

博士論文

沼沢火山のマグマ供給系の岩石学進化とカルデラ形成噴火  
の準備過程と発生機構

Petrological evolution of the magma-plumbing system beneath Numazawa volcano, NE Japan: implications for preparing processes and trigger mechanism of caldera-forming eruption

2017年3月

富山大学大学院理工学教育部（博士課程）  
新エネルギー科学専攻  
増渕 佳子



# 目次

## Abstract

第1章	はじめに	1
1.1	先行研究	1
1.1.1	大規模噴火に関する岩石学的研究	1
1.1.2	研究対象と先行研究	5
1.2	本研究の目的と構成	6
第2章	沼沢火山の地質	9
2.1	基盤地質および火山地形	9
2.2	沼沢火山の噴火史	10
2.3	地質各論	12
2.3.1	尻吹峠火砕堆積物 (110 ka)	12
2.3.2	木冷沢溶岩 (71 ka)	12
2.3.3	水沼火砕堆積物 (53 ka)	12
2.3.4	惣山溶岩 (43 ka)	13
2.3.5	前山溶岩 (24 ka)	14
2.3.6	沼沢湖火砕堆積物 (5.4 ka)	14
第3章	分析試料および分析方法	17
第4章	沼沢火山のマグマ供給系の岩石学的進化	21
4.1	岩石記載	21
4.1.1	尻吹峠火砕堆積物 (110 ka)	21
4.1.2	木冷沢溶岩 (71 ka)	23
4.1.3	水沼火砕堆積物 (53 ka)	23
4.1.4	惣山溶岩 (43 ka)	24
4.1.5	前山溶岩 (24 ka)	25
4.1.6	沼沢湖火砕堆積物 (5.4 ka)	26
4.2	全岩化学組成	29
4.2.1	主成分および微量成分組成	29
4.2.2	希土類元素組成パターン	33
4.2.3	Sr および Nd 同位体組成	34
4.3	鉱物化学組成	35
4.3.1	斜長石	35
4.3.2	角閃石	38
4.3.3	斜方輝石	38
4.3.4	Fe-Ti 酸化鉱物	39
4.4	議論	40
4.4.1	珧長質マグマの岩石学的特徴とマグマ混合	40
4.4.2	珧長質マグマの温度・含水量・圧力条件	42

第5章 沼沢湖火砕噴火（カルデラ形成噴火）のマグマ供給系とマグマ溜りの内部構造	46
5.1 沼沢湖火砕堆積物中に見られる多様な本質物とその構成物組成	46
5.2 岩石記載	49
5.2.1 白色軽石（WP）	49
5.2.2 斑晶に乏しい軽石（PpP）	51
5.2.3 微斑晶に富む軽石（PrP）	52
5.2.4 黒色スコリア	53
5.2.5 灰色スコリア	53
5.3 全岩化学組成	55
5.3.1 主成分および微量成分組成	55
5.3.2 希土類元素組成パターン	55
5.3.3 石基ガラス組成	59
5.3.4 Sr および Nd 同位体組成	60
5.4 鉱物組成累帯構造	61
5.4.1 斜長石	61
5.4.2 ホルンブレンド	61
5.4.3 斜方輝石	62
5.5 鉱物化学組成	64
5.5.1 斜長石	64
5.5.2 ホルンブレンド	65
5.5.3 斜方輝石	66
5.5.4 Fe-Ti 酸化鉱物	67
5.6 マグマの物理化学的条件	68
5.6.1 マグマ温度	68
5.6.2 圧力	69
5.6.3 含水量	69
5.6.4 マグマ粘性	69
5.7 議論	71
5.7.1 沼沢湖火砕噴火で噴出した多様な本質物の岩石学的特徴	71
5.7.2 斑晶鉱物の組成と累帯構造からみたデイサイト質マグマの蓄積過程	74
5.7.3 沼沢湖火砕噴火のトリガーと噴火開始条件	75
第6章 総括	78
6.1 沼沢火山の珪長質マグマの起源	78
6.2 各噴火で噴出した苦鉄質マグマと珪長質マグマの地球化学的關係	78
6.3 沼沢火山のマグマプロセスとマグマ蓄積率	79
6.4 カルデラ形成噴火のマグマ蓄積過程	81
引用文献	84
謝辞	91
付録	93

---

## Abstract

Volcanisms are diverse in terms of magnitudes, eruption styles, and style transitions. One indicator that represents the magnitude of an eruption is the volcanic explosivity index (VEI). VEI is classified on a scale of 0 to 8 depending on the volume of ejecta. In general, eruptions rated at VEI 4 or above are considered as large eruptions, and such eruptions may cause serious and extensive human damages. Therefore, there is a need to understand the risks involved in large scale eruptions and predict them from social and disaster prevention standpoints. Research on predictions have progressed little over the years since large scale eruptions rarely occur, and the relationship between eruptions and magma supply system as well as the process by which magma reservoirs form are barely understood. In order to understand these concepts, it is important to first understand how long it took for a large volume of magma to be stored in a reservoir from past eruptions and know the mechanism that triggers eruptions.

This study analyzed the Numazawa volcano in Fukushima prefecture, northeast Japan, which caused a caldera-forming eruption 5,400 years ago. Volcanic activity at Numazawa volcano began 110,000 years ago, repeating lava and pyroclastic eruptions. We reviewed the eruptions at Numazawa volcano in the past 110,000 years and identified the evolution of felsic magma through a petrological study of the ejecta. Internal structure of the magma reservoir was also identified by the analysis of the various rock ejecta from the caldera-forming eruption while discussing the mixing of mafic magma and conditions that caused the caldera-forming eruption. These discussions are summarized, and the mid- to long-term preparation process for the magma reservoir that led to the magma supply system in Numazawa volcano and its caldera-forming eruption are discussed.

Chapter 1 provides an overview and challenges in research on calderas and the background that led to this study and its objectives.

Chapter 2 reviews the geological foundation and the eruption history of the Numazawa volcano. Numazawa volcano recorded a total of 6 eruptions: Shirifukitoge pyroclastic eruption, Mukurezawa lava eruption, Mizunuma pyroclastic eruption, Sozan lava eruption, Maeyama lava eruption, and Numazawako pyroclastic eruption.

Chapter 3 discusses the samples treated in this study and the method of its analysis. This study sampled ejecta from pre-caldera period and caldera formation period at Numazawa volcano and analyzed their petrography, whole-rock compositions, and phenocryst compositions. Ejecta of Numazawa volcano are mainly rholitic to dacitic, and mafic volcanic rocks were found from Sozan lava eruption and beyond. Pumice ejected from the Numazawako pyroclastic eruption were categorized into 3 types based on their differences in the level of phenocryst presence. These various pumice and mafic rocks were also sampled for analyses.

Chapter 4 discusses the analysis results for petrography, mineral composition, and whole-rock

---

composition from ejecta across 6 eruptions at Numazawa volcano. A detailed comparison of the data by eruptions showed that each ejecta possessed a unique whole-rock composition as well as phenocryst compositions and combinations. Based on these analysis data, the paper proceeds to discuss how rhyolite and dacite from each periods of eruption originated from felsic magma with unique petrological properties and how a renewal of felsic magma took place for every eruption period. Andesite magma that ejected alongside felsic magma following the lava eruption at Sozan 43,000 years ago had the same isotope composition as the felsic magma, suggesting that both magma originated from same material. On the other hand, 3 types of magma that erupted during the caldera-forming eruption all had a different isotope composition, meaning that 3 magmas each with different origins were active during the caldera-forming eruption.

Chapter 5 assesses the structure of felsic magma reservoir that caused a caldera-forming eruption and its magma plumbing system based on the petrological analysis of various rocks ejected during the pyroclastic eruption at Numazawako. Based on the level of phenocryst presence, pumice that ejected from this eruption are categorized into patchy white pumice, aphyric pumice with scarce level of phenocryst, and cumulate pumice with abundant phenocryst. Relationship between these 3 types of pumice are analyzed in terms of formation based on petrography, mineral composition, and whole-rock composition. Masubuchi and Ishizaki (2011) discussed the conditions for the beginning of an eruption from the compositions of constituent rocks and zonal structures of Fe-Ti oxide minerals ejected from the pyroclastic eruption at Numazawako. By adding petrological analysis, this study notes that the formation of felsic magma with a low presence of phenocryst and low viscosity, developed by the mixture of felsic and mafic magma, was the driving force for starting the eruption.

To summarize this study, chapter 6 discusses the magma genesis at Numazawa volcano based on the results of analysis of rare earth element compositions and Sr and Nd isotope compositions and a comparative analysis with the formation of magma proposed for other volcanoes. In particular, this chapter proposes a model in which magma was formed at various underground sites, accumulated to a shallow magma reservoir within the crust, and caused a large scale caldera eruption.

## 第1章 はじめに

日本には多くの火山がある。その中で、概ね過去1万年以内に噴火あるいは現在活発な噴気活動があり、活火山に指定されている火山は110（2017年3月現在）である。これは、世界の活火山の総数の約7%を占めており、日本は多くの火山が集中する火山大国と言える。噴火が起きれば、その発生した場所や規模によっては人的被害を伴うことがある（例えば近年では2014年の御嶽山噴火など）。特に大規模な噴火は広範囲に甚大な被害をもたらすため、このような大規模噴火にどう対応するかは社会的に大きな問題である（例えば、小山，2003；高橋，2003）。そのためには、過去にどれくらいの規模・様式の噴火がどれくらいの頻度で発生したかを過去の噴火履歴の調査から明らかにすることだけでなく、大規模な噴火がどのような過程を経て発生したか、その噴火準備過程とマグマ供給系を知ることが重要である。

### 1.1 先行研究

#### 1.1.1 大規模噴火に関する岩石学的研究

##### 噴火の規模

噴火の規模を表す指標の1つに火山爆発指数（VEI；Newhall and Self, 1982）がある。VEIは噴出物の量（火砕堆積物の場合は異質岩片も含む）に基づき0から8まで分類され、数字が大きいほど噴火の規模が大きくなる（図1）。

最近大規模な噴火を起こした火山を噴火年とVEIとともにいくつか例示すると、Merapi山（2010年；VEI 4）、Puyehue山（2011年；VEI 5）、樽前山（1739年；VEI 5）、Pinatubo山（1991年；VEI 6）、Tambora山（1815年；VEI 6）、鬼界カルデラ（7300年前；VEI 7）などが挙げ

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
General Description	Non-Explosive	Small	Moderate	Moderate-Large	Large	Very Large			
Volume of Tephra (m <sup>3</sup> )	1x10 <sup>4</sup>	1x10 <sup>6</sup>	1x10 <sup>7</sup>	1x10 <sup>8</sup>	1x10 <sup>9</sup>	1x10 <sup>10</sup>	1x10 <sup>11</sup>	1x10 <sup>12</sup>	
Cloud Column Height (km) Above crater Above sea level	<0.1	0.1-1	1-5	3-15	10-25	>25			
Qualitative Description	"Gentle,"	"Effusive"	"Explosive"			"Cataclysmic," "Severe,"	"paroxysmal," "violent,"	"colossal"	"terrific"
Eruption Type	Hawaiian	Strombolian		Vulcanian		Plinian		Ultra-Plinian	
Duration (continuous blast)		<1 hour		1-6 hrs	6-12 hrs		>12 hrs		
CAVW max explosivity (most explosive activity listed in CAVW)	Lava flow			Phreatic		Explosion or Nuée ardente			
Tropospheric Injection	Negligible	Minor	Moderate	Substantial					
Stratospheric Injection	None	None	None	Possible	Definite	Significant			
Eruptions (total in file)	755	963	3631	924	307	106	46	4	0

図1 現在定義されている火山爆発指数と各術語との関係。 Siebert et al. (2010) の Table 8 を引用。

られる。1991年のPinatubo噴火は、成層圏に大量のエアロゾルを放出し、その結果、全球規模の気候変動をもたらした (McCormick et al., 1995; Robock, 2002)。また、1815年のTambora噴火は、1816年にアメリカやヨーロッパに冷夏をもたらした (北米では「夏のない年」と呼ばれる; Oppenheimer, 2003)、農作物に壊滅的な被害を与えた。7300年前に鹿児島県佐多岬南西沖で発生した鬼界カルデラ形成噴火は、九州本島南域に居住していた縄文人に壊滅的な打撃を与えたとされる (例えば、新東, 1994)。一般にVEIが4以上になると「大規模噴火」とされ (Newhall and Self, 1982)、カルデラ形成を伴うことが多い。

#### 大規模噴火と低頻度大災害

世界中の火山噴火の規模と発生頻度の関係をみると、噴火の規模が大きいくほど発生頻度が下がることが以前より指摘されている (例えば、Simkin, 1993)。国内での発生頻度は、VEIが4の噴火が百年に数回程度であるのに対し、VEIが7の噴火では1万年に1回程度である (図2)。噴火頻度が高いVEIの小さな噴火では、十分な監視活動から噴火の直前に異常を捉えることが可能となり、かなりの精度で噴火の予知が行われている。また、過去の火山活動を詳細に明らかにすることで、噴火が発生した場合の活動の予測も行われるようになり、ハザードマップなどの作成も進んでいる (井村, 2003)。しかしカルデラ形成を伴うような大規模な噴火 (以後、カルデラ形成噴火) については、噴火の予知はもちろん、噴火活動とマグマ供給系の関係や大規模なマグマ溜りが形成されるプロセスといったこともほとんど理解されていない。

このような大規模噴火の発生頻度の時間尺度は、人々の実生活に比べれば極めて長く、観測や監視などのアプローチにより社会的な対応をとることは非現実的であると考えられる (鍵山, 2010; 下司, 2016)。しかし、2011年の東北日本の震災以降、長期間にわたって高い安全性を保ち、管理・保全をしなければならないインフラストラクチャ (例えば原子力発電所など) に対して、低頻度大災害による被災とその社会への影響を無視することはできないことが、近年再認識されるようになっている (下司, 2016)。

#### カルデラ形成噴火のマグマ溜り像

カルデラ形成噴火では、短時間で膨大な量のマグマが噴出するため (Lipman, 2000)、噴火前の地下には大量のマグマが蓄積された大規模なマグマ溜りが存在したと考えるのが自然であ

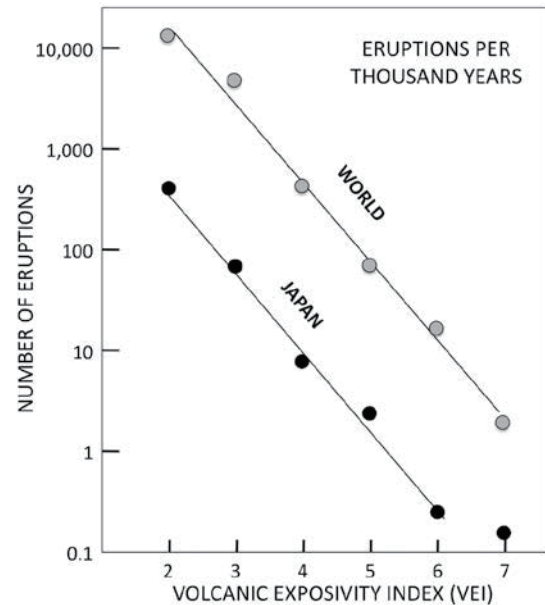


図2 世界と日本列島における噴火規模と頻度の関係。横軸の噴火規模は火山爆發指数 (VEI)、縦軸の噴火頻度は1000年当たりの回数に規格化してある。中田 (2014) がスミソニアン研究所のデータベースをもとに作成したもの。中田 (2014) の図2を引用。



る。

カルデラ形成噴火を引き起こす大規模なマグマ溜り像に関しては、近年、理解の進展が著しい。1970年代までのマグマ溜り像は、マグマで満たされた「タンク」が全体として冷却され、冷却に伴い晶出した結晶（斑晶）が「タンク」全体に浮遊しており、結晶の密度が液よりも大きい場合は沈降し、「タンク」の底にキュムレイトを形成するというものであった（高橋，2008）。この古典的なマグマ溜り像では、液体状のマグマが溜まった部分（magma chamber）とその周囲にある母岩（地殻）は、比較的明瞭な壁（物性の不連続）で仕切られている（東宮，2016）。1980年代以降になると、「タンク」の壁面沿いに冷却固化が進み、結晶の集合体からなる rigid crust が形成されるが、「タンク」の内部は冷却が緩慢であるため、ほとんど結晶が晶出しないというマグマ溜り像が確立された（高橋，2008）。また、マグマ溜り内における結晶分化作用のイメージも、結晶の重力沈降により分化したマグマが天井部へ集積するといったものから、境界層対流、すなわち壁面で晶出した結晶の粒間に生じたメルトが浮力によりタンクの天井部に集積するものへと変化した（高橋，2008）。境界層対流によるマグマ分化では、上位に低密度の分化マグマ、下位に高密度の未分化マグマが重なる成層マグマ溜り（zoned magma chamber）が形成される（例えば McBirney et al., 1985）。近年では、マグマ溜りの大部分はマッシュ状（結晶含有量が40-50%以上）であり、クリスタルマッシュからのメルト抽出モデル（Bachman and Berganz, 2004, Bachmann and Berganz, 2008; Marsh, 2015 など）が定着している。マグマ溜りの熱的構造を考えると、地殻（母岩）との境界は結晶度が50-100%に連続的に変化しており、古典的なマグマ溜りで想定されていたような壁のようなものは存在しない（東宮，2016）。大規模噴火では、メルト抽出によって形成されたと考えられる斑晶の乏しい分化の進んだ流紋岩質マグマの噴出（例えば Long valley カルデラの Bishop tuff 噴火; Hildreth and Wilson, 2007; 図3）だけでなく、大量の斑晶（40-60 vol.%）を含むデイサイト質マグマが噴出することもあり（例えば La Garita カルデラの Fish Canyon Tuff: Whitney and Stormer, 1985; Bachmann et al., 2002 など）、これらはクリスタルマッシュがそのまま噴出したものだと考えられている。

#### カルデラ形成噴火のマグマ蓄積過程

個々の火山において大量のマグマが蓄積するためには、マグマ供給率が增大する、あるいはマグマ供給率が一定の場合は長い蓄積時間すなわち活動休止期間が必要である。Trial and Spera (1990)

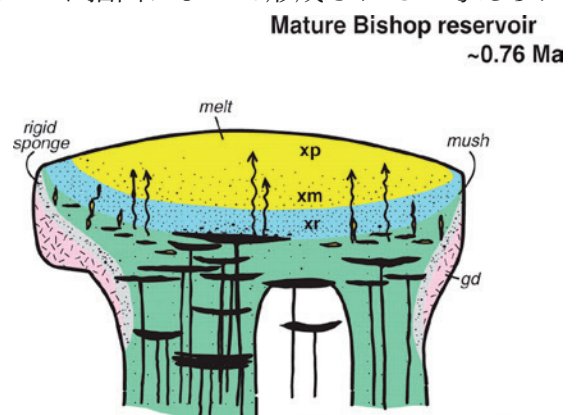


図3 Long Valley カルデラの Bishop tuff 噴火のマグマ溜りモデル(概念図)。クリスタルマッシュから流紋岩質メルトが抽出され、マグマ溜り上部に溜まる。黒色の岩脈とレンズ状の部分は、上部地殻に貫入した苦鉄質マグマを示している。xp= 結晶に乏しい部分 (0-6%), xm= 中間的な結晶量をもつ部分 (12-25%), xr= 結晶に富む部分 (25-55%), gd= 花崗岩体部。Hildreth and Wilson (2007) の Fig. 18 を一部引用。

は、大規模な珪長質火山活動におけるマグマ噴出量、活動休止期間、平均噴出率の関係を調べ、噴出量と活動休止期間の間には正の相関関係があることを示した。十和田火山を例に見てみると、カルデラ形成期の大規模な火砕流噴火の前には1万年以上の静穏な時期が続くのに対し、後カルデラ期にあたる最近1万年間は、千年単位で頻繁に噴火を起しており、個々の噴火の噴出量も小さい (Hayakawa, 1985)。

カルデラ形成噴火を引き起こすマグマシステムの全体像は、マンツルの部分溶融による苦鉄質マグマの生成、下部地殻に貫入した苦鉄質マグマの結晶分化作用や周辺の下部地殻物質の部分溶融による珪長質メルトの生成、発生したメルトの分離・上昇、上部地殻への集積あるいは異なる組成のマグマ混合といった現象が起こる、地殻全体に広がる巨大で複雑なシステムであると考えられる (下司, 2016; 図4)。また、長期間にわたって珪長質マグマシステムが維持される場合、マグマ溜りを閉鎖系で考えると、マグマ溜りを固化させずに維持することは困難であり、大規模カルデラのマグマシステムには、深部から絶えずマグマ (および熱) が供給されていると考えられる (高橋, 2008)。大規模噴火の活動の場を理解するためには、マグマ溜りだけでなく地殻全体に広がるマグマ供給系についての視点を持つことが重要である (下司, 2016)。

#### カルデラ形成噴火のトリガー

カルデラ形成噴火に必要なマグマが溜まっても、マグマが安定に存在している場合には噴火は発生せず、噴火の発生にはマグマの不安定化が起こる必要がある (東宮, 2016)。これに関しては、多くの火山で、新たなマグマ (特に高温の苦鉄質マグマ) の供給が噴火のトリガーとなることが知られている (例えば, Sparks et al., 1977; Pallister et al., 1992; Tomiya and Takahashi, 1995 など)。

新たなマグマの供給が噴火を開始させるメカニズムには、いくつかのパターンがある。1つは、マグマ溜りへの新たなマグマの供給により内部の過剰圧が大きくなり、火道を形成するのに必要な応力が発生し、通路を形成するというものである。大規模な噴火の場合には、新たなマグマの供給量が相当大きくないと、噴火開始に必要な過剰圧に達することはできない (東宮, 2016)。また、低温のマッシュ状マグマ溜り内へ高温の苦鉄質マグマが注入し、結晶量の少ない安山岩質マグマが生じ、さらに苦鉄質マグマの供給が続くことで重力不安定に達し、マグマ

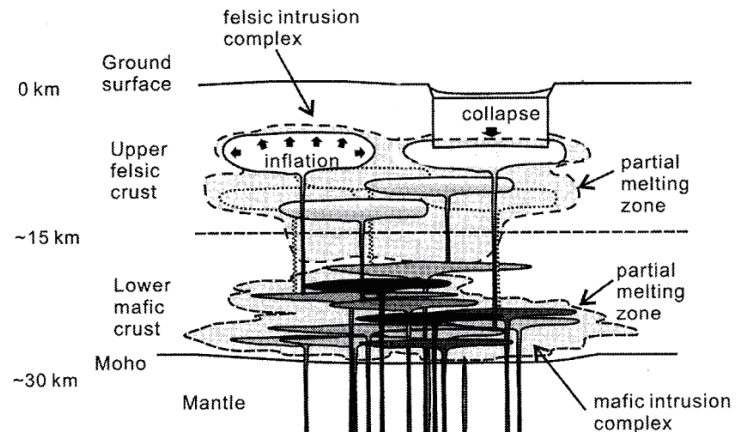


図4 巨大な珪長質マグマシステムにおけるマグマ供給系モデルの概念図。下司 (2016) の Fig. 3 を一部引用。

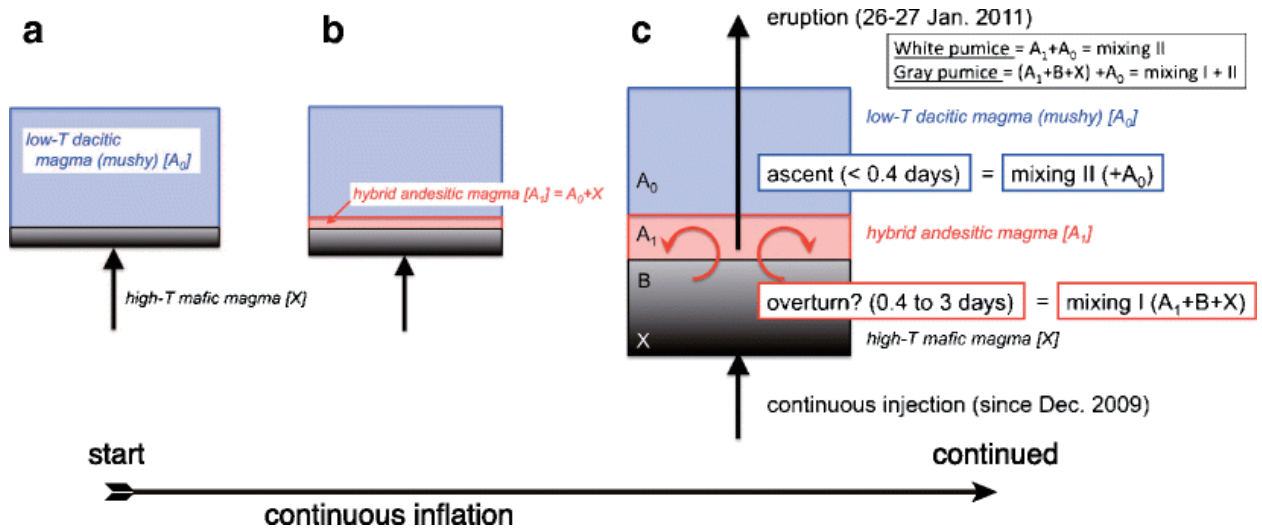


図5 2011年に新燃岳を噴火させる前のマグマ混合プロセスの模式図 (Tomiyama et al., 2013 の Fig. 12 を引用). a: 2009年12月から低温のデイサイト質マッシュ状マグマ ( $A_0$ ) からなるマグマ溜りに高温の苦鉄質マグマ ( $X$ ) が注入した. b: 苦鉄質マグマの注入が続き, 苦鉄質マグマによって低温のマグマが加熱と再熔融されることで, 境界付近に安山岩質の混合マグマ ( $A_1$ ) が形成された. さらに苦鉄質マグマの注入が続き, 混合マグマの量が増加することで重力不安定に達し, マグマ溜り内でオーバーターンを起こし,  $A_1$ ,  $B$ ,  $X$ 間のマグマ混合を伴いながら, 準プリニー式噴火を起こした.

