~94 wt.%) が卓越するので、安定したプリニー式噴火が継続したと考えられる。**Ma-g** ( $3.2 \text{ km}^3$ ) でも、本質物タイプは変化するものの、石質岩片をあまり放出しないプリニー式噴火を継続した。そして、最後のフェーズである **Ma-f** ( $9.7 \text{ km}^3$ ) は、規模が最も大きく、石質岩片 (安山岩・変質岩・黒曜岩)

の量が急増し、火砕流が発生していることから、このとき噴煙柱が崩壊し、カルデラが形成されたと考えられる。これら一連の噴火推移を通してみると、石質岩片の量が **Ma-g** まで一方的な減少傾向をたどることや、岩片種がほぼ同一であることから、ひとつの火道で起こった噴火と考えて矛盾ない。

次に、マグマ物質の代表である軽石の岩石学的特徴から、マグマプロセスを考察する。まず、縞状軽石がごく普通に存在すること、全岩化学組成のハーカー図において **Ma-i**~**f** はほぼ 1 本の直線トレンドを描くことから、2 端成分マグマ混合を想定できる。軽石は、タイプによらず斑晶量 (1.1~6.1 wt.%) および鉱物組み合わせが同様であるが、白色~縞状~灰色の順に  $\text{SiO}_2$  量が減少する

(Fig. 9). そして、一連の噴火を通じて初期に白色、中期に縞状軽石、後期に灰色軽石が卓越する. 以上のことから噴火直前には、灰色の珪長質マグマ（以下、灰色マグマ:  $\text{SiO}_2=69$  wt.%前後）とその上位の、より珪長質なマグマ（以下、白色マグマ:  $\text{SiO}_2=71$  wt.%前後）からなるひとつの成層マグマ溜りが存在していたと考えられる. 最初のサブユニットである **Ma-j** では、マグマ水蒸気爆発によってマグマ溜り上部の白色マグマを極少量放出した. 次の **Ma-i** でも白色マグマのみを噴出するが、**Ma-h** の中部以降で白色軽石の量が減少することから、白色マグマの多くは **Ma-i** で放出したと考えられる. **Ma-h** では、マグマ溜り上部に白色マグマを残しながらも、安定したプリニー式噴火によるマグマ溜り深部からの吸出しによって、下部の灰色マグマを多く噴出した. このときに、灰色マグマは上位の白色マグマと不均質に混ざりあって縞状軽石を形成したと考えられる. その後もプリニー式噴火が継続し、**Ma-g** 時のマグマ溜りは、少量の白色・混合マグマと大量の灰色マグマからなっていたと考えられる. そして、破局的噴火フェーズの **Ma-f** では、カルデラ形成を伴いながら、マグマ溜りの全体部からすべてのタイプのマグマを同時に放出したと解釈できる.

なお、次の中央火口丘形成期では、それまでと明瞭に異なる組成トレンドを示すマグマを噴出していることから (Fig. 14)、摩周火山ではカルデラ形成後の数千年間で、マグマ系が更新されたと考えられる.

### 6-3 摩周火山の最近1万4千年間の噴火史と火山活動の評価

本研究に既報の年代値などを加味して、時間一累積噴出量の階段図を作成した (Fig. 17). AMS法による新しい年代値 (伊藤・他, 2007) がある場合はそれらを優先し、以降の議論では、較正暦年代を用いる. 最近1万4千年間のテフラの総噴出物量は  $30 \text{ km}^3$  以上であり、千年あたりの平均噴出率は約  $0.8 \text{ km}^3 \text{ DRE/ky}$  (堆積物密度 (DRE) として、降下軽石 =  $0.8 \text{ g/cm}^3$ , 火砕流 =  $1.0 \text{ g/cm}^3$ , 岩石密度 =  $2.5 \text{ g/cm}^3$  を仮定) となる. これは噴出率が明らかな日本の活火山では、富士火山の最近1万年間 (宮地, 1988) や伊豆大島の最近約1,500年間 (Nakamura, 1964) と同等であり、北海道で活動的とされる樽前山の最近9,000年間 ( $0.5 \text{ km}^3 \text{ DRE/ky}$ ; 古川・他, 2006) や北海道駒ヶ岳の最近2万年間 ( $0.2 \text{ km}^3 \text{ DRE/ky}$ ; 吉本・他, 2008) よりも大きい. 同じ千島弧に属する火山と比較した場合、活動的火山とされる十勝岳では最近約3,500年間の噴出率が  $0.03 \text{ km}^3 \text{ DRE/ky}$  であり (藤原・他, 2007)、摩周火山の方がはるかに高噴出率である. カルデラ形成期後の最近6,000年間では約  $0.3 \text{ km}^3 \text{ DRE/ky}$  と減少するが、それでも北海道駒ヶ岳などと同等の噴出率