の上昇と噴火が開始する場合もある (例えば霧島山新燃岳 2011年噴火; Suzuki et al., 2013, Tomiyama et al., 2013; 図5). あるいは, 地下深部から供給されたマグマの減圧発泡によって, マグマの密度低下と重力不安定化が引き起こされ, 噴火が開始する場合もある (Ruprecht et al., 2008).

このように, マグマの供給から噴火に至るまでには様々なプロセスが考えられるため, 大規模なマグマ溜りがどのように活性化し, 噴火に至るかといった噴火の駆動メカニズムを理解することが必要である. 特に, 珪長質マグマと苦鉄質マグマがどのように相互作用するかを岩石学的データから明らかにすることが重要である.

### 1.1.2 研究対象と先行研究

本研究では, カルデラ形成噴火の噴火準備過程とマグマ供給系を明らかにするために, 福島県の沼沢火山を対象とした. 沼沢火山は, 11万年前に活動を開始して以来, 流紋岩~デイサイト質マグマを主体とした溶岩噴火と火砕噴火を繰り返し, 5400年前の火砕噴火 (沼沢湖火砕噴火) によりカルデラ (現在の沼沢湖) が形成された.

沼沢火山の噴火史は, 山元らの一連の研究により, 各噴火のマグマ噴出量や噴火年代が明らかにされている (山元, 1995, 2003; 山元・駒澤, 2004; 山元・長谷部; 2014). それらにより, 沼沢火山の噴出物を噴出年代・マグマ噴出量 (DRE; Dense Rock Equivalent マグマ換算体積) とともに整理すると, 尻吹峠火砕堆積物 (110 ka; 約  $0.7 \text{ km}^3$ ), 木冷沢溶岩 (71 ka; 約  $0.1 \text{ km}^3$ ), 水沼火砕堆積物 (53 ka; 約  $1 \text{ km}^3$ ), 惣山溶岩 (43 ka; 約  $0.3 \text{ km}^3$ ), 前山溶岩 (24 ka; 約  $0.3 \text{ km}^3$ ), 沼沢湖火砕堆積物 (5.4 ka; 約  $2 \text{ km}^3$ ) である. 5.4 kaの噴火が沼沢火山の中で最も大規模な噴火であり (VEI 5), この噴火によりカルデラ (現在の沼沢湖) を

形成した。

沼沢火山の11万年間の総マグマ噴出量は約 $5 \text{ km}^3$  (DRE) で、1回の噴出量が $100 \text{ km}^3$ を超えるような南九州の大型カルデラ群に比べると (Nagaoka, 1988), 沼沢火山のマグマ噴出率は2桁以上小さい (山元, 2003). 同じ東北日本の十和田カルデラ (5.5万年間で約 $60 \text{ km}^3$  DREの珪長質マグマを噴出; Hayakawa, 1985) と比較しても、沼沢火山のマグマ噴出率は1/20程度である (山元, 2003). このようなマグマ噴出率の低い火山において、なぜ大規模なカルデラ形成噴火が発生したのかは興味深い。

山元 (2003) は沼沢火山におけるマグマ噴出量の時間変化に注目し、前半6万年間で約 $1 \text{ km}^3$  (DRE) の噴出量であったものが、後半5万年間で残りの $4 \text{ km}^3$  (DRE) のマグマを噴出しており、マグマ噴出量が徐々に増加していることを指摘している (図6).

沼沢火山のマグマの成因については、Yamamoto (2007) による研究がある。Yamamoto (2007) では、珪長質マグマの全岩主・微量成分含有量と Sr・Nd 同位体組成から、活動期間中に噴出した珪長質マグマが同一の起源物質 (下部地殻の角閃岩) に由来していること、また、活動期が進むにつれて部分溶融度が増加していることを明らかにしている。

沼沢火山のカルデラ形成噴火は、他のカルデラ形成噴火と比較すると小規模であるが、噴火年代が若く、堆積物が良好に残存している。また、堆積物中には多様な本質物が見られることが特徴であり、増渕・石崎 (2011) は、沼沢湖火砕堆積物の構成物組成、全岩化学組成、鉱物化学組成の分析から、カルデラ形成噴火では規模の大きなデイサイト質マグマと2種類の苦鉄質マグマが噴出したこと、デイサイト質マグマ中に2種類の苦鉄質マグマが異なるタイミングで注入したことが、噴火のトリガーと噴火様式を推移させる原因となったことを明らかにしている。

## 1.2 本研究の目的と構成

沼沢火山は、先カルデラ火山活動期の噴出物が良好に残存し、上で述べたように、各噴火のマグマ噴出量や噴火年代が明らかにされているため (山元, 1995, 2003; 山元・駒澤, 2004; 山元・長谷部, 2014), カルデラ形成噴火を起こしたマグマ溜りの形成過程を岩石学的に検討できる貴重な素材となっている。また、カルデラ形成噴火では、噴火様式の推移とマグマ供給系との関係が詳細に明らかにされており (増渕・石崎, 2011), マグマの蓄積過程から噴火に至るまでのメカニズムを明らかにできると考えられる。

本論では、1) 沼沢火山の11万年間の噴火活動

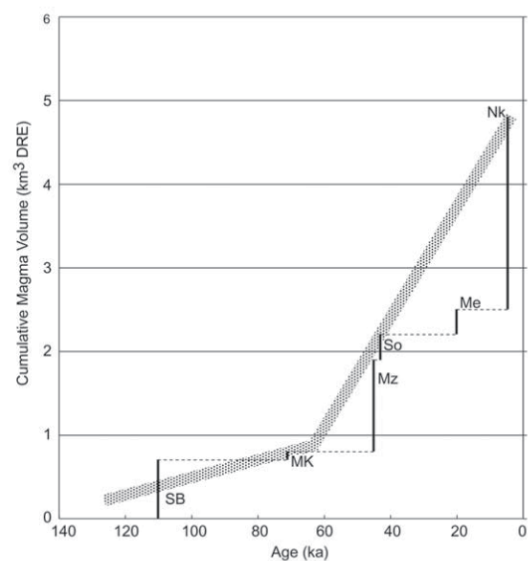


図6 沼沢火山のマグマ噴出量時間積算図。山元 (2003) の図10を引用。

---

を対象とし、噴出物の岩石学的研究から、活動の主体となった珪長質マグマの進化について明らかにする、2) 沼沢湖火砕噴火で噴出した多様な本質物から、マグマ溜りの内部構造について詳細に明らかにするとともに、カルデラ形成噴火のトリガーとなった苦鉄質マグマとの混合と噴火開始条件について述べる。

1) は増渕ほか(2016)として発表したものである。本論の第4章では増渕ほか(2016)を引用し、そこに若干のデータと考察を加え述べる。第5章では、2) は増渕・石崎(2011)として発表したものをベースに、増渕・石崎(2011)では触れなかった斑晶量の異なる多様な軽石の岩石学的研究を加え、沼沢湖火砕噴火のマグマ供給系について述べる。第6章では、それらを総括して、増渕ほか(2016)を一部引用し、沼沢火山のマグマ供給系とカルデラ形成噴火に至る中～長期的な準備過程について述べる。



## 第2章 沼沢火山の地質

### 2.1 基盤地質および火山地形

沼沢火山は、福島県西部、東北日本の火山フロントから 50 km 背弧側に位置する小型の活火山である（山元，2003；図7）。沼沢火山が位置するのは、後期中新世に出現した構造的な内陸山間盆地である会津盆地と布沢盆地の間の隆起帯であり、この隆起帯上には、後期中新世以降のカルデラ火山（古い方から、いりやまさわ入山沢カルデラ；7.1 Ma、たかがわ高川カルデラ；6.5–6.3 Ma、じょうのいりさわ城入沢カルデラ；4.2–4.1 Ma、うわいぐさ上井草カルデラ；3.0–2.9 Ma、おのひわだ小野カルデラ；1.4 Ma、とう塔のへつりカルデラ；1.3–1.2 Ma、なりおか成岡カルデラ；1.1 Ma、砂子原カルデラ；0.3 Ma、沼沢カルデラ；5.4 ka）が集中し、カルデラ火山群を形成している（図8；山元・駒澤，2004）。これらのカルデラ火山が分布する山地の隆起は、一連のカルデラ形成に先行し、約 10 Ma に開始した（山元，1992）。

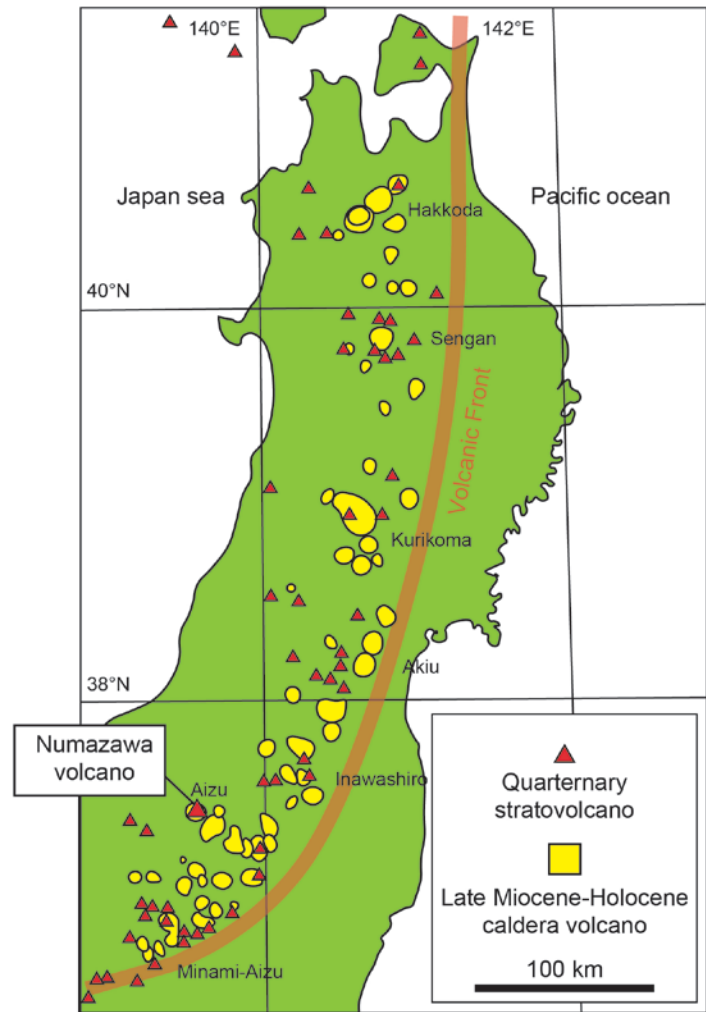


図7 東北日本の後期更新世～第四紀カルデラ火山の分布（Yamamoto, 2011 に加筆）。

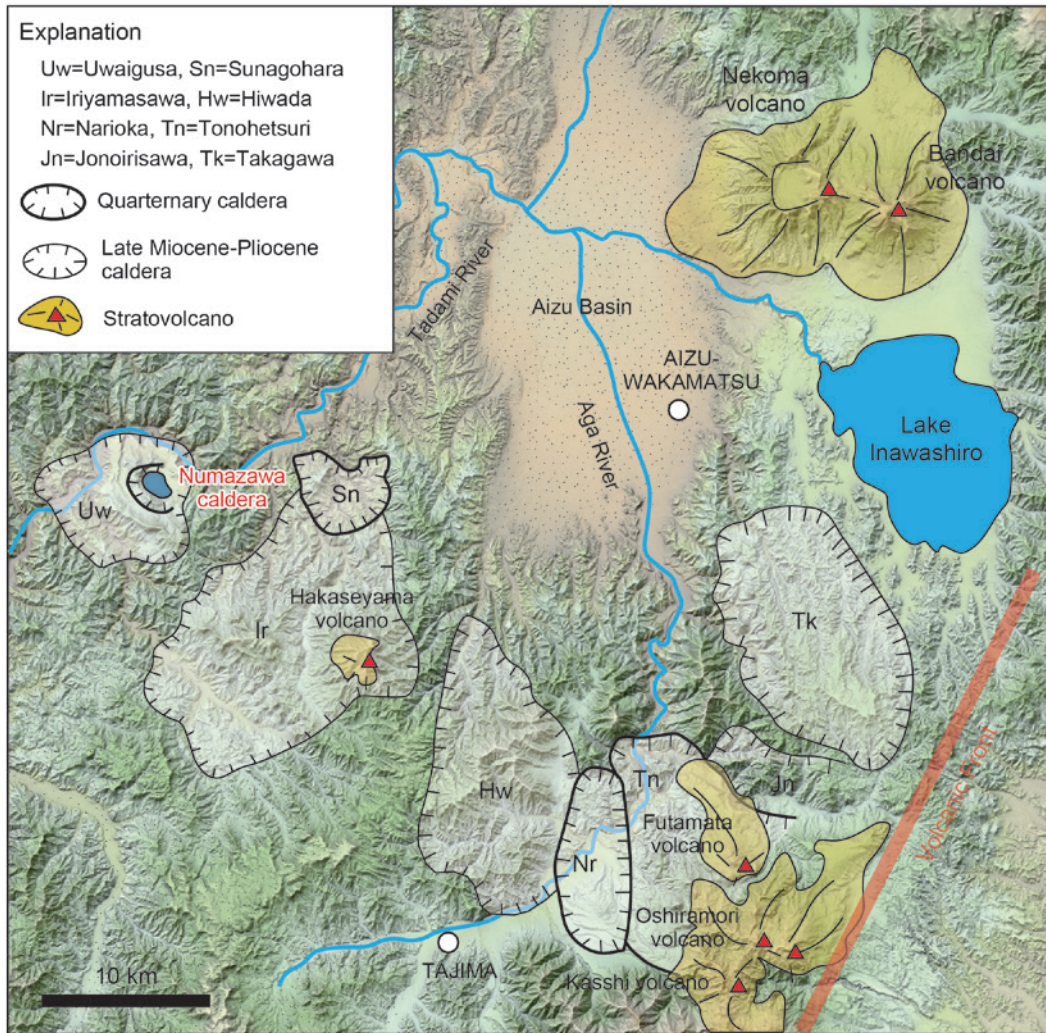


図8 沼沢火山とその周辺のカルデラ火山の位置図（山元，1992 に加筆）．背景にはカシミール3Dにより山旅倶楽部の地図を使用した．

## 2.2 沼沢火山の噴火史

沼沢火山の基盤は，中期中新世の滝沢川層（流紋岩質火山噴出物および泥岩），鮮新世の上井草層（流紋岩質火砕流堆積物および岩屑なだれ堆積物）と会津金山火山岩（安山岩～デイサイト質火山噴出物）からなる（山元・駒澤，2004；図9，10）．沼沢火山の活動史は，山元氏の一連の研究によりその全容がほぼ解明されている（山元，1995，2003，2014；山元・駒澤，2004）．これらの研究によると，沼沢火山の活動は110 kaの火砕噴火に始まり，その後は火砕噴火と溶岩噴火を繰り返す，5.4 kaにVEI 5のカルデラ形成噴火を起こした．沼沢火山の噴出物を噴出年代とマグマ噴出量（DRE）とともに整理すると，下位から順に，尻吹峠火砕堆積物（110 ka；約0.7 km<sup>3</sup>），木冷沢溶岩（71 ka；約0.1 km<sup>3</sup>），水沼火砕堆積物（53 ka；約1 km<sup>3</sup>），惣山溶岩（43 ka；約0.3 km<sup>3</sup>），前山溶岩（24 ka；約0.3 km<sup>3</sup>），沼沢湖火砕堆積物（5.4 ka；約2 km<sup>3</sup>）に区分される（図10）．本論では，各噴出物を形成した噴火を，尻吹峠火砕噴火，



木冷沢溶岩噴火，水沼火砕噴火，惣山溶岩噴火，前山溶岩噴火，沼沢湖火砕噴火と呼び，尻吹峠火砕噴火～前山溶岩噴火の活動を先カルデラ期，沼沢湖火砕噴火をカルデラ形成期とする。

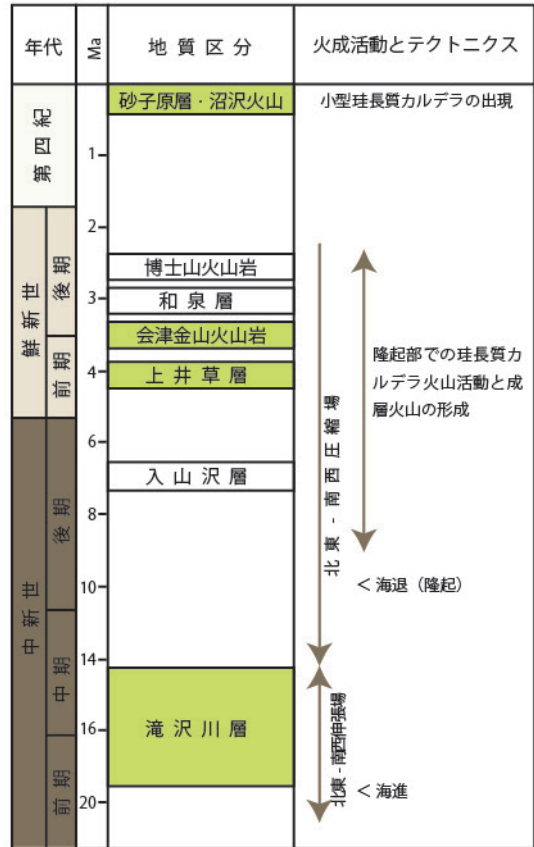


図9 沼沢火山周辺の地質総括図。山元・駒澤（2004）の第2.2図を一部改変し引用。黄緑色の地層が沼沢火山の基盤。

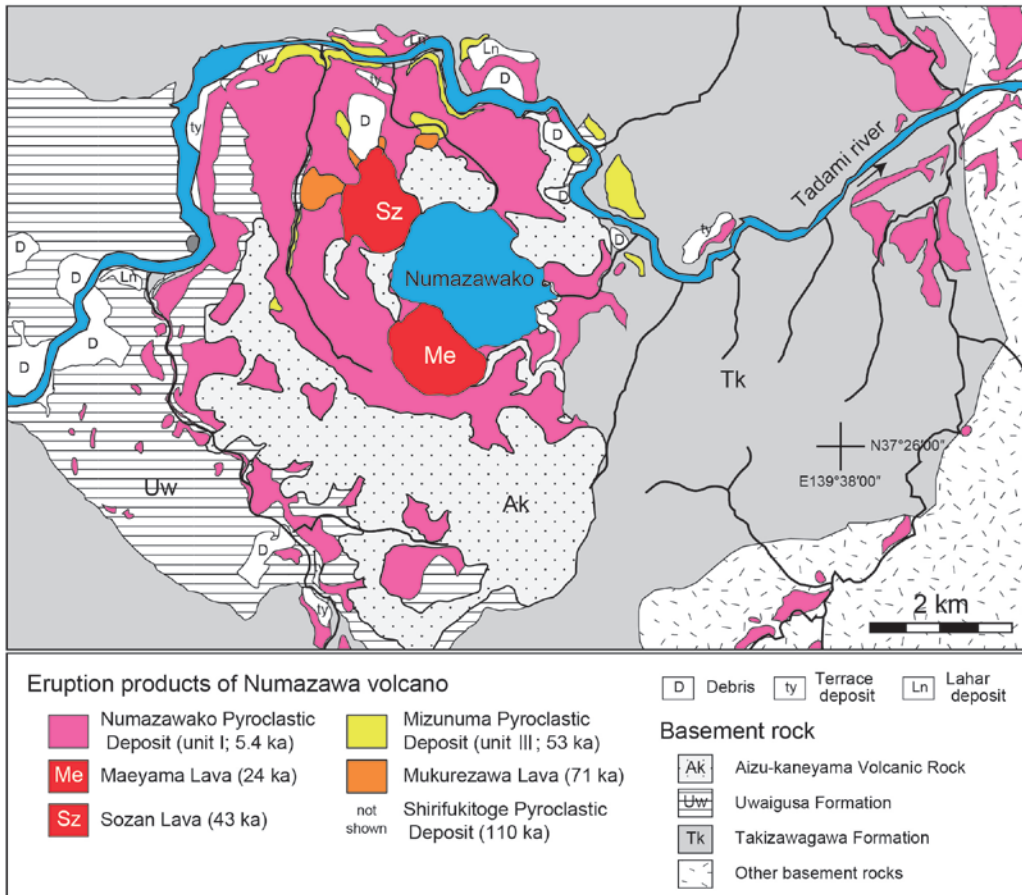


図10 沼沢火山の地質図（山元・駒澤，2004を一部簡略化）。噴火年代は山元（2003）と山元・長谷部（2014）に従った。

## 2.3 地質各論

沼沢火山の各噴火期の噴出物について、先カルデラ期は主に山元・駒澤（2004）を、カルデラ形成期は増渚・石崎（2011）を引用し、その産状と年代について述べる。全体的な傾向として、火砕堆積物は沼沢湖周辺および只見川沿いに分布し、定置様式の異なる複数の噴出物ユニットからなる。また、溶岩はいずれも沼沢湖付近に溶岩ドームを形成して分布する（山元・駒澤，2004）。

### 2.3.1 尻吹峠<sup>しりふきとうげ</sup>火砕堆積物（110 ka）

給源付近での露出は、模式地である尻吹峠の林道沿いの切り割り露頭（図 11）のみである（山元・駒澤，2004）。尻吹峠では層厚 1.7 m の流紋岩質火砕サージ堆積物で、鮮新世の会津金山火山岩を不整合に覆い、土壤風成層を挟んで水沼火砕堆積物に覆われる（山元・駒澤，2004）。沼沢湖東方の会津盆地周辺では降下軽石堆積物として産し、沼沢芝原テフラ（鈴木ほか，1998）と呼ばれる。沼沢湖周辺では露頭の保存状況が悪いため、尻吹峠火砕堆積物と沼沢芝原テフラの上下関係は不明である（山元・駒澤，2004）。

鈴木ほか（1998）により、沼沢芝原テフラから 110 ± 20 ka のフィッシュントラック年代値が報告されている。沼沢芝原テフラの上位には御岳第一テフラ（11–9 万年前；松本・宇井，1997）、阿蘇 4 テフラ（約 9 万年前；Matsumoto et al., 1989）があること、下位には田頭テフラ（13.5–12.5 万年前；鈴木，1999）があり、層序学的にも概ね一致する（山元，1999）。

### 2.3.2 木冷沢<sup>むくれざわ</sup>溶岩（71 ka）

主に沼沢湖の中心から 2.4 km 北西に小規模な溶岩ドーム（標高 652.5 m，基底からの比高約 130 m）として分布するほか、2 km 北にいくつかの小丘として分布する（図 10）。流紋岩のガラス質塊状溶岩からなり、惣山山頂付近では、酸化した赤褐色の溶岩が角礫岩化している（山元・駒澤，2004）。層序関係を露頭で観察することはできないが、地形的には惣山溶岩の下位に位置する（山元・駒澤，2004）。

本溶岩は、溶岩中のジルコンのフィッシュントラック年代により、71 ± 16 ka とされる（山元，1999）。

### 2.3.3 水沼<sup>みずぬま</sup>火砕堆積物（53 ka）

山元・駒澤（2004）によると、下位より水蒸気噴火堆積物（ユニット I）、プリニー式噴火堆



図 11 尻吹峠火砕堆積物の露頭（金山町川口）。

積物（同II）、火砕流堆積物（同III）からなる。

ユニットIおよびIIは、沼沢湖周辺から東部にかけて、後期更新世以前の斜面堆積物を覆う風成層中に薄く見出され、遠方では磐梯火山や安達太良火山の噴出物の間の風成層中にも確認されている（山元・須藤，1996；山元・坂口，2000）。

ユニットIは白色粘土質火山灰の基質に粗粒～細粒火山礫の異質岩片を多く含む淘汰の極めて悪い塊状の降下火砕堆積物で、層厚は沼沢湖周辺で40 cm以上、20 km東方でも数 cmである（山元・駒澤，2004）。

ユニットIIは、逆級化構造をもつデイサイト軽石の細粒～粗粒火山礫降下堆積物からなる（山元・駒澤，2004）。沼沢湖東方では層厚1 m以上で、径10 cm以上の軽石を含む。猪苗代湖周辺では層厚約16 cmで、4 mm以下の軽石を含む（山元・駒澤，2004）。

ユニットIIIは、只見川沿いに厚く堆積し、給源から6 km以内で確認できる（山元・駒澤，2004）。ユニットIIを直接覆い、模式地（金山町水沼の只見川右岸）での層厚は約100 mで、径15 cm以下のデイサイト軽石に富む（山元・駒澤，2004）。只見川沿いでは基底部数 mを除き溶結しており（山元・駒澤，2004）、柱状節理の発達した岩壁を作っている（図12）。

年代は、水沼火砕流堆積物の堰き止めにより形成されたと考えられる湖成堆積物中の化石樹幹の放射性炭素年代値、地層の上位に大山倉吉テフラが存在することから、53 kaとされる（山元・長谷部，2014）。

#### 2.3.4 惣山溶岩（43 ka）

沼沢湖北西に底径約1 kmの溶岩ドーム（最高点は標高816 mの惣山）を形成して分布する（図13）。上位と下位の層序関係を確認することはできないが、地形的に木冷沢溶岩の上位に位



図12 水沼火砕堆積物（ユニットIII）の露頭（三島町早戸）。2012年には工事が進み、露頭の観察はできなくなっていた。



図13 沼沢湖畔キャンプ場（金山町大栗山荒浜）から見た沼沢湖と前山および惣山。

置する（山元・駒澤，2004）。デイサイトの塊状溶岩からなり，石基が灰白色のものと薄い茶褐色のものがあり，後者は斑晶の酸化や不透明化の程度が強い（山元・駒澤，2004）。本溶岩には径 15 cm 以下の暗色包有物がまばらに含まれる（山元・駒澤，2004）。

溶岩中に含まれるジルコンから  $43 \pm 13$  ka のフィッシュトラック年代値が報告されている（山元，2003）。

### 2.3.5 前山溶岩（24 ka）

沼沢湖南西に底径約 1.5 km の溶岩ドーム（最高点は標高 835 m の前山）を形成して分布する（図 13）。上位と下位の層序関係は確認できないが，地形的には会津金山火山岩を覆う（山元・駒澤，2004）。デイサイトの塊状溶岩からなり，前山山頂北東の沼沢湖湖岸で良好に露出する。

前山溶岩に先行した水蒸気爆発（あるいはマグマ水蒸気爆発）で形成されたと考えられている沼御前火砕堆積物中の木片から  $19,980 \pm 150$  yBP の放射性炭素年代が得られており，前山溶岩も 20 ka に噴出したものと考えられている（山元・駒澤，2004）。本論では Yamamoto (2007) による 24 ka を用いる。

### 2.3.6 沼沢湖火砕堆積物（5.4 ka）

下位より火砕流堆積物（ユニット I），降下軽石堆積物（同 II），マグマ水蒸気噴火堆積物（同 III），降下スコリア堆積物（同 IV）からなる（山元・駒澤，2004）。

ユニット I の主要な堆積物は塊状で非溶結の火砕流堆積物であり，広範囲に分布する薄い成層サージ相を伴う（山元，1995，2003）。火砕流噴火の前半に噴出した大規模火砕流は，只見川とその支流に沿って最長で 25 km 流走した（山元，1995）。これらの大規模火砕流の堆積物は少なくとも 2 層のフローユニットからなる。各フローユニットの層厚は最大 50 m に達し，只見川とその支流を厚く谷埋めして堆積している（図 14 左）。一方，火砕流噴火の後半には小規模な火砕流が発生し，その堆積物はカルデラ近傍（カルデラから約 5 km 以内）で大規模火砕流堆積物を覆って堆積した。これらの小規模火砕流の堆積物は，層厚数 10 cm から約 5 m



図 14 沼沢湖火砕堆積物の火砕流堆積物（ユニット I）の露頭。左）大規模火砕流堆積物（金山町水沼）小規模火砕流堆積物（三島町大石田）。

の複数のフローユニットからなり、主に現在の地形的高所（標高 380 m 以上）に分布する（図 14 右）。ユニット I の主要な構成物は軽石（軽石由来の結晶を含む）と基盤由来の流紋岩～デイサイト質の異質岩片であり、少量の黒色スコリア（軽石と混交した不均質スコリアを含む）を伴う。

ユニット II は淘汰の良い降下火砕堆積物である。本ユニットの主要な構成物は軽石と異質岩片であり、少量の黒色スコリア（軽石と混交した不均質スコリアを含む）を伴う。給源付近（図 15）では層厚約 140 cm であり、最大径 15 cm の軽石と異質岩片が見られる。

ユニット III は、沼沢湖東岸に分布する火砕サージ堆積物とカルデラ東方に分布する降下火砕堆積物からなる（山元, 1995, 2003）。降下火砕堆積物は、軽石、スコリアおよび異質岩片の細粒火山礫～火山灰から構成される。給源の東 8 km（図 16）では 26 枚のフォールユニットが確認できる。ここでは総層厚が 1.5 m、各フォールユニットの層厚は 3–22 cm である。

ユニット IV は、灰～黒色のスコリアラピリを主要な構成物とする逆級化した降下火砕堆積物であり、単一のフォールユニットからなる。スコリアの最大径は、給源近く（図 16）では 8 cm である。個々のスコリア粒子は、表面が細粒火山灰の皮膜に覆われている。なお、ユニット IV には軽石（軽石由来の結晶を含む）や異質岩片がほとんど含まれず、その存在比は数%未満である。

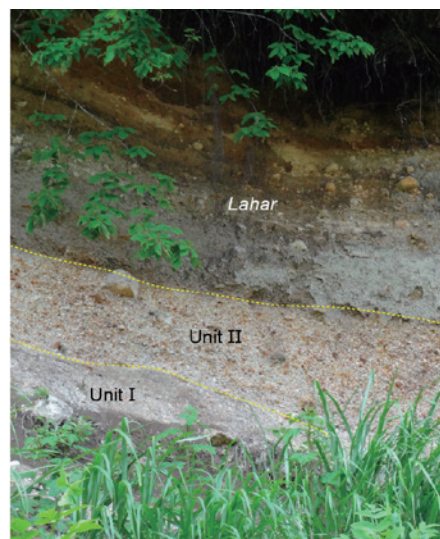


図 15 沼沢湖火砕堆積物の降下軽石堆積物(ユニット II) (金山町大栗山).

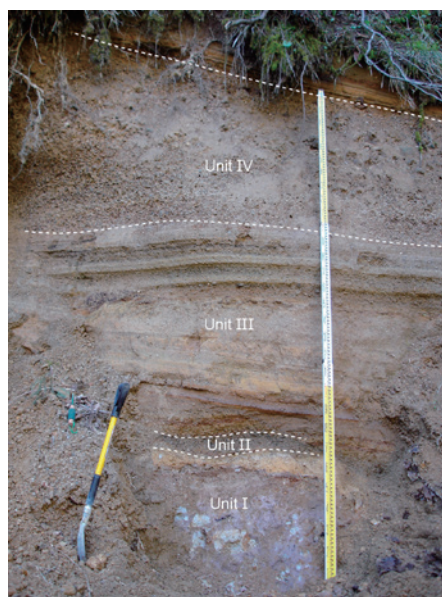


図 16 沼沢湖火砕堆積物のユニット I から IV が露出する露頭 (三島町大谷).



## 第3章 分析試料および分析方法

### 分析試料

本研究で分析に用いた噴出物の試料採取地点を図17に示す。尻吹峠火砕堆積物からは、全岩化学組成分析に供することのできる大きさの本質物が得られなかったため、堆積物中に含まれる細粒火山礫サイズの軽石（最大径10 mm）を用いて薄片記載・モード測定および鉱物組成分析のみを行った。水沼火砕堆積物については、ユニットIIIから火山岩塊サイズの本質物を採取した。溶岩については、苦鉄質包有岩を伴う場合（惣山溶岩と前山溶岩）には、ホスト溶岩とともに苦鉄質包有岩試料も採取した。

沼沢湖火砕堆積物中に含まれる軽石には、斑晶量の異なる3タイプの軽石（斑状の白色軽石、斑晶に乏しい軽石、微斑晶に富む軽石）が見られる。沼沢湖火砕噴火の初期に発生した大規模火砕流堆積物の露頭（図17、露頭Nk-F）と、その上位の小規模火砕流堆積物の露頭（図17、露頭Nk-H）から、20 mm以上の軽石をそれぞれ1176個、838個採取し、軽石のタイプ分けを行った。

### モード組成分析

各噴火期の代表的な試料を研磨薄片にし、透過・反射両用偏光顕微鏡を用いてモード組成分析を行った。斑晶と石基の量は透過光を用い40倍で2000ポイントを測定し、気泡の量は反

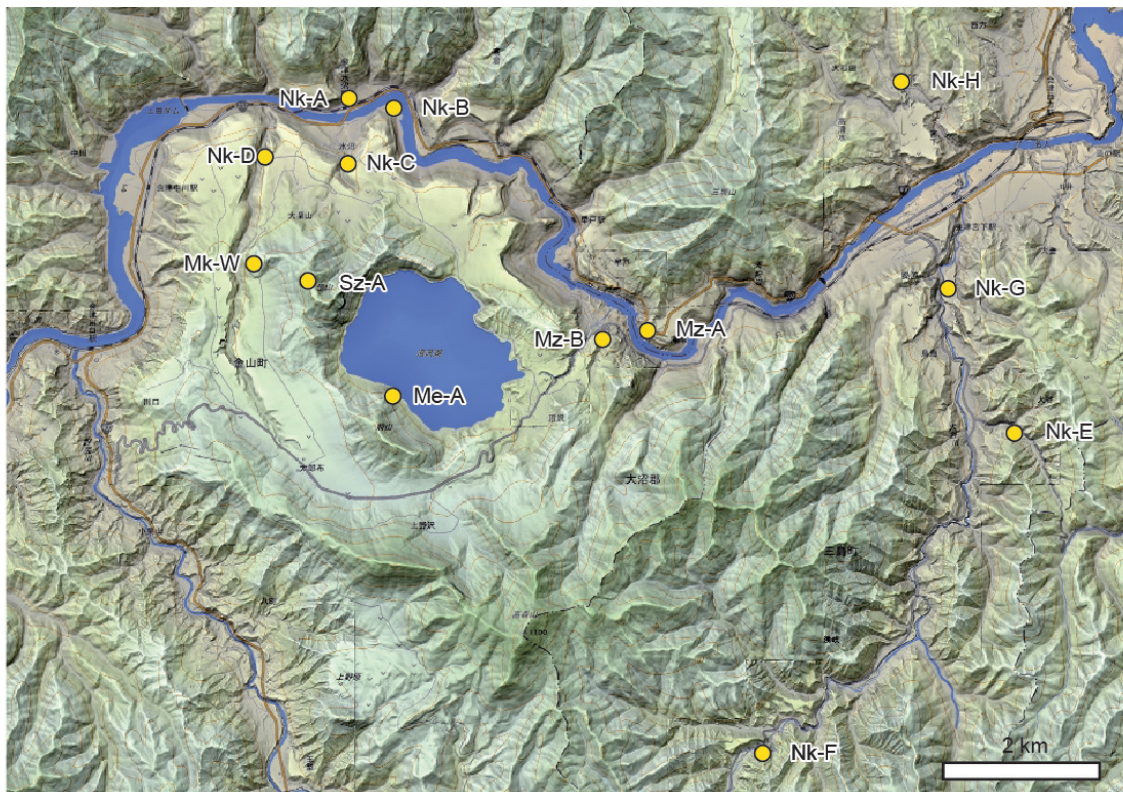


図17 本研究で使用した代表的なサンプルの採取地点。Sr=尻吹峠火砕堆積物，Mk=木冷沢溶岩，Mz=水沼火砕堆積物，Sz=惣山溶岩，Me=前山溶岩，Nk=沼沢湖火砕堆積物の採取地点であることを示している。露頭位置の緯度経度は付録（Appendix 1）に示した。

射光を用い 100 倍で 1000 ポイントを測定した。

なお、沼沢火山の珪長質な噴出物は明瞭な斑状組織をもち、斑晶鉱物と石基組織は 0.1 mm を境に区分される。本論では 0.1–0.3 mm の結晶を微斑晶、0.3 mm 以上の結晶を斑晶と呼び、石基中に含まれる長径 0.1 mm 未満の結晶をマイクロライトと呼ぶ。モード測定では、長径 0.3 mm 以上の斑晶を測定した。ただし、沼沢湖火砕噴火で噴出した微斑晶に富む軽石は、珪長質な噴出物の斑晶サイズの結晶をほとんど含まず、微斑晶を大量に含むことが特徴であるため、斑晶と微斑晶サイズの結晶の量をわけて測定し、その合計値を斑晶量とした。苦鉄質包有岩は、典型的な斑状組織をもたないため、モード測定では 0.1 mm 以上の結晶の量を測定した。本論では、珪長質な噴出物の斑晶量と苦鉄質包有岩の結晶量は、気泡量を除いた値で示す。

### 全岩化学組成分析

全岩化学組成（主成分および微量成分として Rb, Sr, Nb, Y, Zr, V, Ba）は、富山大学自然科学研究支援センターの XRF (PHILIPS 社製 PW2404R) を用い分析した。分析に供したのは、先カルデラ期の木冷沢溶岩 10 試料、水沼火砕流堆積物中の軽石 11 試料、惣山溶岩 13 試料（ホスト溶岩 9 試料、苦鉄質包有岩 4 試料）、前山溶岩 13 試料（ホスト溶岩 8 試料、苦鉄質包有岩 5 試料）とカルデラ形成期である沼沢湖火砕堆積物中の軽石 37 試料（斑状の白色軽石 23 試料、斑晶に乏しい軽石 7 試料、微斑晶に富む軽石 7 試料）、黒色スコリア 27 試料、灰色スコリア 11 試料である。主・微量成分組成については、無水四ホウ酸リチウムにより 1:5 に希釈したガラスビードを用いて測定した。測定方法と条件は、矢島ほか(2001)と Terashima (1977) に従った。分析精度については Ishizaki et al. (2009) を参照されたい。

全岩化学組成（主成分・微量成分）を行った試料のうち、各噴火期の噴出物組成を代表するサンプルを選定し、Activation Laboratories（カナダ）に依頼し、誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS) により、主成分および希土類元素 (REE) を含む微量成分組成の測定を行った。なお、沼沢湖火砕堆積物中の微斑晶に富む軽石と灰色スコリアのサンプルは、細粒火山礫サイズで、XRF による全岩化学組成分析を行ったものと同じサンプルで分析を行うことができなかつたため、異なるサンプルを分析に供した。

ICP-MS による分析を行った 20 試料は、Sr および Nd 同位体組成も測定した。同位体組成分析試料の前処理は、Ganio et al. (2012) を一部改変した方法を用いた。Sr 同位体組成については、2014 年 3 月に北海道大学理学部の表面電離型質量分析計 (MAT262) を使用し、Orihashi et al. (1998) を一部改変した手法により測定した。同位体比測定における質量分別は  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$  で内部補正した。試料と同時に測定した Sr 同位体の標準試料 (NIST SRM987) は  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710212 \pm 0.000004$  ( $2\sigma$ ,  $n=5$ ) である。Nd 同位体組成については、2015 年 1 月に同大学設置のマルチコレクター型 ICP-MS (NEPTUNE plus) を用いて測定した。同位体比測定における質量分別は  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$  で内部補正し、さらにスタンダードブラケット法を適用し、試料と同時に測定した Nd 同位体の標準試料 JNdi-1 の



$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比 (0.512117) を用いて規格化した。なお、同時に測定した岩石標準試料 (JB-3) は  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.513065 \pm 0.000002$  ( $2\sigma$ ,  $n=3$ ) である。

石基ガラス組成分析

富山大学自然科学研究支援センターの波長分散型 EPMA (JEOL JXA-8230) を用い、沼沢湖火砕堆積物中の軽石 (斑状の白色軽石, 斑晶に乏しい軽石, 微斑晶に富む軽石) の石基ガラス組成を分析した。分析条件は加速電圧 15 kV, 電流値は 10 nA, ビーム径は 10  $\mu\text{m}$  である。

鉱物化学組成分析

斑晶鉱物については、富山大学自然科学研究支援センターの波長分散型 EPMA (JEOL JXA-8230) を用い、各噴火期の岩石に共通に含まれる斜長石と角閃石、惣山溶岩、前山溶岩および沼沢湖火砕堆積物の本質物に含まれる斜方輝石、各火砕堆積物の本質物中の Fe-Ti 酸化鉱物の組成を分析した。分析条件は Shukuno (2003) に従い、補正には ZAF を用いた。惣山溶岩と前山溶岩には、完全にオパサイト化した含水鉱物 (ホルンブレンドもしくは黒雲母) が含まれている。これらについては、ビーム径 20  $\mu\text{m}$  で 5-10 ポイント分析し、その平均組成からオパサイト化以前の鉱物種を推定した。

鉱物組成像

富山大学自然科学研究支援センターの波長分散型 EPMA (JEOL JXA-8230) を用い、沼沢湖火砕堆積物中の軽石 (斑状の白色軽石, 斑晶に乏しい軽石, 微斑晶に富む軽石) に含まれる斜長石, 斜方輝石, 角閃石斑晶の組成像 (COMPO 像) を得た。

なお、第1章でも述べたように、本論に使用したデータの一部は、既に著者らにより公表されており、本論ではそれらを引用して使用する。使用したデータと公表論文との関係は表1の通りである。

表1 本研究に使用したデータの一覧と著者が公表論文として使用したデータの関係。本論で使用したデータの一部は、公表論文のデータとして使用しているため、本論ではそれらを引用し、使用する。WP= 白色軽石, BS= 黒色スコリア, GS= 灰色スコリア, PpP= 斑晶に乏しい軽石, PrP= 微斑晶に富む軽石, Pl= 斜長石, Hbl= ホルンブレンド, Opx= 斜方輝石。

本質物	岩石記載	全岩化学組成		鉱物化学組成			ガラス組成	鉱物組成像
		主成分	微量成分	REE	同位体	Pl Hbl Opx		
先カルデラ期	増淵ほか (2016)			増淵ほか (2016)				本研究
カルデラ形成期	増淵・石崎 (2011)			増淵ほか (2016)				
	WP				本研究			
	BS				本研究			
	GS				本研究			
	PpP				本研究			
	PrP				本研究			



## 第4章 沼沢火山のマグマ供給系の岩石学的進化

### 4.1 岩石記載

増淵ほか(2016)を引用し、各噴火の代表的な本質物(火砕堆積物中の軽石・スコリア, 溶岩)の外観と偏光顕微鏡による観察結果について述べる。先カルデラ期の噴出物とカルデラ形成期の代表的な本質物のモード組成は表2に示した。カルデラ形成期(沼沢湖火砕噴火)の本質物のモード組成は付録(Appendix 2)にも示してある。なお、本論では便宜的に、各噴火で珪長質マグマと同時に活動した相対的にSiO<sub>2</sub>量に乏しいマグマを苦鉄質マグマと呼ぶことにする。