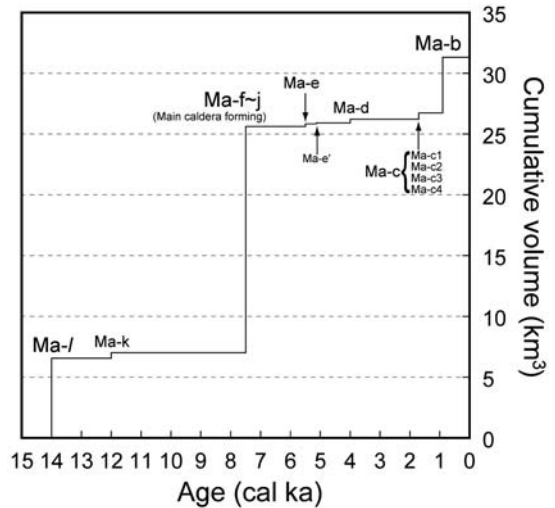


Fig. 17. Cumulative volume of pyroclastic deposits from Mashu volcano during the last 14,000 years. The age of **Ma-c1~c4** are approximated uniformly as a mean of two ages in Table 5. The age of **Ma-e'** is estimated by the thickness ratio of paleosol layers between **Ma-d~e'** and **Ma-e'~e**.

である. このように完新世の噴火実績という点で、摩周火山は高噴出率を誇る活火山であると言える.

次に、摩周火山の噴火履歴から、活動ポテンシャルを評価する. 1万4千年間に、噴出量が数  $\text{km}^3$  程度あるいはそれ以上の大噴火が3回 (**Ma-l**, **Ma-j~f** および **Ma-b**)、それらの間に  $1 \text{ km}^3$  以下の噴火 (中噴火) を起こした活動期が4回あり、その中で約  $1.6\sim 1.8 \text{ cal ka}$  の活動期 (**Ma-c** 期) では比較的短い時間間隙を置いて4回の噴火が繰り返された. また本研究では、小噴火 ( $0.1 \text{ km}^3$  以下) である **Ma-e'** も新たに認識した. 最近6,000年間では、大小合わせて8回の噴火が発生しており、噴火活動の発生頻度は少なく見積もっても千年に1回である. また、本研究のように、火山体から離れた地域を調査した場合では、**Ma-e'** のような小噴火をすべて検出していない可能性もあり、その場合は噴火頻度がさらに高く見積もられる. このような噴火履歴と **Ma-b** から約千年が経過していること、そして2003年には火山性地震が多発していること (気象庁, 2005) などを考慮すると、中長期的には、現在の休止期を終えて次の活動期に移行する可能性を考慮すべきであろう. 次の噴火活動は、大噴火であった **Ma-b** の後にあたることから、順序的には小~中噴火が想定され、既に述べたようにマグマ水蒸気噴火が発生する可能性が高い. この場合、噴煙柱の発達が悪く、遠隔地では薄い降灰があるだけかもしれない. し



かしながら、小規模な火砕流の発生が確認された履歴もあり、火山災害という点では軽視できない。摩周火山は日本を代表する景勝地のひとつとして、火口縁まで多くの観光客が訪れるが、噴火活動のポテンシャルが高い活火山という認識は、観光客や周辺の住民はむろんのこと火山研究者の中でも希薄である。今後は、本研究で示した摩周火山の噴火履歴や噴火の特徴に着目し、ハザードマップの整備などの防災対策を行う必要があろう。

## 7. ま と め

本研究では摩周火山のカルデラ形成期以降の、約1万4千年間について、テフラ層序の再検討を行い、噴火様式や本質物の岩石学的特徴、そしてその時間変化について検討した。結果は以下のようにまとめられる。