#### 4.1.1 尻吹峠火砕堆積物(110 ka)

本質物は、給源付近の露頭(図17, 露頭Mk-W)では、最大直径が2 cm程度の発泡度の良い白色の軽石である(図18A)。軽石は周囲から変質が進んでいるが、中心部には楕円形～不

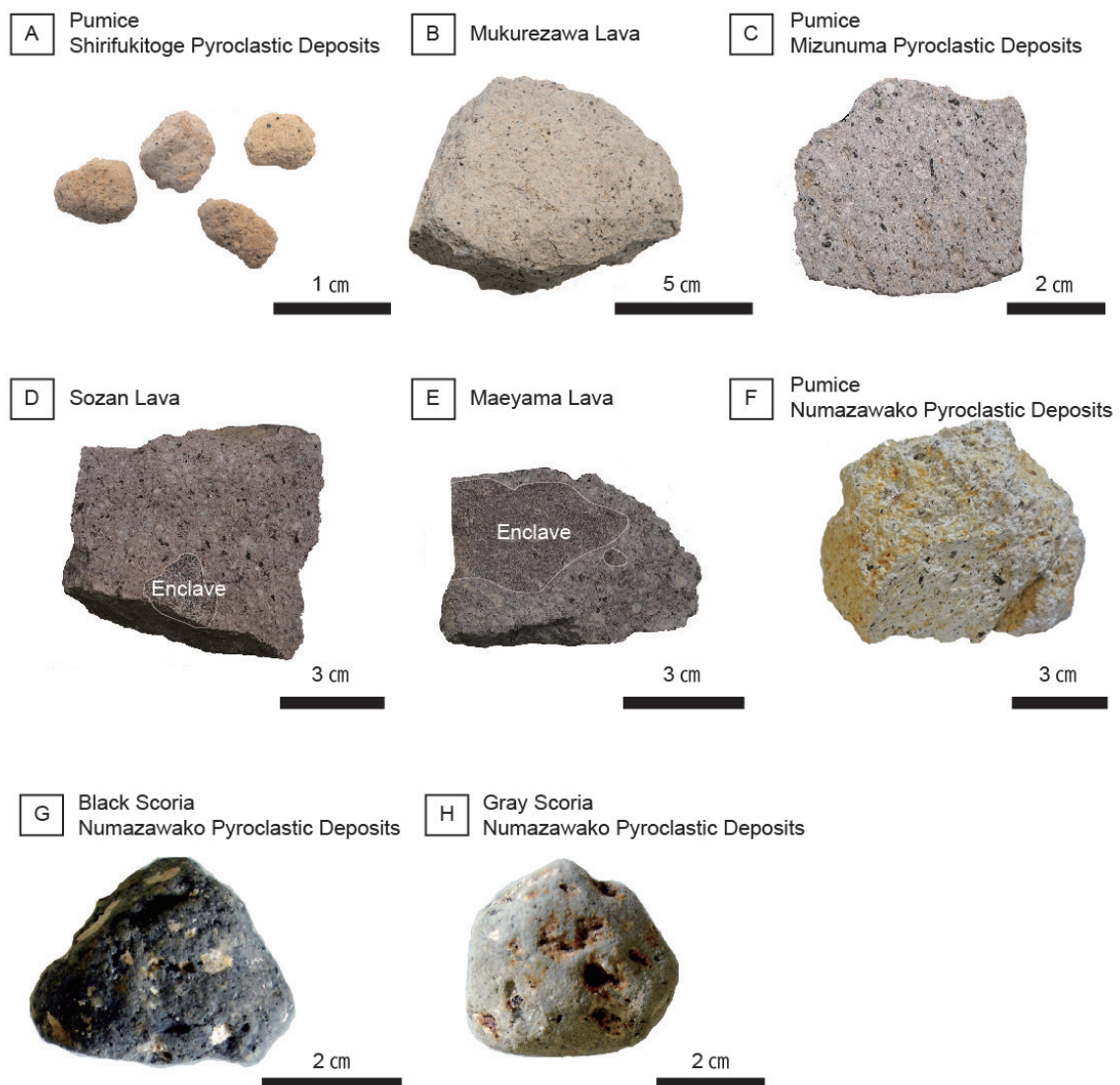


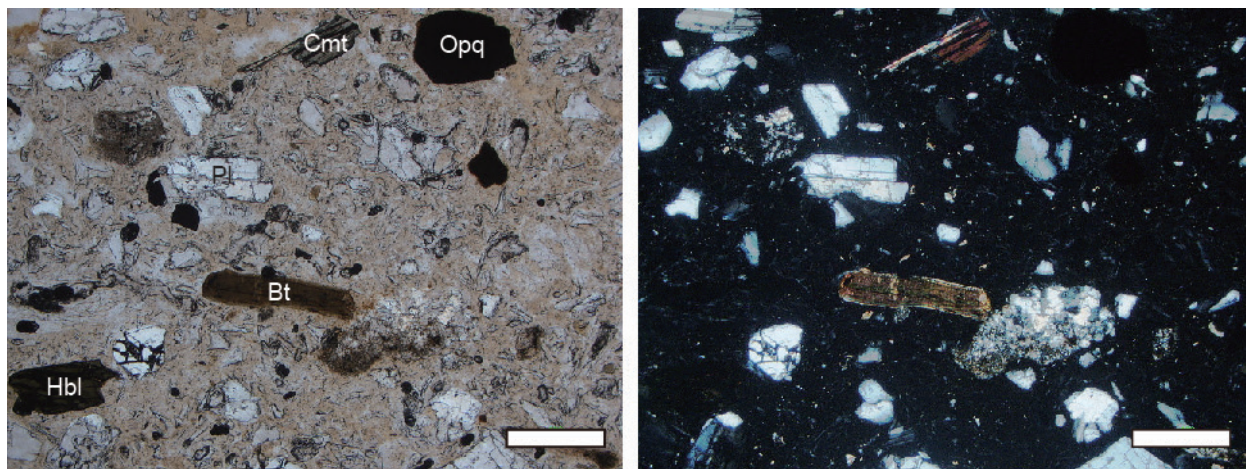
図18 沼沢火山の各噴火の代表的本質物・溶岩。

表2 各噴火の代表的な本質物・溶岩のモード組成. Sr= 尻吹峠火砕噴火, Mk= 木冷沢溶岩噴火, Mz= 水沼火砕噴火, Sz= 惣山溶岩噴火, Me= 前山溶岩噴火, Nk= 沼沢湖火砕噴火.

Eruption age	110 ka	71 ka	53 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	24 ka	24 ka	24 ka	24 ka	24 ka	24 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka
Eruptio name	Sr	Mk	Mz	Sz	Sz	Sz	Sz	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Nk	Nk	Nk
Sample name	Sr12-1	Mk12-5	Mz12-1	Sz21-6	Sz21-6	Sz06-2	Sz06-3	Me12-4	Me06-2	140806-3	140806-4	Me12-4	DIWP	BS9	GS-2	
Rock type	Lava	Lava	Pumice	Lava	Enclave	Enclave	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Enclave	Pumice	Black scoria	Gray scoria	
(vol.%)																
Plagioclase	23.2	22.0	22.4	26.1	47.6	63.9	24.1	23.3	26.7	21.3	29.1	32.7	26.9	2.5	11.1	
Quartz	16.9	11.0	4.3	2.0	0.0	0.0	2.1	2.9	1.7	6.5	2.6	0.0	3.6	0.0	0.1	
Biotite	3.5	3.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Hornblende	2.7	1.8	2.9	2.9	14.8	22.0	6.3	7.2	4.5	4.3	5.5	34.2	7.3	0.8	2.4	
Cummingtonite	0.8	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Orthopyroxene	0.0	0.0	0.0	0.1	0.8	0.0	0.4	0.0	2.3	1.1	1.4	0.0	2.6	0.2	0.8	
Opaque minerals	2.7	0.7	0.4	0.3	0.5	1.1	0.4	1.9	0.3	0.5	0.4	3.6	1.0	0.3	0.5	
Groundmass	50.1	61.0	68.4	68.6	36.3	13.0	66.5	64.6	64.5	66.3	61.0	29.5	58.6	96.1	85.1	
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
Phenocrysts	49.9	39.0	31.6	31.4	63.7	87.0	33.5	35.4	35.5	33.7	39.0	70.5	41.4	3.9	14.9	
Vesicle	81.6	29.4	27.8	5.3	19.5	6.2	5.3	4.1	4.1	6.4	8.0	12.2	61.1	54.6	56.6	

定形の気泡を伴う未変質の完全ガラス質部がしばしば保存されている。

斑晶量は約 50 vol.% であり、斑晶として斜長石、石英、黒雲母、ホルンブレンド、カミングトン閃石および Fe-Ti 酸化鉱物を含む (表 2)。斑晶は多くが自形～半自形の単独斑晶であるが、少量の他形斑晶も見られる (図 19)。斜長石は、最大径 0.8 mm で清澄である。石英は最大径 1.2 mm で、湾状に融食しているものも見られる。黒雲母は最大径 0.7 mm である。角閃石としてホルンブレンド (最大径 0.4 mm) とカミングトン閃石 (最大径 0.6 mm) を含む。Fe-Ti 酸化鉱物の最大径は 0.3 mm である。



Scale bar=0.3 mm

図 19 尻吹峠火砕堆積物の軽石の薄片写真. Pl= 斜長石, Bt= 黒雲母, Cmt= カミングトン閃石, Hbl= ホルンブレンド, Opq= 不透明鉱物.

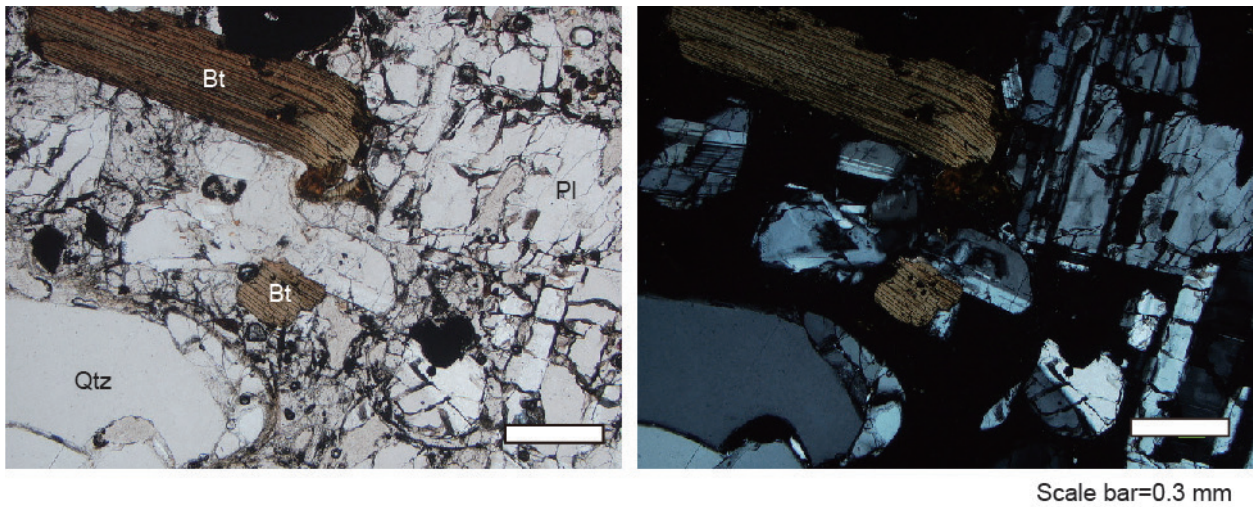


図20 木冷沢溶岩の薄片写真. Pl= 斜長石, Qtz= 石英, Bt= 黒雲母.

#### 4.1.2 木冷沢溶岩 (71 ka)

本溶岩は、斑晶量約 40 vol.% の白色の流紋岩～デイサイトである (図 18B).

斑晶として斜長石、石英、黒雲母、ホルンブレンドおよび Fe-Ti 酸化鈹物を含む (表 2). 斑晶はいずれも自形～半自形を示し、斜長石や黒雲母は最大径 4 mm, 石英は 3.5 mm に達する (図 20). 斜長石斑晶は清澄なものが多いが、褐色のガラス包有物を伴うものも見られる. 黒雲母は、斜長石や Fe-Ti 酸化鈹物を包有または集斑することがある. ホルンブレンド (最大径 1.7 mm) は、Fe-Ti 酸化鈹物や黒雲母を包有することがある. Fe-Ti 酸化鈹物は最大径 0.8 mm である.

石基は、パーライトクラックが発達した火山ガラスと、その中に点在する少量の斜長石、黒雲母とホルンブレンドのマイクロライトからなる.

#### 4.1.3 水沼火砕堆積物 (53 ka)

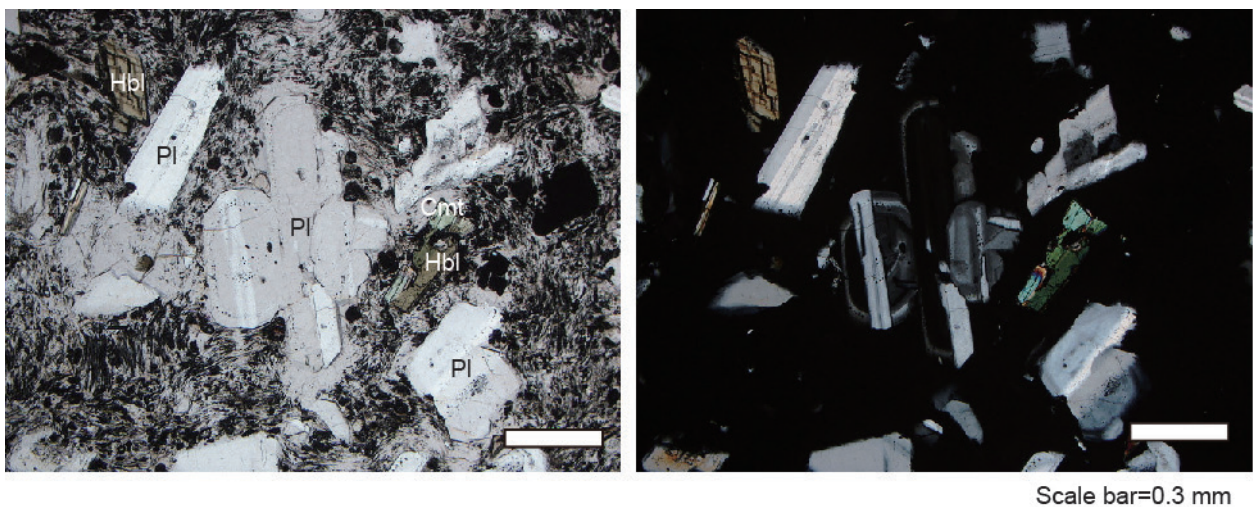


図21 水沼火砕堆積物の軽石の薄片写真. Pl= 斜長石, Cmt= カミングトン閃石, Hbl= ホルンブレンド, Opq= 不透明鈹物.

本質物は、斑晶量約 30 vol.% の灰白色のデイサイト質軽石である (図 18C)。

斑晶として斜長石, 石英, 黒雲母, ホルンブレンド, カミングトン閃石および Fe-Ti 酸化鉬物を含む (表 2)。斑晶の多くは自形~半自形の単独斑晶として産出する (図 21)。斑晶には粗粒なものも多く, 特に斜長石, 石英およびホルンブレンドは最大径 3 mm に達する。また, 黒雲母の最大径は 0.9 mm, カミングトン閃石の最大径は 0.8 mm である。斜長石は清澄なものも多く, 斜長石同士で集斑することもある。ホルンブレンドは単独斑晶が多いが, 斜長石, 黒雲母, Fe-Ti 酸化鉬物を包有あるいはこれらと集斑していることがある。ホルンブレンドの周囲には, カミングトン閃石の overgrowth が普通に見られる。

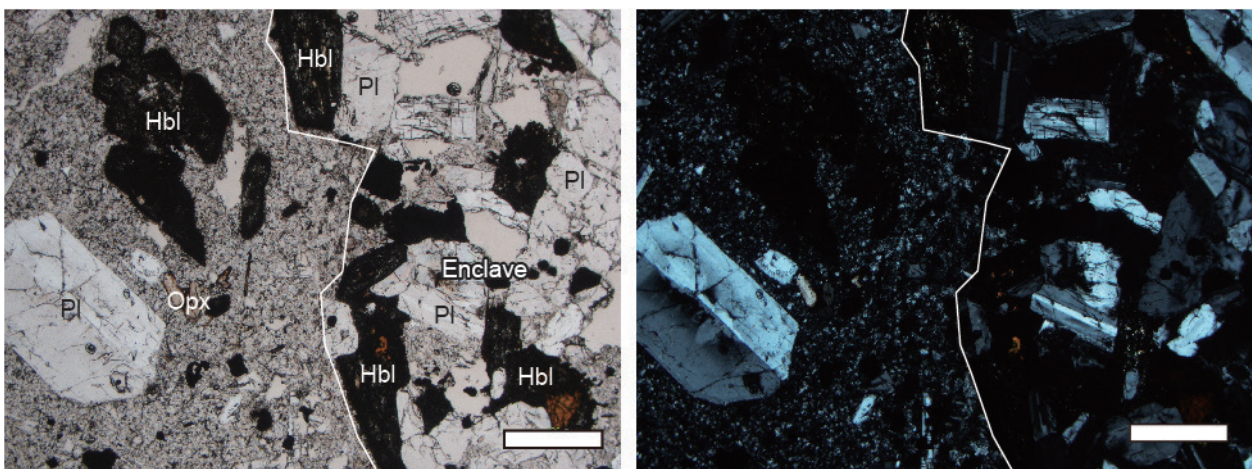
石基は, ほぼ完全火山ガラス質で, その中に点在する斜長石とホルンブレンドのマイクロライトを含む。

#### 4.1.4 惣山溶岩 (43 ka)

本溶岩は高温酸化した赤褐色の溶岩からなり, 灰色~灰白色の苦鉄質包有岩 (最大長径 15 cm) を含む (図 18D)。

##### 溶岩

斑晶量約 30 vol.% のデイサイトである。斑晶として斜長石, 石英, 黒雲母, ホルンブレンド, 斜方輝石および Fe-Ti 酸化鉬物を含む (表 2)。斑晶はいずれも自形~半自形を示し, 斜長石, 石英, ホルンブレンドの最大径は 5 mm に達する。斜長石には, 清澄なものと同濁帯や蜂の巣状組織が発達するものがあり, しばしば斜長石同士あるいはホルンブレンドと集斑する。黒雲母は最大径 1.8 mm であり, 全体がオパサイト化している。ホルンブレンドは, リム部から厚いオパサイト縁が発達し, 完全に内部までオパサイト化しているものも多い (図 22)。また, ホルンブレンドは, 斜長石や斜方輝石の微斑晶を包有することがある。斜方輝石は, 最大径 0.4 mm の微斑晶~斑晶として少量含まれ, リム部が酸化により褐色を呈する。また, Fe-Ti 酸化鉬物と



Scale bar=0.3 mm

図 22 惣山溶岩と苦鉄質包有岩の薄片写真。Pl= 斜長石, Hbl= ホルンブレンド, Opx= 斜方輝石。

集斑することがある。Fe-Ti 酸化鉱物は最大径 0.8 mm である。石基はフェルシティック組織を示す。

#### 苦鉄質包有岩

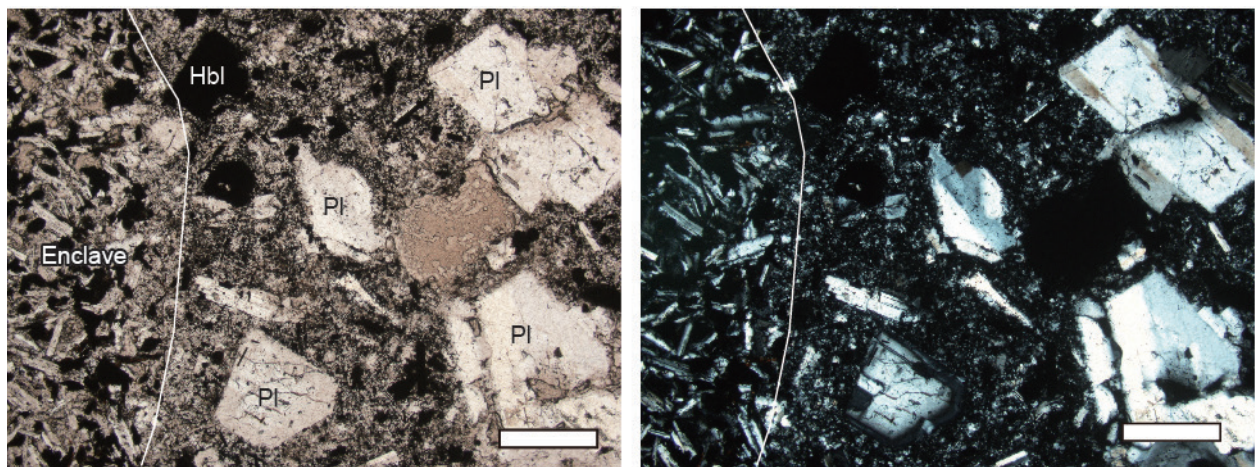
0.2–0.5 mm の微斑晶を大量に含むもの（斑晶量が約 90 vol.%）と、0.2–1.5 mm のやや粗粒な斑晶を含むもの（斑晶量が約 65 vol.%；図 22）がある。いずれの包有岩も、石基部に細粒鉱物やガラスをもつことから、苦鉄質マグマが急冷固化してできた岩石と判断される。いずれの包有岩も大量の微斑晶サイズの斜長石・ホルンブレンドと少量の Fe-Ti 酸化鉱物からなり、まれに斑晶サイズの斜長石とホルンブレンドを含む。粗粒な苦鉄質包有岩中には少量の斜方輝石の微斑晶～斑晶も見られる。斜長石は自形～半自形の清澄なものが多い。ホルンブレンドは自形～半自形で斜長石の間を埋めるように成長している。ホルンブレンドは、ほぼあるいは完全にオパサイト化している。まれに淡褐色で多色性の弱い長柱状のホルンブレンド（最大径 0.6 mm）も含まれる。

#### 4.1.5 前山溶岩（24 ka）

本溶岩は、黒灰色のデイサイト～安山岩質溶岩からなり、赤灰色もしくは暗色で多孔質の苦鉄質包有岩（最大長径 20 cm）を含む（図 18E）。

#### 溶岩

斑晶量が約 35 vol.% であり、斑晶として斜長石、石英、ホルンブレンド、斜方輝石および Fe-Ti 酸化鉱物が見られ（表 2）、薄片によっては極少量の黒雲母を含む。斑晶はいずれも自形～半自形を示す。斜長石、石英およびホルンブレンドの最大径は 2–3 mm である。斜長石は、清澄なものや汚濁帯が発達しているものや篩状のコアをもつものが存在する。ホルンブレンドはほぼ完全にオパサイト化しているものが多い。斜方輝石は最大径 2.5 mm で、リム部が酸化により褐色を呈する。石基はフェルシティック組織を示す。