(1) 新たな噴火堆積物 Ma-e' を発見し、Ma-l, e, d, b において、より詳細なサブユニット区分を行うなど、層序の再編を行った。また個々の噴火について、噴火様式の時間変化や噴出量も明らかにした。

(2) 主カルデラ形成噴火では、時間とともに本質物の割合、さらに本質物中でも灰色・縞状軽石の占める割合が変化する。これらの量比変化から、噴火の進行と火道形成・拡大との関係が示された。マグマ系については、上部の白色マグマと下部の灰色マグマによる層状マグマ溜まりが想定された。

(3) 摩周火山の噴火は、マグマと地下水(または湖水)との接触によるマグマ水蒸気爆発が普遍的に起こっていた。このことから、摩周火山の地下浅所は、水に富む環境にあったと考えられる。

(4) 時間・累積噴出量図によると、摩周火山の噴出率は約1万4千年間の平均で  $0.8 \text{ km}^3 \text{ DRE/ky}$  と、日本の活火山の中では高い値を示す。これらの噴火様式は例外なく爆発的であったことも考慮すると、摩周火山は、火山災害という点でも軽視できない活火山である。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、薄片製作においては北海道大学理学研究院の野村秀彦技官、中村晃輔技官に、全岩化学組成分析および火山ガラス組成分析においては同大学理学研究院の池田昌隆技官(当時)、松本亜希子技官にお世話になった。野外調査では中標津町教育委員会に長期の宿を貸していただき、同企画総務課施設係の佐藤和博氏には大変お世話になった。さらに同委員会学芸係長の山宮克彦氏には摩周テフラに関する資料を提供して頂いた。キール大学の隅田まり博士には、露頭地点などをご教示頂いた。2名の匿名査読者と編集委員である山形大学の伴雅雄准教授には、重要な問題点から細かな部分ま

で丁寧なご指摘をいただき、論文が大幅に改善された。以上の方々および機関に感謝いたします。

## 引用文献

- 藤原伸也・中川光弘・長谷川撰夫・小松大祐(2007)北海道中央部、十勝岳火山の最近3,300年間の噴火史。火山, 52, 253-271.
- 古川竜太・吉本充宏・山縣耕太郎・和田恵治・宇井忠英(1997)北海道駒ヶ岳火山は1694年に噴火したか?—北海道における17~18世紀の噴火年代の再検討—。火山, 42, 269-279.
- 古川竜太・中川光弘・古堅千絵・吉本充宏(2006)樽前火山先史時代の噴火活動。月刊地球, 28, 301-307.
- Gill, J. (1981) What is "Typical calcalkaline Andesite"? In *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*, 1-12, Springer-Verlag, New York.
- Hayakawa, Y. (1985) Pyroclastic geology of Towada Volcano. *Bull. Earth. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 60, 507-592.
- 早川由紀夫・小山真人(1998)日本海をはさんで10世紀に相次いで起こった二つの大噴火の年月日—和田湖と白頭山—。火山, 42, 269-279.
- Heiken, G. and Wohletz, K. (1991) Fragmentation processes in explosive volcanic eruptions. In *Sedimentation in Volcanic Settings* (Fisher R.V. and Smith G.A. eds), 19-26, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Paper 45.
- Houghton, B.F., Wilson, C.J.N., Smith, R.T. and Gilbert, J.S. (2000) Phreatoplinitic eruptions, In *Encyclopedia of Volcanoes* (Sigurdsson H. ed), 513-525, Academic Press, London.
- 石塚喜明・瀬尾春雄・池田兼徳・佐々木龍男・中川秀夫(1953)北部根室原野土性調査報告。北海道農業試験場土性調査報告, 2, 142p.
- 伊藤順一・山元孝広・中川光弘・長谷川健・岸本博志(2007)北海道東部、屈斜路・摩周カルデラ噴出物の放射炭素年代値。日本地球惑星科学連合2007年大会予稿集 V157-P030.
- 勝井義雄(1955)摩周火山の地質と岩石。地質雑, 61, 481-495.
- 勝井義雄(1958)阿寒・屈斜路火山群。地球科学, 39, 19-29.
- 勝井義雄(1961)火山砕屑物からみた摩周火山の活動史。地球科学, 55, 8-16.
- 勝井義雄(1962)5万分の1地質図幅「屈斜路湖」および同説明書。北海道開発庁, 42p.
- 勝井義雄・佐藤博之(1963)5万分の1地質図幅「藻琴山」および同説明書。北海道開発庁, 42p.
- Katsui, Y., Ando, S. and Inaba, K., (1975) Formation and Magmatic evolution of Mashu Volcano, East Hokkaido, *Japan. J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, 16, 533-552.
- 勝井義雄・横山 泉・岡田 弘・西田泰典・松本佳久・川上則明(1986)アトサヌプリ・摩周(カムイヌプリ)。北海道における火山に関する研究報告書, 第10編, 北海道防災会議, 104p.
- 気象庁(2005)摩周。日本活火山総覧(第3版), 気象庁編, pp. 25-29, 大蔵省印刷局, 東京。