Scale bar=0.3 mm

図 23 前山溶岩と苦鉄質包有岩の薄片写真。Pl= 斜長石，Hbl= ホルンブレンド。

### 苦鉄質包有岩

0.1–0.2 mm の斜長石，ホルンブレンドおよび Fe-Ti 酸化鉱物の微斑晶を多く含む（図 23）。斜長石は清澄であり，針状を呈する。ホルンブレンドは 0.1–0.2 mm の微斑晶サイズのものが大半を占めるが，まれに 1.8 mm に達する斑晶サイズのものも見られる。ホルンブレンドは粒径とは無関係に完全にオパサイト化している。気泡の多くが 0.3 mm 以下で不定形を示すが，球状の大きな気泡（最大径 2.5 mm）も少量見られる。

#### 4.1.6 沼沢湖火砕堆積物（5.4 ka）

本堆積物には多様な本質物（斑晶量の異なる 3 種類の軽石および外観色と主な産出層準が異なる 2 種類のスコリア）が見られるが，ここでは主要構成物である白色軽石，黒色スコリアおよび灰色スコリア（図 18F–H）について述べ，3 種類の軽石については第 5 章で詳述する。

#### 白色軽石

斑晶量 38–52 vol.% のデイサイトであり，沼沢湖火砕堆積物の全ユニットに産し，全噴出量の 80 wt.% 以上を占める（増淵・石崎，2011）。斑晶として斜長石，石英，ホルンブレンド，斜方輝石および Fe-Ti 酸化鉱物を含む（表 2）。斑晶の多くは自形～半自形の形状をもつが，少量の他形斑晶も見られる。また各斑晶の最大径は 1–2 mm である。斜長石は斜方輝石，ホルンブレンド，Fe-Ti 酸化鉱物を包有し，斜方輝石やホルンブレンドと集斑することがある。石基は完全ガラス質である（図 24）。

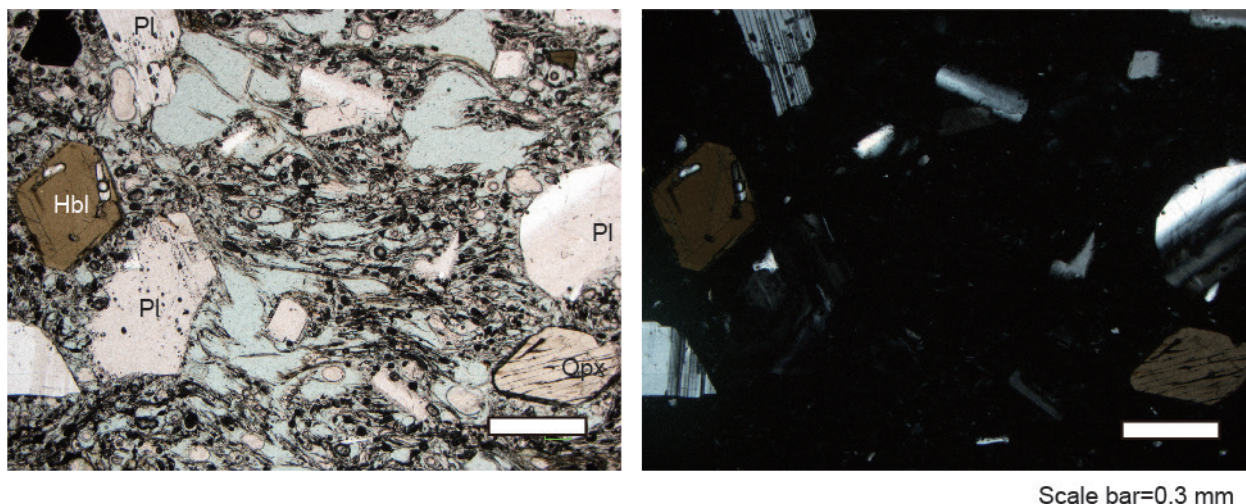


図 24 沼沢湖火砕堆積物の白色軽石の薄片写真。Pl= 斜長石，Hbl= ホルンブレンド，Opx= 斜方輝石。

#### 黒色スコリア

斑晶量が 4–16 vol.% の安山岩であり，沼沢湖火砕堆積物の全ユニットに産する（増淵・石崎，2011）。黒色スコリアは，噴火直前にデイサイト質マグマ溜りに注入した苦鉄質マグマに由来する火山碎屑物であることが明らかになっている（増淵・石崎，2011）。



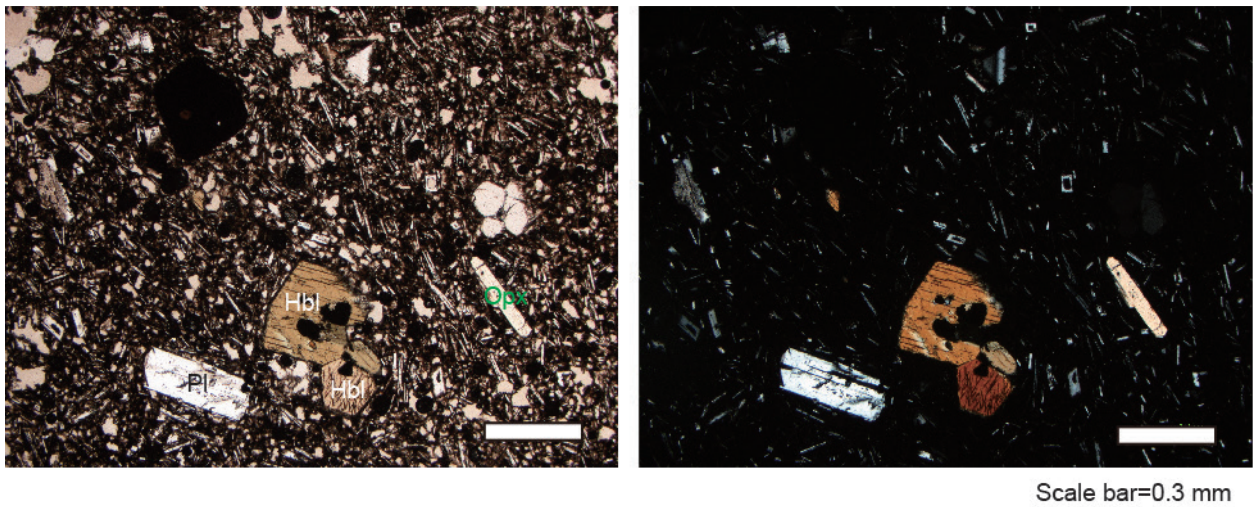


図25 沼沢湖火砕堆積物の黒色スコリアの薄片写真。Pl=斜長石, Hbl=ホルンブレンド, Opx=斜方輝石。

斑晶として斜長石、ホルンブレンドおよびFe-Ti酸化鉱物を含み、石英と斜方輝石を含むこともある(表2)。斑晶は融食形の石英を除き、全て自形～半自形の形状をもつ。斜長石は最大径1.4 mmで、汚濁帯や篩状のコアをもつものも見られる。石英(最大径0.8 mm)はしばしば輝石の反応縁を伴う。ホルンブレンド(最大径1.8 mm)には、オパサイト縁をもつものも見られる。斜方輝石は最大径0.1 mmである。石基はハイアロピリティック組織で、板状、針状、燕尾状および骸晶など、様々な形状の斜長石マイクロライトを含む(図25)。

#### 灰色スコリア

斑晶量が9-30 vol.%の安山岩であり、沼沢湖火砕堆積物のユニットIIIとIVに産する(増淵・石崎, 2011)。灰色スコリアは、沼沢湖火砕噴火の最中にマグマ溜り内に注入した苦鉄質マグ

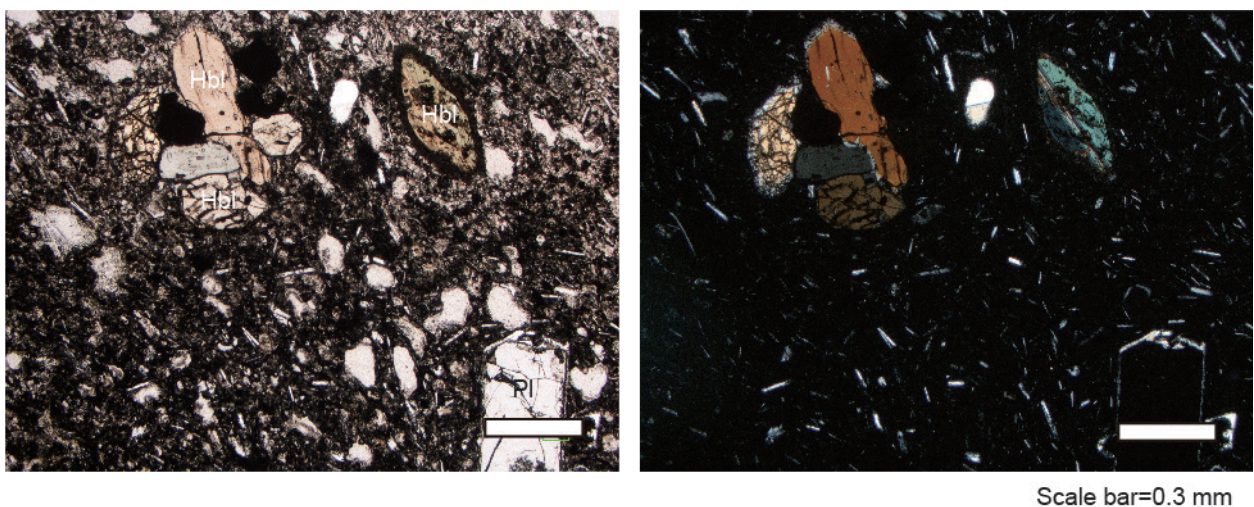


図26 沼沢湖火砕堆積物の灰色スコリアの薄片写真。Pl=斜長石, Hbl=ホルンブレンド, Opx=斜方輝石。

---

マに由来する火山碎屑物であることが明らかになっている（増淵・石崎，2011）。

斑晶として斜長石，石英，ホルンブレンドおよび Fe-Ti 酸化鉱物を含み，斜方輝石を含むこともある（表2）。斑晶は融食形の石英を除き，いずれも自形～半自形の形状をもつ。斜長石は最大径 3.0 mm であり，汚濁帯や篩状のコアをもつものも見られる。石英は最大径 1.0 mm で，しばしば輝石の反応縁を伴う。ホルンブレンドは最大径 1.4 mm であり，厚さ約 0.05 mm のオパサイト縁をもつものもある（図 26）。斜方輝石は最大径 1.0 mm である。石基はハイアロピリティック組織で，板状や針状の斜長石マイクロライトを含む（図 26）。

## 4.2 全岩化学組成

沼沢火山噴出物は、全岩 SiO<sub>2</sub> 量が 55.1–71.7 wt.% (無水で 100% 換算; 以下同様) の流紋岩～安山岩であり、広い組成幅をもつ。以下では噴出物の主成分および微量成分組成(増淵ほか, 2016 を引用)、希土類元素組成パターンおよび Sr・Nd 同位体組成(増淵ほか, 2016 を引用)について述べる。なお、全岩化学組成の分析データは付録 (Appendix 3) に示してある。

### 4.2.1 主成分および微量成分組成

FeO\*/MgO–SiO<sub>2</sub> 図 (FeO\* は全鉄を FeO に換算) では、噴出物の大部分がカルクアルカリ系列の領域に点示され、惣山および前山溶岩の苦鉄質包有岩と沼沢湖火砕堆積物のスコリアの一部がソレイト系列の領域に点示される (図 27)。K<sub>2</sub>O–SiO<sub>2</sub> 図では、噴出物の大部分が medium-K 領域に点示され、沼沢湖火砕堆積物のスコリアの一部が low-K の領域に点示される (図 27)。

各噴火期の噴出物の主体を占める珪長質な本質物および溶岩は、流紋岩～デイサイトに分類される (図 27)。全岩 SiO<sub>2</sub> 量は、木冷沢溶岩が 69.1–71.7 wt.%、水沼火砕堆積物の軽石が 68.1–69.0 wt.%、惣山溶岩が 66.9–67.7 wt.%、前山溶岩が 62.7–65.4 wt.%、沼沢湖火砕堆積物の軽石が 63.5–67.0 wt.% である。Yamamoto (2007) が指摘しているように、噴火期が若くなるとともに珪長質本質物・溶岩の全岩 SiO<sub>2</sub> 量が減少する傾向が見られる。これらの流紋岩～デイサイトは、組成変化図で SiO<sub>2</sub> 量の増加に対して TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO\*、MgO、CaO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Sr、V が減少し、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、Rb、Ba が増加する変化傾向をもつ (図 27)。また、各噴火期の流紋岩～デイサイトは、以下のように固有の組成的特徴をもつ。木冷沢溶岩 (流紋岩) は、水沼火砕堆積物 (軽石) に比べ Ba に富み、CaO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Sr に乏しい。また他の活動期の珪長質火山岩に比べ、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 量が SiO<sub>2</sub> 量の増加に伴い急激に減少する特有の変化傾向をもつ。水沼火砕堆積物 (軽石) と惣山溶岩は、ほぼ類似した組成領域に点示されるものの、前者が後者に比べやや SiO<sub>2</sub> に富む傾向が見られる。その後に噴出した前山溶岩と沼沢湖火砕堆積物 (軽石) は、水沼火砕堆積物 (軽石) と惣山溶岩に比べ、TiO<sub>2</sub>、CaO、MgO や Sr にやや富み、MnO、Na<sub>2</sub>O にやや乏しい。また、沼沢湖火砕堆積物 (軽石) は、前山溶岩に比べ P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> に乏しく、K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比に富む。

惣山溶岩噴火 (43 ka) 以降には、デイサイト質の溶岩・軽石とともに、溶岩噴火では少量の苦鉄質包有岩が、また、火砕噴火ではスコリアが噴出している。これらの苦鉄質な岩石は全て安山岩に分類され (不均質な縞状組織をもつ火山砕屑物は除く)、SiO<sub>2</sub> 量は、惣山溶岩の苦鉄質包有岩が 55.5–58.2 wt.%、前山溶岩の苦鉄質包有岩が 55.1–56.6 wt.%、沼沢湖火砕噴火の黒色スコリアと灰色スコリアがそれぞれ 58.0–60.4 wt.%、56.3–59.8 wt.% である。各噴火期の安山岩は、特に K<sub>2</sub>O–SiO<sub>2</sub> 図と Sr–SiO<sub>2</sub> 図で組成の違いが明瞭であり、①新しい噴火期の安山岩ほど Sr 量に富む、②沼沢湖火砕噴火のスコリアが他の噴火期の安山岩に比べ K<sub>2</sub>O に乏しい、などの特徴が見られる (図 27)。

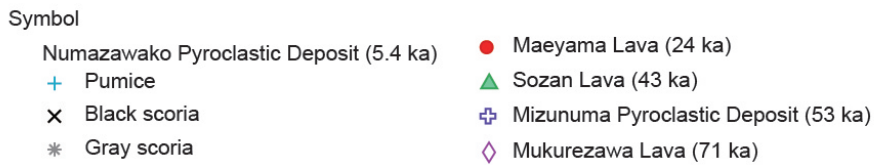
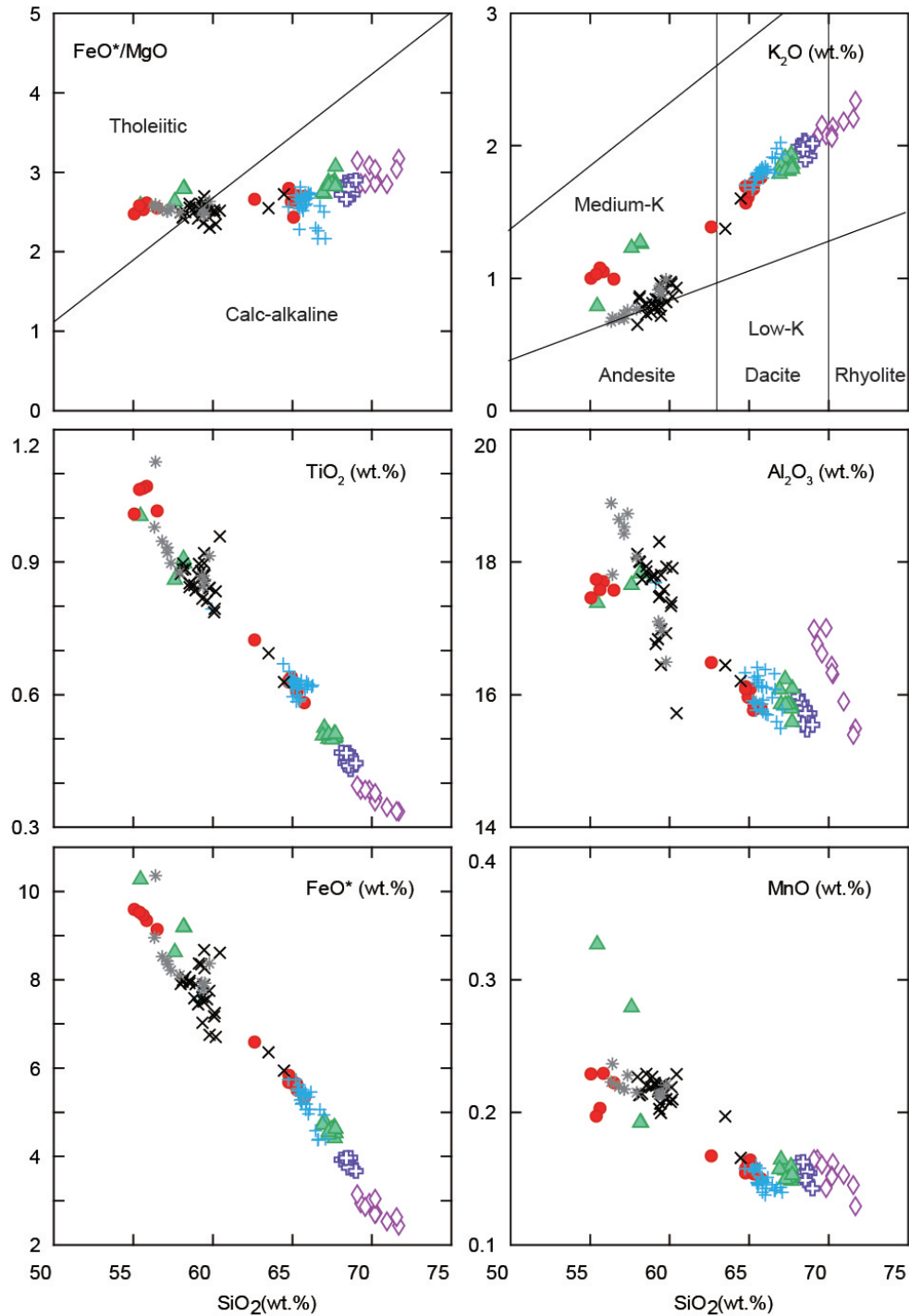
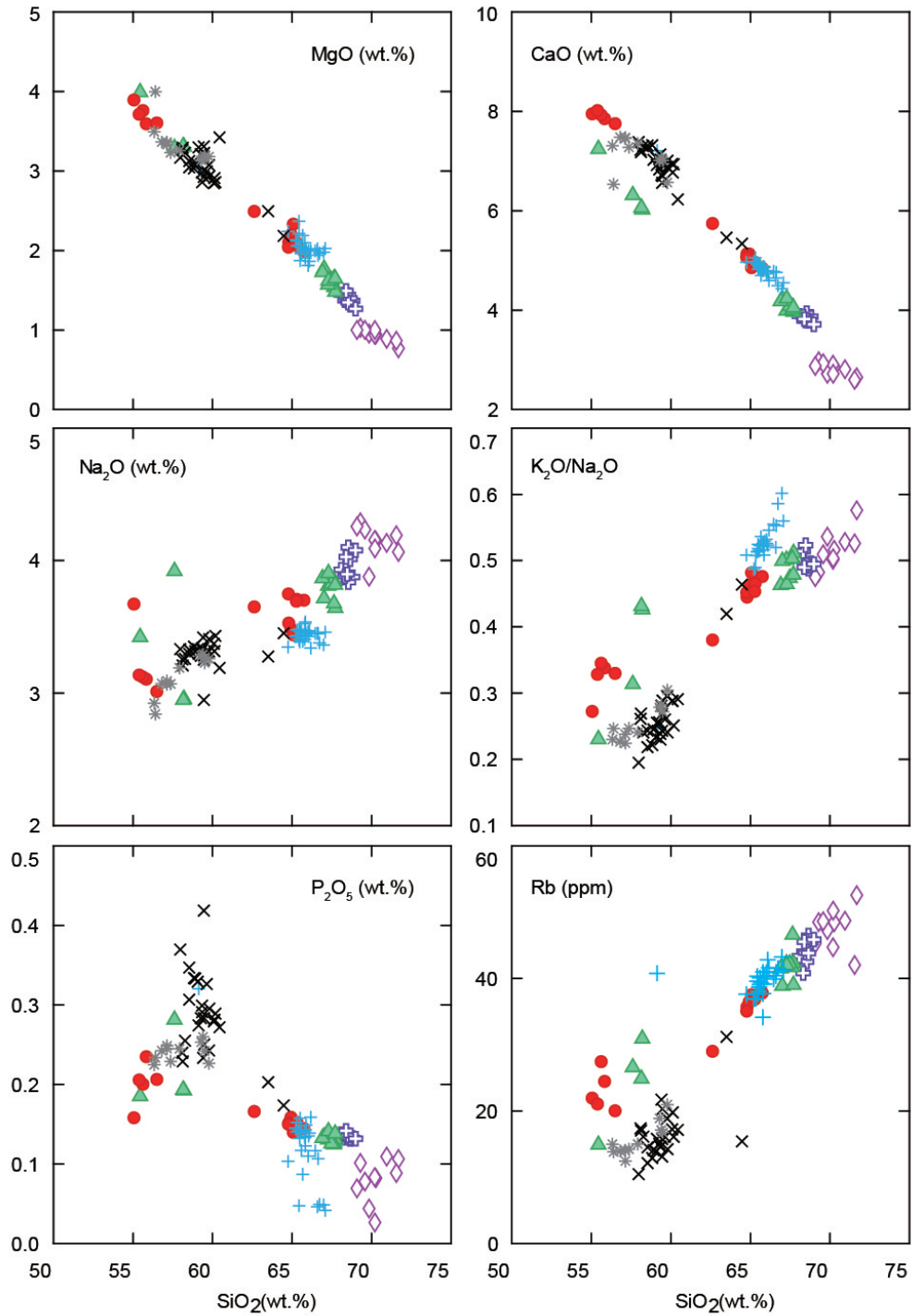


図27 沼沢火山噴出物の全岩化学組成のハーカー図. FeO\*/MgO-SiO<sub>2</sub> 図の境界線は Miyashiro (1974), K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 図の境界線は Peccerillo and Taylor (1976) に従った.



Symbol

Numazawako Pyroclastic Deposit (5.4 ka)

+ Pumice

x Black scoria

\* Gray scoria

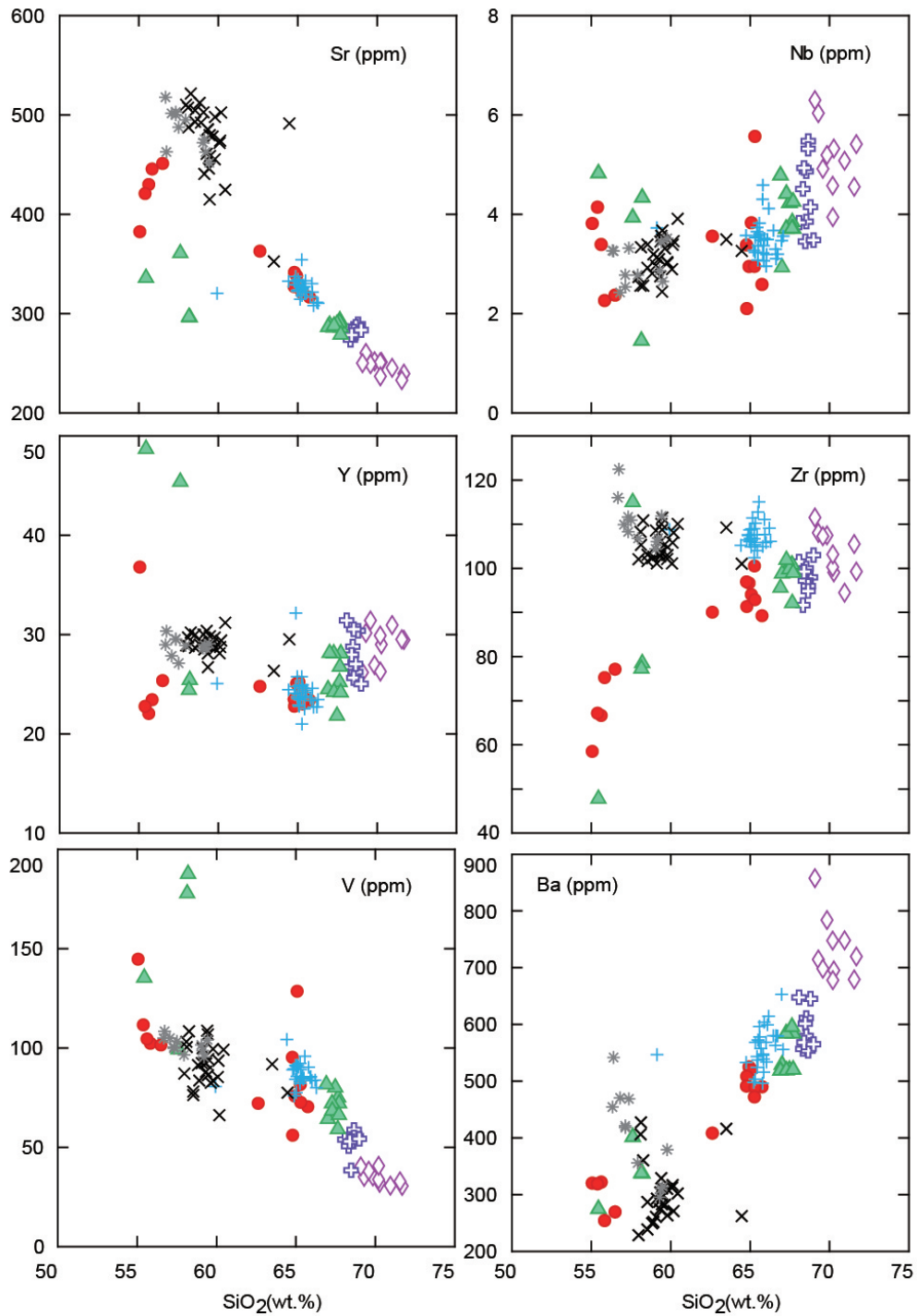
● Maeyama Lava (24 ka)

▲ Sozan Lava (43 ka)

⊕ Mizunuma Pyroclastic Deposit (53 ka)

◇ Mukurezawa Lava (71 ka)

図27 (続き) 沼沢火山噴出物の全岩化学組成のハーカー図.



Symbol

Numazawako Pyroclastic Deposit (5.4 ka)

+ Pumice

x Black scoria

\* Gray scoria

● Maeyama Lava (24 ka)

▲ Sozan Lava (43 ka)

⊕ Mizunuma Pyroclastic Deposit (53 ka)

◇ Mukurezawa Lava (71 ka)

図 27 (続き) 沼沢火山噴出物の全岩化学組成のハーカー図.

#### 4.2.2 希土類元素組成パターン

分析に必要な試料量の得られなかった尻吹峠火砕堆積物を除き、各噴火の主要な本質物の希土類元素組成分析を行った。図 28 に代表的な試料の希土類元素組成について、コンドライトで規格化 (Sun and McDonough, 1989) した組成パターンを示す。

木冷沢溶岩噴火以降に噴出した珪長質な本質物・溶岩の希土類元素パターンは、全岩 SiO<sub>2</sub> 量によらず類似したやや右下がりのパターンを示す (図 28a)。沼沢湖火砕噴火の軽石 1 試料を除き弱い負の Eu 異常が見られる。LREE はほぼ同じ組成パターンを示し噴火ごとに違いは見られないが、HREE は、前山溶岩や沼沢湖火砕堆積物の軽石に比べ、木冷沢溶岩、水沼火砕堆積物の軽石、惣山溶岩で富む傾向がある。

惣山溶岩噴火以降に噴出した苦鉄質な本質物・溶岩は、珪長質な岩石に比べ、水平に近い未分化パターンを示し、また希土類元素に富む傾向がある。惣山溶岩の苦鉄質包有岩は前山溶岩のそれと比較し、全体的に希土類元素に富み、負の Eu 異常が顕著である。沼沢湖火砕噴火で噴出した黒色スコリアと灰色スコリアのパターンはほぼ同一で、前山溶岩の包有岩のパターンとも似る。両スコリアは、灰色スコリアに弱い負の Ce 異常が見られることで区別される。

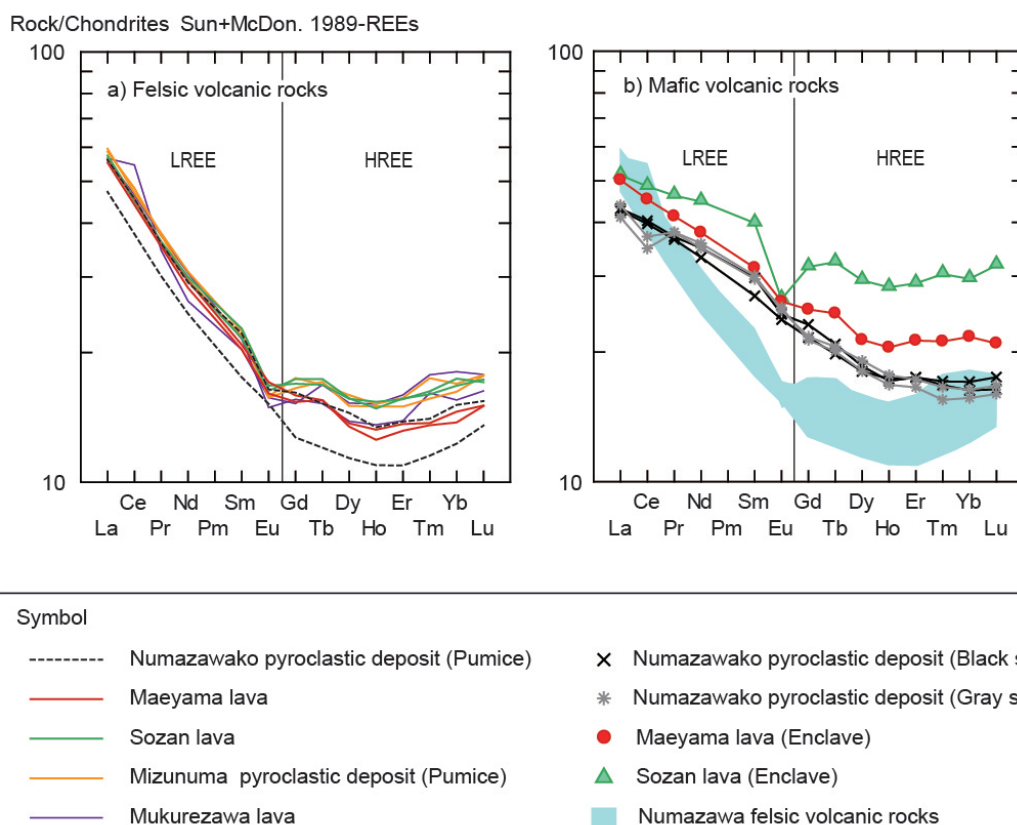


図 28 コンドライト (Sun and McDonough, 1989) で規格化した沼沢火山噴出物の希土類元素組成パターン。a) 珪長質な本質物・溶岩の組成パターン, b) 包有岩およびスコリアの組成パターン。

## 4.2.3 Sr および Nd 同位体組成

沼沢火山噴出物の  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比と  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比を図 29 に示す。

流紋岩～デイサイトの  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比には、噴火期ごとに明瞭な差異が見られる。活動期の前半（110–43 ka）では、木冷沢溶岩が 0.703898–0.703904，水沼火砕堆積物（軽石）が 0.703877–0.703884，惣山溶岩が 0.703850–0.703853 と微減し，その後の 24 ka の前山溶岩では 0.703955–0.703960 に増加した後，最新の沼沢湖火砕堆積物（軽石）では 0.703922–0.703929 へと再び減少する。

惣山溶岩噴火（43 ka）以降に噴出した安山岩（苦鉄質包有岩，スコリア）の  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比は，惣山溶岩の苦鉄質包有岩が 0.703862，前山溶岩の苦鉄質包有岩が 0.703976，沼沢湖火砕堆積物の黒色スコリアが 0.703848–0.703881，灰色スコリアが 0.704013–0.704033 であり，それぞれ固有の  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比をもつ。惣山溶岩と前山溶岩の苦鉄質包有岩と沼沢湖火砕噴火の灰色スコリアは同様の  $\text{SiO}_2$  量をもつが， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比は明瞭に異なる。また，苦鉄質包有岩がそのホスト溶岩と類似する  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比をもつのにに対し，沼沢湖火砕堆積物のスコリアは，同時に噴出しているデイサイト質軽石とは明瞭に異なる  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比をもつ。

沼沢火山噴出物の  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比は 0.512843–0.512864 の範囲で推移している。各噴火期の噴出物を比較すると， $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比の最大値には明瞭な差が見られずほぼ一定であるのに対し，最低値には時間とともに微減する傾向が見られる。

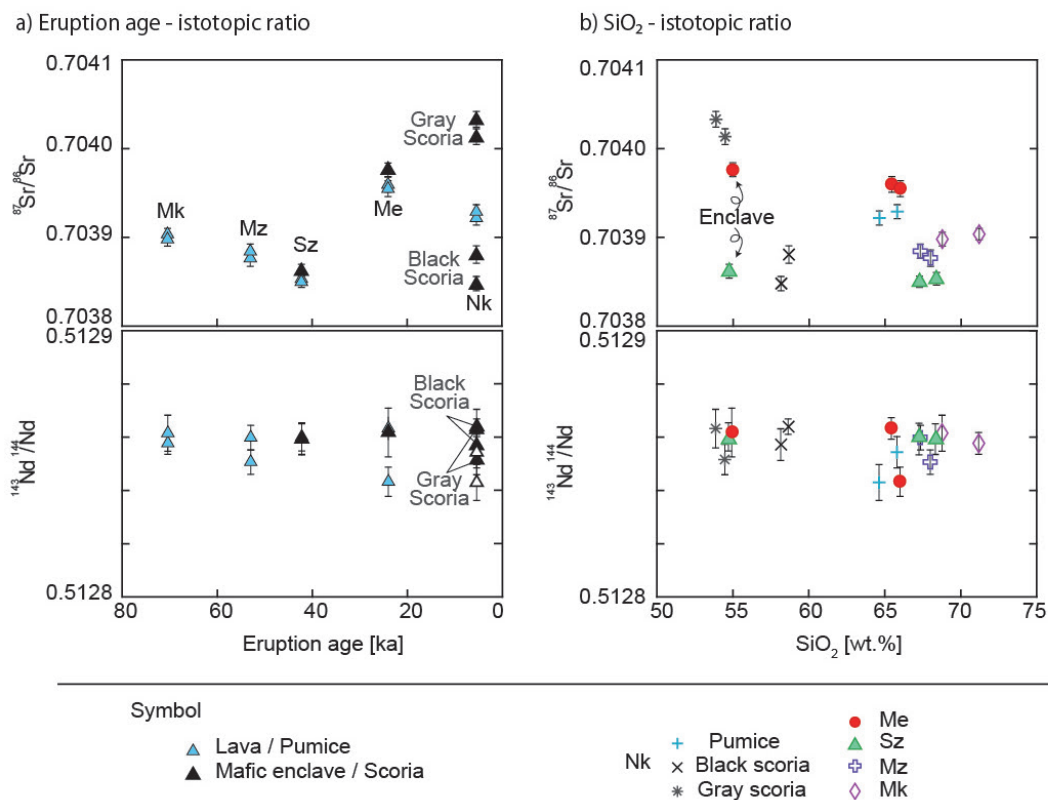


図 29 沼沢火山噴出物の Sr および Nd 同位体組成。a) 噴火年代 - Sr および Nd 同位体組成図，b)  $\text{SiO}_2$ -Sr および Nd 同位体組成図。Mk= 木冷沢溶岩，Mz= 水沼火砕堆積物，Sz= 惣山溶岩，Me= 前山溶岩，Nk= 沼沢湖火砕堆積物。



### 4.3 鉍物化学組成

沼沢火山噴出物は、いずれの噴火期においても斑晶として斜長石、角閃石（ホルンブレンド）および Fe-Ti 酸化鉍物を含む。また、惣山溶岩噴火以降のデイサイト中には斑晶として斜方輝石を含む。以下では増淵ほか（2016）を引用し、斜長石、角閃石、斜方輝石および Fe-Ti 酸化鉍物の化学組成について述べる。なお、代表的な鉍物化学組成の分析データは付録(Appendix 4)に示してある。

#### 4.3.1 斜長石

流紋岩～デイサイトの斜長石斑晶のコアは、いずれの噴火期においてもヒストグラム上で広い組成範囲を示す（図 30）。尻吹峠火砕堆積物（軽石）には  $An_{18-57}$  の斜長石が含まれ、 $An_{20-25}$  と  $An_{35-45}$  に組成分布の弱いピークをもつ。木冷沢溶岩噴火以降の噴出物では、低 An 組成に明瞭な主ピークが見られ、そのピークは噴火期が新しくなるほど An に富むようになる。すなわち、木冷沢溶岩では最頻組成が  $An_{25-30}$ （組成範囲は  $An_{26-74}$ ）、水沼火砕堆積物では  $An_{30-35}$ （同  $An_{29-75}$ ）、惣山溶岩では  $An_{35-40}$ （同  $An_{30-87}$ ）、前山溶岩では  $An_{45-50}$ （同  $An_{35-78}$ ）、そして沼沢湖火砕堆積物（軽石）では  $An_{45-50}$ （同  $An_{45-50}$ ）である。斑晶リムは、コアに比べ狭い組成範囲を示し、最頻組成は尻吹峠火砕堆積物が  $An_{20-25}$ 、木冷沢溶岩が  $An_{25-30}$ 、水沼火砕堆積物が  $An_{35-40}$ 、惣山溶岩、前山溶岩および沼沢湖火砕堆積物では  $An_{45-50}$  であり、コアの最頻組成と同様、噴火期が新しくなるほど An に富むようになる。

惣山溶岩噴火以降に噴出した安山岩（苦鉄質包有岩およびスコリア）の斜長石は、バイモーダルなコア組成分布をもつ。惣山および前山溶岩の苦鉄質包有岩では高 An 側に主ピークが見られるのに対し、沼沢湖火砕堆積物のスコリアでは低 An 側 ( $An_{45-50}$ ) にも明瞭なピークが見られ、その組成は同時に噴出した軽石の斜長石斑晶コアの最頻組成と一致する。

縦軸に斑晶コアの An 値、横軸にリムの An 値をプロットした図 31a を見てみると、全ての噴火期の流紋岩～デイサイトに正累帯する斜長石斑晶と逆累帯する斜長石斑晶が共存していることがわかる。特に、水沼火砕噴火以降の噴出物では、半数以上の斜長石斑晶が逆累帯している。沼沢湖火砕堆積物のスコリアにも逆累帯する斜長石が見られるが、惣山および前山溶岩の苦鉄質包有岩の斜長石斑晶はほぼ全てが正累帯している。

斜長石斑晶コアの  $K_2O$  量と  $FeO^*$  量を用いることにより、尻吹峠および沼沢湖火砕堆積物（軽石）の斜長石は、他の噴火期の斜長石と明瞭に区別できる（図 31b）。 $K_2O$  量と  $FeO^*$  量は An 値と良い相関をもっており、An 値の増加に伴い、 $K_2O$  量は減少し、 $FeO^*$  量は増加する。多くの噴火期では  $K_2O$  量の最大値が 0.6–0.7 wt.% に達するのに対し、沼沢湖火砕堆積物（軽石）の斜長石斑晶は  $K_2O$  量が極端に低い（最大 0.22 wt.%）。また、多くの噴火期では  $FeO^*$  量の増加量が 0.2 wt.% 程度であるのに対し、尻吹峠火砕堆積物（軽石）の斜長石は  $FeO^*$  量を 0.05 wt.% から 0.4 wt.% まで大きく増加させるという特徴をもつ。

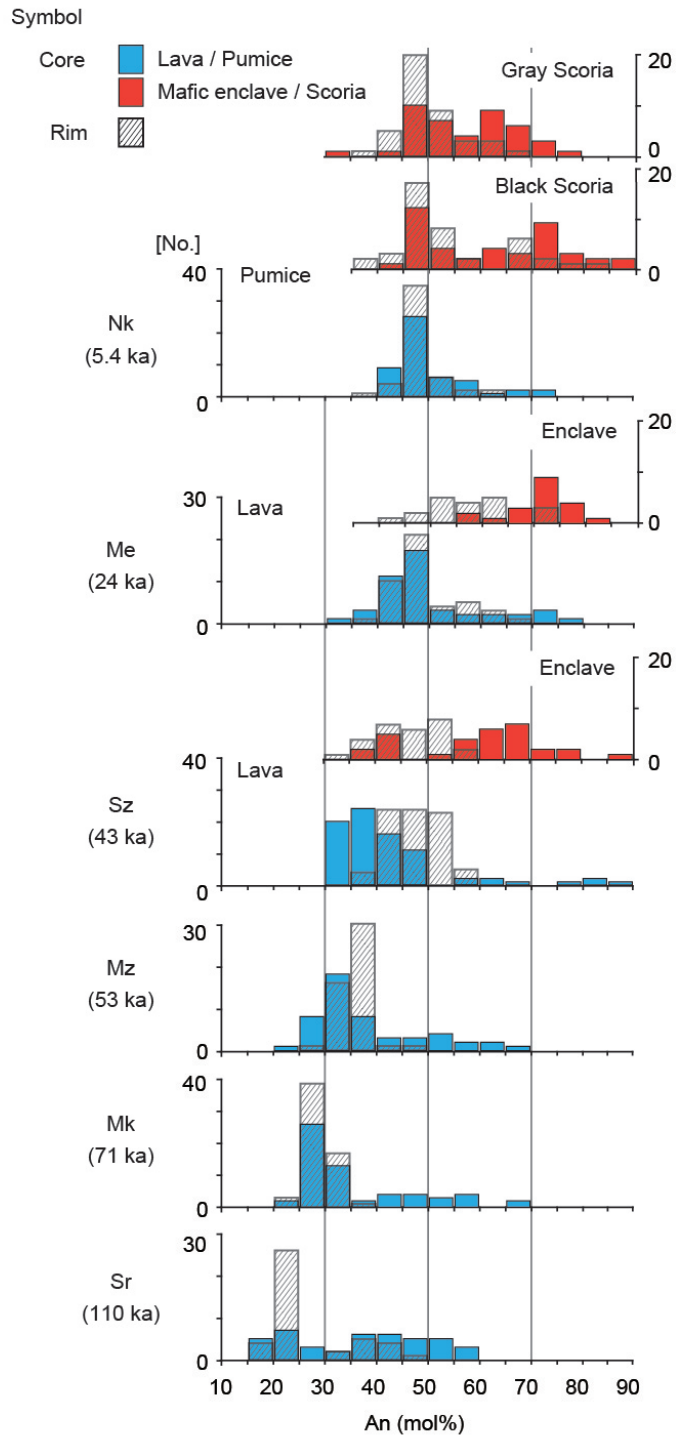


図30 沼沢火山噴出物の斜長石斑晶（コア・リム）のAnヒストグラム。Sr= 尻吹峠火砕堆積物，Mk= 木冷沢溶岩，Mz= 水沼火砕堆積物，Sz= 惣山溶岩，Me= 前山溶岩，Nk= 沼沢湖火砕堆積物。

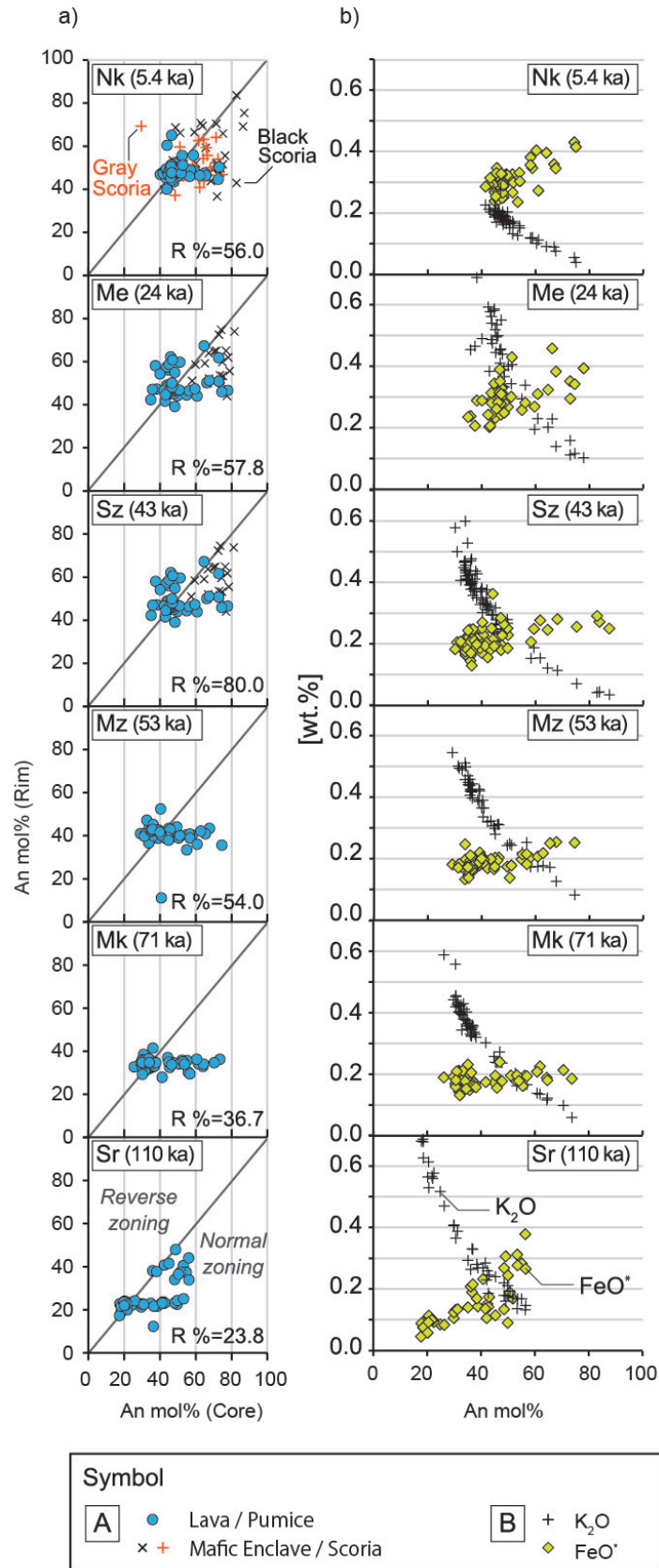


図 31 沼沢火山噴出物の斜長石斑晶の化学組成図. a) コア vs. リム組成図. 境界線の下側は正累帯, 上側は逆累帯構造をもつ斜長石であることを示している. b) コア中の FeO\*, K<sub>2</sub>O 含有量. Sr= 尻吹峠火砕堆積物, Mk= 木冷沢溶岩, Mz= 水沼火砕堆積物, Sz= 惣山溶岩, Me= 前山溶岩, Nk= 沼沢湖火砕堆積物.