- 宮地直道 (1988) 新富士火山の活動史. 地学雑, **94**, 433-452.
- Morrissey, M., Zimanowski, B., Wohletz, K. and Buettner, R., 2000, Phreatomagmatic Fragmentation. In *Encyclopedia of Volcanoes* (Sigurdsson H. ed), 431-445, Academic Press, London.
- Nakamura, K. (1964) Volcano-stratigraphic study of Oshima Volcano, Izu. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **42**, 649-728.
- Reimer, P. J., Baille, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Bertrand, C. J.H., Blackwell, P.G., Buck, C.E., Burr, G.S., Cutler, K.B., Damon, P.E., Edwards, R.L., Fairbanks, R.G., Friedrich, M., Guilderson, T.P., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormack, F.G., Manning, S., Ramsey, C.B., Reimer, R.W., Remmele, S., Southon, J.R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F.W., van der Plicht J. and Weyhenmeyer, C.E. (2004) IntCal 04 terrestrial radiocarbon age calibration. 0-26 cal kyr BP, *Radiocarbon*, **46**, 1029-1058.
- 佐々木龍男・片山雅弘・富岡悦郎・佐々木清一・矢沢正士・山田 忍・矢野義治・北川芳男 (1971) 北海道における腐植質火山灰の編年に関する研究. 第四紀研究, **10**, 117-123.
- 瀬尾春雄・佐々木龍男・富岡悦郎・後藤計二・片山雅弘・天野洋二 (1963) 主としてカムイヌプリ岳火山灰の分布について. 北海道農業試験場土性調査報告, no. 13, 169-197.
- 曾屋龍典 (1972) 樽前火山の形成—特に Ta-a 期, Ta-b 期の活動について—. 火山, **16**, 15-27.
- Stuiver, M., Reimer, P. J. and Reimer, R. W. (2005) CALIB 5.0 (WWW program and documentation). <http://calib.qub.ac.uk/calib/>
- 隅田まり (2003) 摩周カルデラ形成に関与した噴火とそのシナリオ. 平成 12~14 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C) (2)) 研究成果報告書, 北海道における完新世火山の火山活動特性の評価 (代表: 宇井忠英), 24-32.
- 徳井由美 (1989) 北海道における 17 世紀以降の火山噴火とその人文環境への影響. お茶の水地理, **3**, 27-33.
- 宇井忠英・本間 宏樹・奥野 充 (2001) 北海道東部アトサヌプリ火山群の活動史と火山災害予測図. 地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会予稿集.
- Wentworth, C.K. (1922) A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Jour. Geol.*, **30**, 377-392.
- Wilson, C.J.N. (2001) The 26.5 ka Oruanui eruption, New Zealand: an introduction and overview. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **112**, 133-174.
- Wohletz, K.H. (1983) Mechanisms of hydrovolcanic pyroclastic formation: grain-size, scanning electron microscopy, and experimental studies. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **17**, 31-63.
- 山元孝広 (1994) マグマ水蒸気爆発のメカニズム. 地質学論集, **43**, 63-72.
- 吉本充宏・宮坂瑞穂・高橋 良・中川光弘・吉田邦夫 (2008) 北海道駒ヶ岳火山, 先歴史時代噴火活動史の再検討. 地質雑, **114**, 336-347.

(編集担当 伴 雅雄)