### 4.3.2 角閃石

各噴火期の流紋岩～デイサイトに見られるホルンブレンド斑晶（カルシック角閃石）は、噴火期とは無関係に  $Mg/(Mg+Fe^{2+})$  比が 0.68–0.82 である。構造式単位あたりの Si 原子数と A 席の (Na+K) 原子数から、ホルンブレンド（狭義）、エデン閃石もしくはパーガス閃石に分類される（図 32；分類は Deer et al., 1992 に従う）。尻吹峠火砕堆積物（軽石）には、ホルンブレンド（狭義）、エデン閃石とパーガス閃石が含まれ、その組成変化は連続的である。木冷沢溶岩噴火以降の噴出物では、斑晶のほとんどはホルンブレンド（狭義）に分類されるが、惣山溶岩噴火以降、A 席の (Na+K) 原子数に富むエデン閃石やパーガス閃石が増加する。安山岩（苦鉄質包有岩とスコリア）に含まれるホルンブレンド（広義）の多くは溶岩や軽石の斑晶と同じ組成をもつが、沼沢湖火砕堆積物の黒色および灰色スコリアにはパーガス閃石も見られる。

尻吹峠および水沼火砕堆積物（軽石）のカミングトン閃石の組成は、ともに、CaO 量が 1–3 wt.%,  $Mg/(Mg+Fe^{2+})$  が約 0.70 である。

### 4.3.3 斜方輝石

斜方輝石は、惣山溶岩とその包有岩、前山溶岩、沼沢湖火砕堆積物の軽石およびスコリアに見られ、噴火期ごとに区別できる組成の特徴をもつ（図 33）。惣山溶岩の斜方輝石斑晶のコア組成は、 $Mg\#$  が 64–72 と幅広く、 $Mg\#$  66–67 と 70–72 にピークをもつバイモーダルな組成分布を示す（本論では  $Mg\# = 100 \times Mg/(Mg+Fe)$  とし、Fe を全て 2 価で計算する）。惣山溶岩の苦鉄質包有岩中に含まれる斜方輝石も、 $Mg\#$  65–66 と 72–73 にピーク

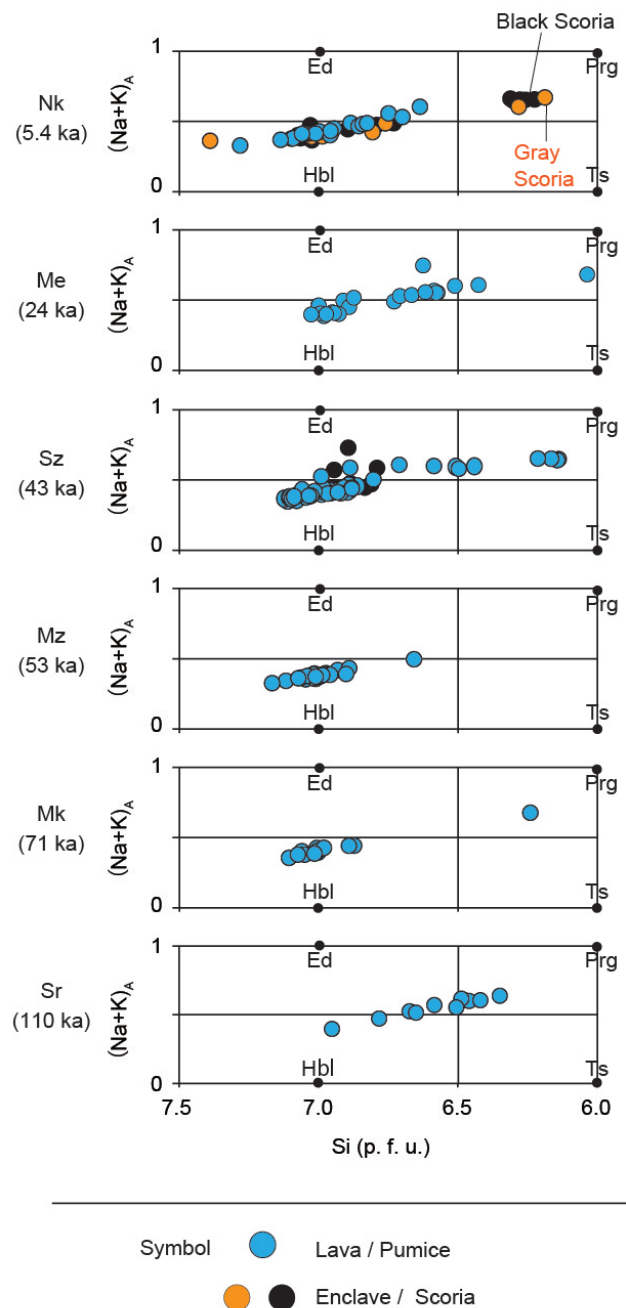


図 32 沼沢火山噴出物中の角閃石（広義のホルンブレンド）のコア組成。横軸には構造式単位あたりの Si、縦軸には A 席の (Na+K) 原子数を示している。端成分の組成範囲は Deer et al. (1992) に従った。Ed= エデン閃石、Prg= パーガス閃石、Hbl= ホルンブレンド（狭義）、Ts= ツェルマク閃石、Sr= 尻吹峠火砕堆積物、Mk= 木冷沢溶岩、Mz= 水沼火砕堆積物、Sz= 惣山溶岩、Me= 前山溶岩、Nk= 沼沢湖火砕堆積物。

クをもつバイモーダルな組成分布を示し、そのピークは溶岩中の斜方輝石と一致する。前山溶岩と沼沢湖火砕堆積物の軽石・スコリアでは、コア組成の多くが Mg# 65-69 と均一である。

惣山および前山溶岩のリム組成は、それぞれ Mg# 63-72 と Mg# 65-78 と多様であり、特に前山溶岩で逆累帯構造が顕著である。沼沢湖火砕堆積物の軽石と灰色スコリアでは、リム (Mg# 64-67) はコアとほぼ同じ組成をもつが、黒色スコリアではリムで Mg# が 2-8 増加し逆累帯している。

#### 4.3.4 Fe-Ti 酸化鉱物

尻吹峠、水沼および沼沢湖火砕噴火の流紋岩～デイサイト質軽石に含まれる磁鉄鉱およびチタン鉄鉱ペアの化学組成を分析した。溶岩と苦鉄質包有岩中の Fe-Ti 酸化鉱物は離溶しており、化学組成の定量はしなかった。

磁鉄鉱斑晶コアのウルボスピネル成分モル分率 ( $X_{Usp}$ ) は、尻吹峠および水沼火砕堆積物が 0.13-0.14, 沼沢湖火砕堆積物が 0.16-0.17 である。チタン鉄鉱コアのイルメナイト成分モル分率 ( $X_{Ilm}$ ) は、尻吹峠火砕堆積物が約 0.68, 水沼火砕堆積物が 0.67-0.69, 沼沢湖火砕堆積物が 0.70-0.71 である。したがって、活動期が新しい火砕噴火ほど、磁鉄鉱とチタン鉄鉱は高い  $X_{Usp}$  値と  $X_{Ilm}$  値をもつ傾向が見られる。

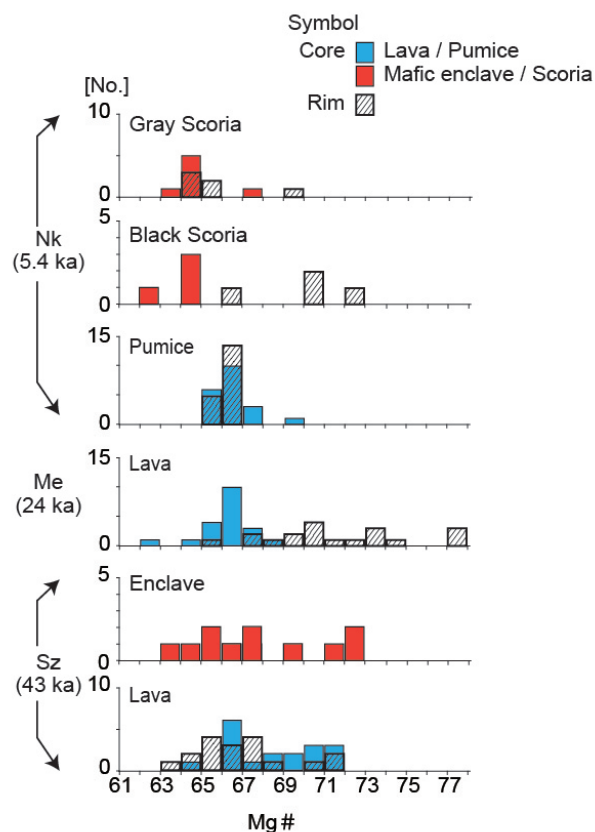


図 33 惣山溶岩 (Sz: 溶岩および苦鉄質包有岩), 前山溶岩 (Me), 沼沢湖火砕堆積物 (Nk) の本質物 (軽石, 黒色スコリアおよび灰色スコリア) 中に含まれる斜方輝石斑晶のコアとリムの Mg# ヒストグラム。

## 4.4 議論

### 4.4.1 珪長質マグマの岩石学的特徴とマグマ混合

沼沢火山は、過去 11 万年間、主に流紋岩～デイサイト質マグマの噴出を主体とした活動を継続させてきた。各噴火期の流紋岩～デイサイトは、全岩化学組成（図 27-29）、斑晶鉱物組合せ（表 2）、斑晶鉱物組成（図 30-33）を用いて詳細に比較すると、それぞれが固有の全岩化学組成、斑晶鉱物の組合せ・組成をもつ。このことは、各噴火期の流紋岩～デイサイトが、固有の珪長質端成分マグマに由来し、噴火期ごとに珪長質端成分マグマが更新したことを示唆する。以下では増渕ほか（2016）を引用し、噴火期ごとに噴出物の岩石学的性質をまとめながら、各噴火で活動した珪長質マグマの差異と特徴について述べる。

#### 110 ka 尻吹峠火砕噴火

110 ka の尻吹峠火砕噴火の本質物の斑晶組合せは、斜長石+石英+黒雲母+ホルンブレンド+カミングトン閃石+Fe-Ti 酸化鉱物である。本質物の全岩化学組成は不明であるものの、沼沢火山噴出物の中で最も石英斑晶に富み（表 2）、他の噴火期に比べ最も An に乏しいリム組成（最頻組成 An<sub>20-25</sub>）をもつことから（図 30）、71 ka に噴出した木冷沢溶岩（全岩 SiO<sub>2</sub> 量 69.1-71.7 wt.%）よりも SiO<sub>2</sub> 量に富む流紋岩質マグマであったと推測される。この流紋岩質マグマの斜長石斑晶は、木冷沢溶岩のそれと比べたとき、An 値の増加に伴う FeO<sup>\*</sup> の増加傾向に明瞭な違いが見られるが、同様の組成的特徴をもつ斜長石を伴うマグマは尻吹峠火砕噴火の後には全く噴出していない（図 31）。したがって、尻吹峠火砕噴火を起こした流紋岩質マグマのマグマ溜りは、噴火後に消滅したと考えるのが自然である。

#### 71 ka 木冷沢溶岩噴火

尻吹峠火砕噴火の終了後、71 ka に木冷沢溶岩噴火が開始し、約 0.1 km<sup>3</sup> DRE のマグマを噴出させた（山元，2003）。溶岩の斑晶組合せは斜長石+石英+黒雲母+ホルンブレンド+Fe-Ti 酸化鉱物であり、カミングトン閃石斑晶を欠く点で尻吹峠火砕噴火の軽石と異なる。斜長石の An 組成分布（図 30）は、尻吹峠火砕噴火の軽石中では明瞭なピークをもたないが、木冷沢溶岩では An<sub>25-35</sub> に明瞭な主ピークをもつ。また斜長石の FeO<sup>\*</sup> 量（図 31）は、尻吹峠火砕噴火の本質物では An の増加に伴い FeO<sup>\*</sup> 量が大きく増加するのに対し、木冷沢溶岩ではほぼ一定である。これらの特徴から、木冷沢溶岩噴火は尻吹峠火砕噴火時のマグマ溜りとは異なる流紋岩～デイサイト質マグマ（SiO<sub>2</sub> 量 69.1-71.7 wt.%）のマグマ溜りによってもたらされたと考えられる。木冷沢溶岩の全岩化学組成は、多くの組成変化図上（図 27）で他の噴火期の噴出物とは明瞭に異なる組成変化を示していることから、この噴火期のマグマ溜りも溶岩噴火後には消滅したと考えられる。

#### 53 ka 水沼火砕噴火

53 ka の水沼火砕噴火では、約 1 km<sup>3</sup> DRE のデイサイト質マグマが爆発的に噴出した（山元，

2003). 本質物の斑晶組合せは斜長石+石英+黒雲母+ホルンブレンド+カミングトン閃石+Fe-Ti 酸化鉍物である. 先行噴火で形成された木冷沢溶岩とは異なり, 本質物にカミングトン閃石斑晶が見られ(表2), 全岩化学組成が比較的均質であり木冷沢溶岩の組成範囲および組成変化傾向の延長上に点示されないこと(図27)から, この噴火は, 木冷沢溶岩噴火とは異なるデイサイト質マグマ( $\text{SiO}_2$ 量 68.1–69.0 wt.%)によってもたらされたと結論される.

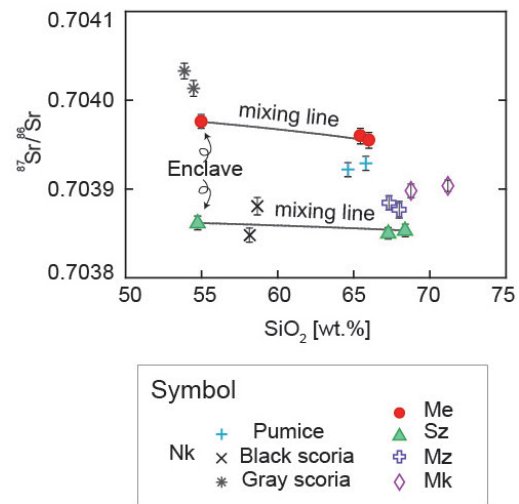


図34 沼沢火山噴出物のSr同位体組成. 惣山溶岩および前山溶岩の溶岩と苦鉄室包有岩の混合線は互いにほぼ平行である. Mk=木冷沢溶岩, Mz=水沼火砕堆積物, Sz=惣山溶岩, Me=前山溶岩, Nk=沼沢湖火砕堆積物.

#### 43 ka 惣山溶岩噴火

43 kaには惣山溶岩噴火が起こり, 約  $0.3 \text{ km}^3$  DREのマグマが噴出した(山元, 2003). 惣山溶岩の斑晶組合せは斜長石+石英+斜方輝石+黒雲母+ホルンブレンド+

Fe-Ti 酸化鉍物である. この噴火のデイサイト質マグマは, 水沼火砕噴火と極めてよく似た全岩化学組成(図27)と斑晶量(表2)をもつものの, カミングトン閃石斑晶を欠き, 斜方輝石斑晶をもつなど斑晶組合せが異なり,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比も誤差の範囲を超えて異なる(図34). このような観察事実から, 惣山溶岩噴火でも噴火の前に新たなデイサイト質マグマのマグマ溜りが形成されたと考えるのが自然である. また, 惣山溶岩噴火では安山岩質( $\text{SiO}_2$  55.5–58.2 wt.%)の苦鉄質包有岩が噴出しており, ホスト溶岩の斜長石や斜方輝石斑晶に見られる逆累帯の存在, 高温で安定なパーガス閃石斑晶の存在, バイモーダルな斜長石斑晶および斜方輝石斑晶コア組成分布などから, 先行噴火では見られなかったデイサイト質マグマと安山岩質マグマの混合が起こったことが明らかである. 苦鉄質包有岩中に見られる斑晶サイズの斜長石や石英は, マグマ混合によりデイサイト質マグマから取り込まれたものであると考えられる. また惣山溶岩中の斜長石と斜方輝石はバイモーダルな組成分布をもち, 高An斜長石と高 $\text{Mg}^\#$ 斜方輝石は安山岩質マグマに由来すると考えられる. すなわち, 安山岩質マグマは, 斑晶として高An斜長石+ホルンブレンド±高Mg斜方輝石+Fe-Ti酸化鉍物を含んでいたと考えられる.

#### 24 ka 前山溶岩噴火

24 kaには再び溶岩噴火が起こり, 約  $0.3 \text{ km}^3$  DREのマグマが噴出して前山溶岩ドームが形成された(山元, 2003). 本溶岩の斑晶組合せは斜長石+石英+斜方輝石+ホルンブレンド±黒雲母+Fe-Ti酸化鉍物である. このデイサイト質マグマ( $\text{SiO}_2$  62.7–65.4 wt.%)は, 水沼火砕噴火と惣山溶岩噴火で噴出したデイサイト質マグマとは $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が大きく異なり(図

34), これらの先行噴火期とは起源物質を異にする新たなデイサイト質マグマで満たされたマグマ溜りから噴出したと考えられる. 惣山溶岩噴火同様, 前山溶岩噴火でもデイサイト質マグマとともに安山岩質マグマ ( $\text{SiO}_2$  55.1–56.6 wt.%) が苦鉄質包有岩として噴出している. ホスト溶岩中では, 斜長石がバイモーダルな組成分布を示し, 高 An 斜長石は包有岩中の斜長石のピークと一致すること, 斜長石斑晶や斜方輝石斑晶が明瞭な逆累帯構造をもつこと, 高温で安定なパーガス閃石の存在から, 前山溶岩噴火でも, デイサイト質マグマ溜りへの安山岩質マグマの注入とこれら二つのマグマの混合が重要な役割を果たしたと考えられる. 斑晶鉱物の組成から考えると, 安山岩質マグマは斑晶として高 An 斜長石 + ホルンブレンド + Fe-Ti 酸化鉱物を含んでいたと考えられる.

#### 5.4 ka 沼沢湖火砕噴火

5.4 ka にはカルデラ形成を伴う沼沢湖火砕噴火が起き, 約  $2 \text{ km}^3$  DRE のマグマが爆発的に噴出した (山元, 2003). この噴火ではデイサイト質マグマ ( $\text{SiO}_2$  63.5–67.0 wt.%) が主に噴出したが, このほかに固有の全岩化学組成と  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比を有する 2 種類の安山岩質マグマ (黒色スコリア形成マグマと灰色スコリア形成マグマ) も噴出した (図 29). 沼沢湖火砕噴火で噴出したデイサイト質マグマは, 前山溶岩噴火のデイサイト質マグマと同じ斜長石 + 石英 + 斜方輝石 + ホルンブレンド + Fe-Ti 酸化鉱物という斑晶組合せをもつものの, 全岩化学組成 ( $\text{P}_2\text{O}_5$  量や  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比など; 図 27) と鉱物組成 (斜長石斑晶コアの  $\text{K}_2\text{O}$  量; 図 31) が異なる. したがって, 沼沢湖火砕噴火のデイサイト質マグマは, 前山溶岩噴火後に新たに再生されたデイサイト質マグマ溜りに由来すると考えられる. また, 黒色スコリア形成マグマと灰色スコリア形成マグマは, 斑晶鉱物の組成から考えると, 斑晶として高 An 斜長石 + パーガス閃石 + Fe-Ti 酸化鉱物を含んでいたと考えられる.

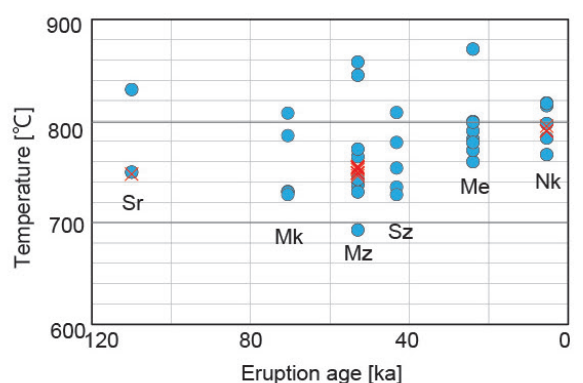
#### 4.4.2 珪長質マグマの温度・含水量・圧力条件

本項では, 沼沢火山で活動した珪長質マグマの温度・含水量・圧力条件について, 増淵ほか (2016) を引用し述べる.

沼沢火山は, いずれの噴火期にも珪長質端成分マグマ中に斜長石と角閃石 (広義のホルンブレンド) を含む. そこで, 流紋岩～デイサイト中の斜長石・角閃石ペアのコア組成から, Holland and Blundy (1994) のエデナイト・リヒテライト温度計 (モデル B; 平均絶対偏差  $\pm 40^\circ\text{C}$ ) を用いて晶出温度を求めた. 得られた温度は, 尻吹峠火砕堆積物が  $749\text{--}831^\circ\text{C}$ , 木冷沢溶岩が  $730\text{--}807^\circ\text{C}$ , 水沼火砕堆積物が  $693\text{--}845^\circ\text{C}$ , 惣山溶岩が  $735\text{--}808^\circ\text{C}$ , 前山溶岩が  $760\text{--}870^\circ\text{C}$ , 沼沢湖火砕堆積物が  $767\text{--}817^\circ\text{C}$  である (図 35). コア温度には, 沼沢湖火砕噴火以外で温度幅の広い温度分布が見られ, 水沼火砕噴火以降, 噴火期が新しいほど求められた最低晶出温度が増加する傾向が見られる.

磁鉄鉱・チタン鉄鉱ペアのコア組成から, Giorso and Evans (2008) の Fe-Ti 酸化鉱物温度計 (平均絶対偏差  $\pm 44^\circ\text{C}$ ; Blundy and Cashman, 2008) を用いて求めたマグマ温度は, 尻吹





Symbol  
 ● Plagioclase-Hornblende (Holland and Blundy, 1994)  
 × Fe-Ti oxides (Ghiorso and Evans, 2008)

図35 斜長石とホルンブレンドのペア (Holland and Blundy, 1994) と磁鉄鉱とチタン鉄鉱のペアから求めた沼沢火山の珩長質本質物・溶岩のマグマ温度。Sr= 尻吹峠火砕堆積物 (軽石), Mk= 木冷沢溶岩, Mz= 水沼火砕堆積物 (軽石), Sz= 惣山溶岩, Me= 前山溶岩, Nk= 沼沢湖火砕堆積物 (軽石)。

きた可能性がある。

沼沢火山の活動初期に発生した水沼火砕噴火と尻吹峠火砕噴火は、本質物にホルンブレンド、カミングトン閃石および黒雲母という3種の含水鉱物が斑晶として共存するのが特徴である。水沼火砕噴火の本質軽石と同様の全岩化学組成と斑晶組合せをもつピナツボ火山1991年噴火のデイサイト ( $\text{SiO}_2$  量約 66.5 wt.%) を用いた相平衡実験では、これらの含水鉱物が共存するためには、100 MPa 以上の圧力が必要なこと (Rutherford and Devine, 1996)、マグマ溜りが想定される 220 MPa の圧力では高含水量 (> 6 wt.%) かつ水分圧 ( $P_{\text{H}_2\text{O}}$ ) が全圧 ( $P_{\text{Total}}$ ) の 0.8 倍以上という水飽和に近い条件が必要なが分かっている (Scaillet and Evans, 1999)。また、この実験では、含水鉱物の安定領域の温度上限が、カミングトン閃石 (750°C)、黒雲母 (750°C; S の付加により 850°C まで上昇)、ホルンブレンド (900°C) の順に高温になることが明らかにされている。水沼火砕噴火の本質物中のホルンブレンド斑晶には、単独斑晶として存在するものと周囲にカミングトン閃石が成長しているものが見られるため、噴火直前のマグマ溜り内のマグマにはホルンブレンドが安定に存在できる部分とカミングトン閃石が安定に存在できる部分が共存していたと推測される。すなわち、形成初期にはマグマ全体がやや高温でありホルンブレンドのみが安定だったものが、噴火直前にはマグマの一部がカミングトン閃石の安定な温度 (< 750°C) まで降下し、溜り内部に不均質な温度構造が形成された後に噴火した可能性が高い。また、水沼火砕噴火の本質物には、逆累帯を示す斜長石斑晶が多く見られる (図31)。水沼火砕噴火では苦鉄質マグマの噴出が全く見られないこと、リム部で Ca が増加する斜長石が清澄な外観を呈しており、汚濁帯 (dusty zone: Tsuchiyama, 1985) などのマグマ混合によ

峠火砕堆積物が 748°C (酸素フュガシテイ  $\log f_{\text{O}_2} = \text{NNO} + 1.57$ )、水沼火砕堆積物が 746–755°C (同  $\text{NNO} + 1.54 - 1.56$ )、沼沢湖火砕堆積物が 790–795°C (同  $\text{NNO} + 1.39 - 1.41$ ) であり、斜長石・角閃石ペアから求めた温度と概ね一致する (図35)。

尻吹峠火砕噴火と水沼火砕噴火では、低温下や高含水量・高  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  条件下で安定なカミングトン閃石斑晶を含むが、惣山溶岩噴火以降は高温下や低含水量・低  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  条件下で安定な斜方輝石斑晶 (Scaillet and Evans, 1999) が晶出している。エデナイト・リヒテライト温度計は、平均絶対偏差が  $\pm 40^\circ\text{C}$  と大きく、わずかな温度の差異や変化を議論するのは難しいが、惣山溶岩噴火を境に噴出したマグマの温度上昇や含水量の減少が起

---

る反応組織が見られないことから、このような逆累帯がデイサイト質マグマ溜りへの苦鉄質マグマの注入・混合とそれに伴うデイサイト質マグマの昇温によるものとは考えにくい。斜長石が晶出しているマグマ中でカミングトン閃石が後期晶出した場合、Caに乏しいカミングトン閃石の晶出により液相のCa量が増加することで斜長石斑晶の周囲にAnに富むリムが形成される(Pietranik et al., 2009)。カミングトン閃石斑晶をもつ他の噴出物(尻吹峠火砕噴火の本質物)にも少量の逆累帯構造をもつ斜長石斑晶が見られるが、これらも同様の原因で形成された可能性が高い。



## 第5章 沼沢湖火砕噴火（カルデラ形成噴火）のマグマ供給系とマグマ溜りの内部構造

### 5.1 沼沢湖火砕堆積物中に見られる多様な本質物とその構成物組成

5400年前の沼沢湖火砕噴火は、沼沢火山の11万年間の活動の中で最も爆発的な噴火である（山元，1995；山元，2003）。沼沢湖火砕噴火は、火砕流噴火，プリニー式噴火，マグマ水蒸気爆発，プリニー式噴火と推移したことが明らかとなっており，堆積物は4つのユニットに分けられる（山元，2003）。沼沢湖火砕噴火は，堆積物中に多様な本質物が見られることが特徴である。山元（1995；2003）でも指摘されているように，噴火の前半にはデイサイト質軽石，後半には安山岩質スコリアが噴出する。増淵・石崎（2011）は，沼沢湖火砕堆積物に含まれる本質物を，その外観色と岩石学的な特徴（斑晶鉱物の形態と全岩化学組成）から白色軽石，灰色軽石，黒色スコリアと灰色スコリアの4タイプに分類し，ユニットごとの構成物組成を求めた（図36）。

ユニットI（火砕流堆積物）は，大量の軽石と軽石起源の結晶（47-83 wt.%），少量の黒色スコリア（2-14 wt.%），異質岩片（9-49 wt.%）からなる。軽石はほとんどが白色軽石であるが，本ユニット上部の小規模火砕流堆積物の露頭（図17，露頭Nk-C）では，灰色軽石が産出する（軽石全体の1-18 wt.%）。

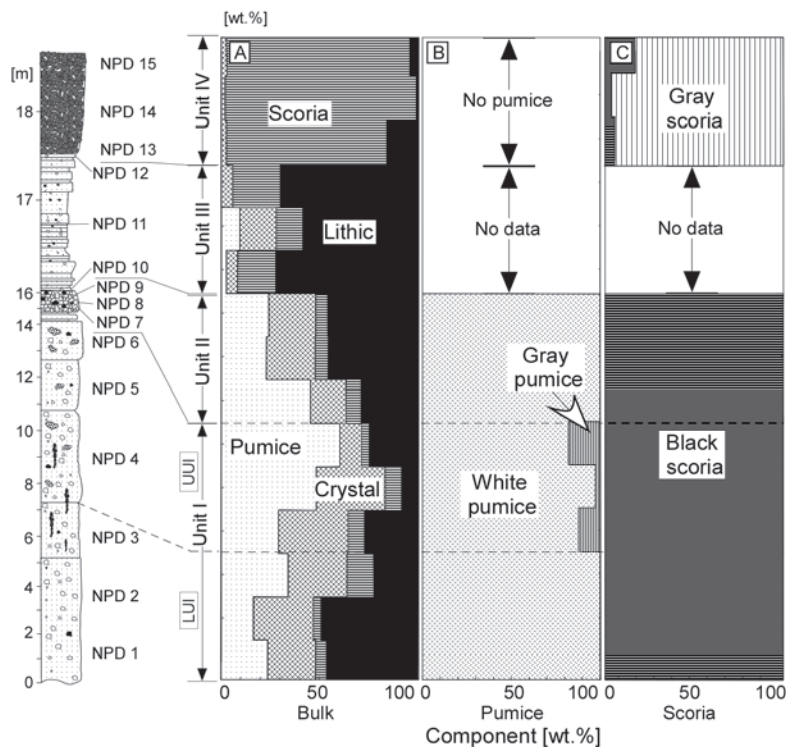


図36 沼沢湖火砕堆積物の模式柱状図と構成物組成。増淵・石崎（2011）のFig.5を一部引用。

ユニットII（降下軽石堆積物）は、ユニットI同様に軽石と軽石起源の結晶を主体とする構成物組成をもつ。本質物として白色軽石と黒色スコリアが含まれ、白色軽石：黒色スコリア比は88:12-98:2である。

表3 沼沢湖火砕流堆積物に含まれる3タイプの白色軽石の構成物組成（個数を示してあり、カッコ内は存在比）。

堆積物	露頭	軽石のタイプ		
		WP	PpP	PrP
Unit I 上部	Nk-H	770 (92 %)	0 (0 %)	68 (8 %)
Unit I 下部	Nk-F	1106 (94 %)	32 (3%)	38 (3 %)

ユニットIII（マグマ水蒸気爆発による火砕サージ堆積物）は、構成物の約半分以上（47-83 wt.%）が異質岩片からなる。本質物として白色軽石と黒色スコリア、灰色スコリアが含まれる。本ユニットは細粒火山礫から火山灰からなるため、黒色スコリアと灰色スコリアの区別をすることはできない。白色軽石：スコリア比は5:95-94:6である。

ユニットIV（降下スコリア堆積物）は、堆積物の81-96 wt.%をスコリアが占め、軽石は含まれない。スコリアは黒色スコリアと灰色スコリアが見られるが、ほとんどが灰色スコリアである（スコリア全体の85-97 wt.%）。

本研究により、ユニットIの白色軽石には、斑晶量の異なる3タイプがあることが明らかとなった。本論ではそれらの軽石を、白色軽石（以降、White Pumiceの略でWPとする）、斑晶に乏しい軽石（以降、Phenocryst-poor Pumiceの略でPpP）、微斑晶に富む軽石（以降、Phenocryst-rich Pumiceの略でPrP）に分けられる（図37）。ユニットIで、この3種の白色軽石の構成物組成を求めた（表3）。ユニットIの白色軽石は約90%がWPであるが、下部の大規模火砕流堆積物（図17、露頭Nk-F）では、PpPを3%、PrPを3%含む。ユニットI上部の小規模火砕流堆積物（図17、露頭Nk-H）では、PrPを8%含む（全て個数%）。このように、PrPは少量ではあるもののユニットIを通して一定量存在するが、PpPは噴火初期の堆積物中でしか見られない。

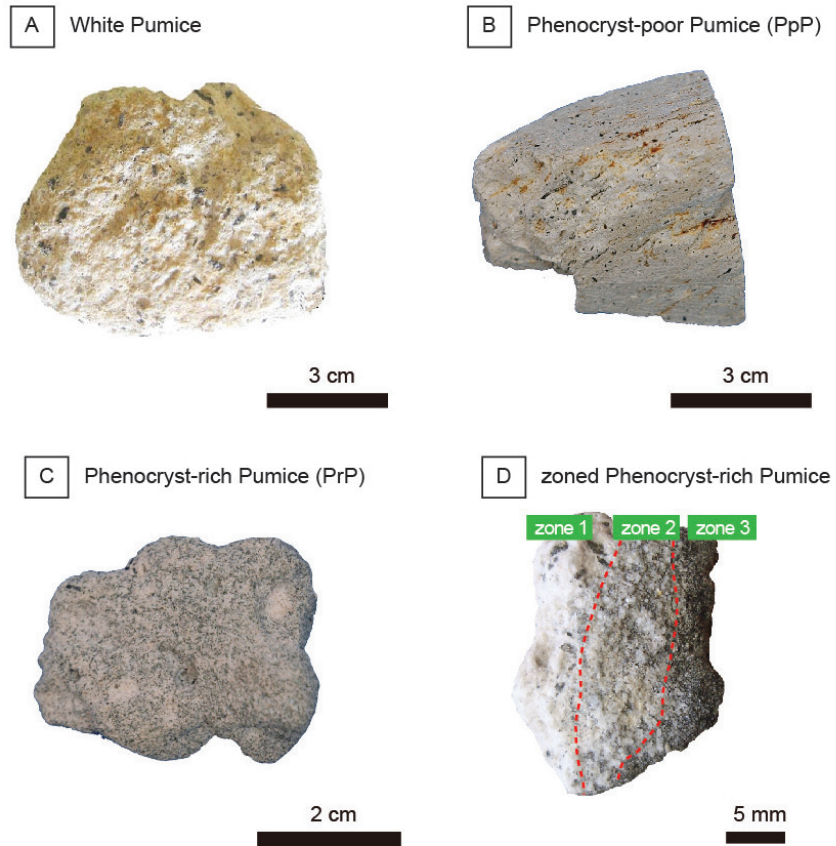


図37 沼沢湖火砕堆積物中に見られる3タイプの白色軽石. A: 白色軽石 (WP), B: 斑晶に乏しい軽石 (PpP), C: 微斑晶に富む軽石 (PrP), D: WP と PrP が層構造をなして遷移するもの.

## 5.2 岩石記載

本節では、沼沢湖火砕堆積物で見られる多様な本質物の記載岩石学的特徴について述べる。なお、灰色軽石は白色軽石と同一組成のデイサイト質マグマが火道上昇時に強い剪断応力がかかることで形成されたと考えられている (Ishizaki et al., 2009)。したがって、沼沢湖火砕噴火では白色軽石 (WP)、斑晶に乏しい軽石 (PpP) と微斑晶に富む軽石 (PrP) を形成した3タイプのデイサイト質マグマと2種類の安山岩質マグマが活動したと考えられる。そこで、以下では3タイプの軽石と2種類のスコリアの記載岩石学的特徴と斑晶モード組成 (Appendix 2) について述べる。なお、2種類のスコリアについては、本論 4-1 で述べているため、そちらを参照されたい。

### 5.2.1 白色軽石 (WP)

斑晶量 38–52 vol.% の明色斑状の軽石 (図 37A; 気泡量 42–73 vol.%) で、完全ガラス質の石基中に斑晶として斜長石, 石英, 角閃石 (ホルンブレンド), 斜方輝石, 磁鉄鉱およびチタン鉄鉱を含み (図 44), 石基鉱物として燐灰石を含む。斑晶の多くは自形~半自形の形状をもつが、少量の他形斑晶も見られる (図 38)。斜長石は斑晶量 24–32 vol.% で、最大径 1.8 mm である。斜方輝石, 角閃石, 磁鉄鉱, チタン鉄鉱を包有し, 斜方輝石や角閃石と集斑することがある。石英は斑晶量 1–7 vol.%, 最大径 1.0 mm である。ホルンブレンドは斑晶量 4–11 vol.% で、最大径 2.1 mm である。しばしば斜長石, 斜方輝石, 石英, Fe-Ti 酸化鉄物を包有する。斜方輝石は斑晶量 1–3 vol.%, 最大径 1.4 mm である。Fe-Ti 酸化鉄物は斑晶量 0.8–1.9 vol.%, 最大径 1.2 mm である。WP は 42–73 vol.% の気泡を含む。気泡は最大で 300  $\mu\text{m}$  で円形~伸長した形を示し, 気泡の連結が進んでいる。

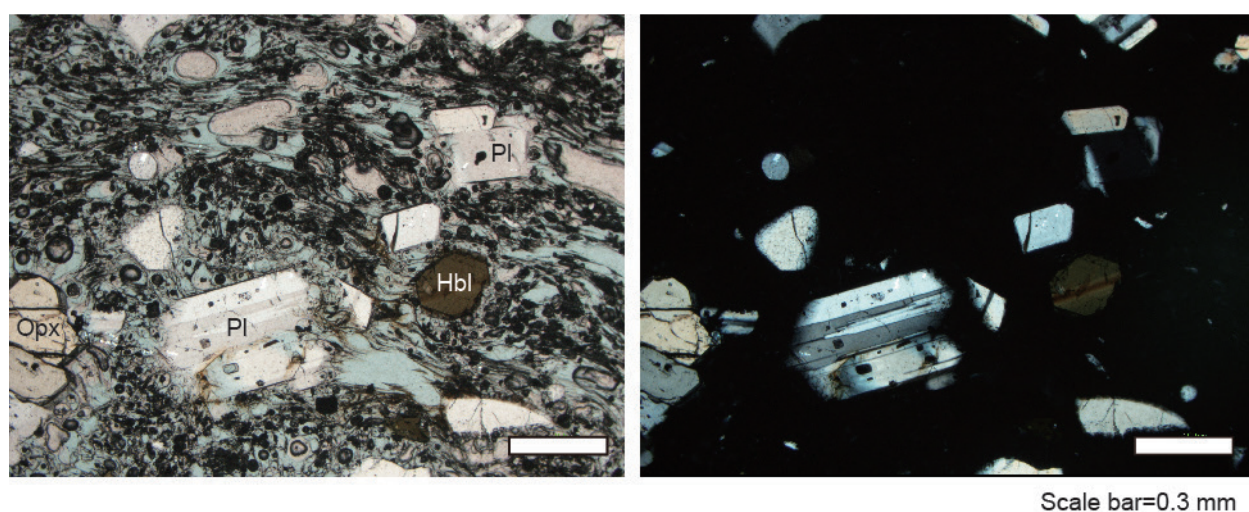


図 38 WP の薄片写真。Pl= 斜長石, Hbl= ホルンブレンド, Opx= 斜方輝石。

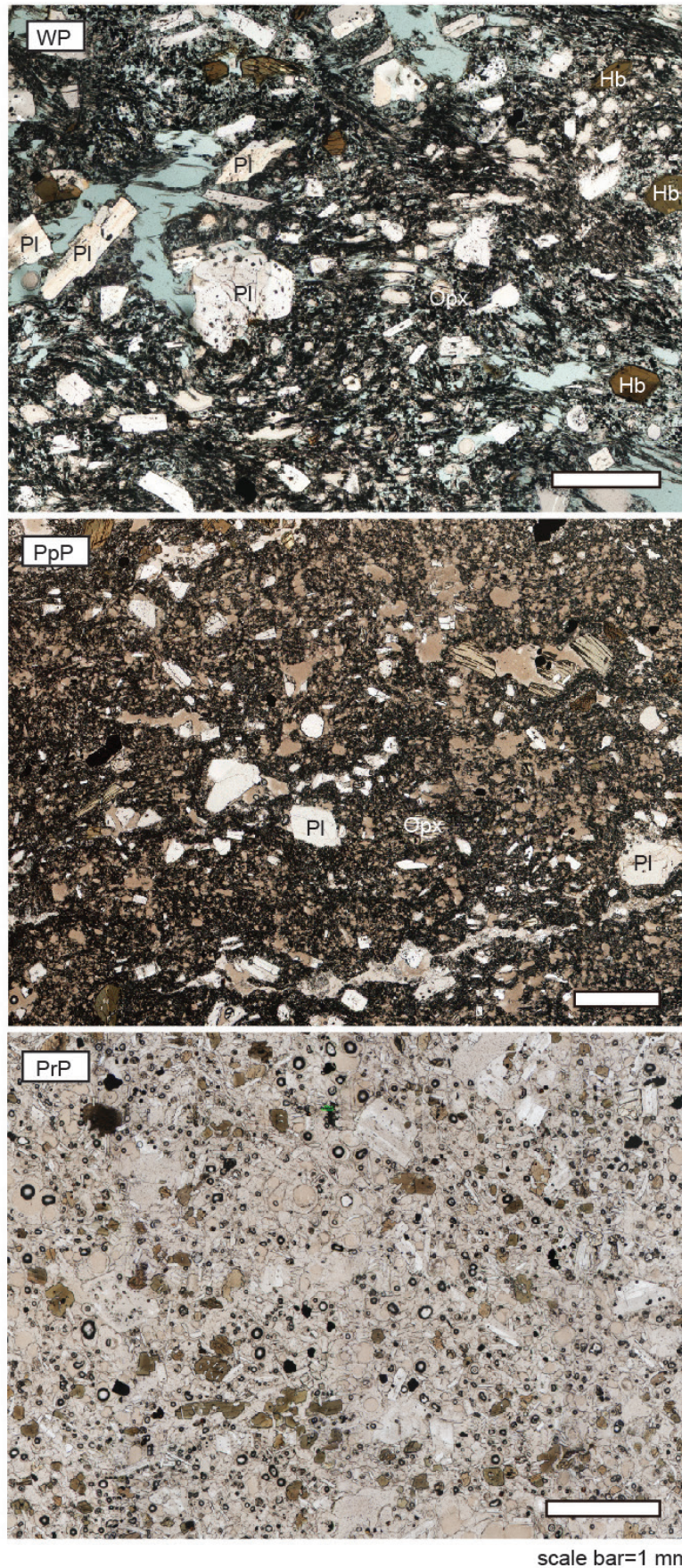
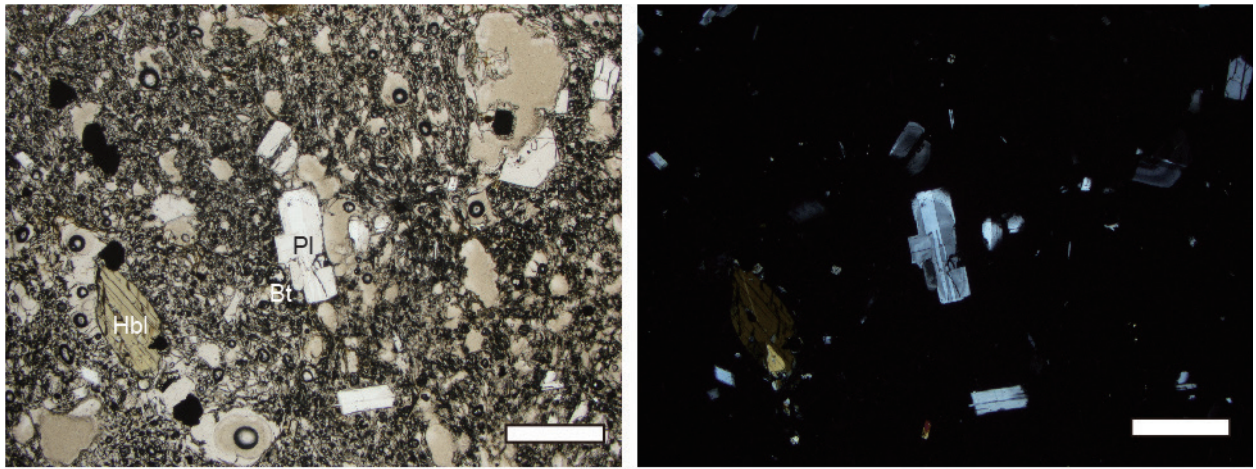


図39 WP, PpP, PrPの薄片写真. 複数の写真をPhotoshopで合成し広範囲を示した.



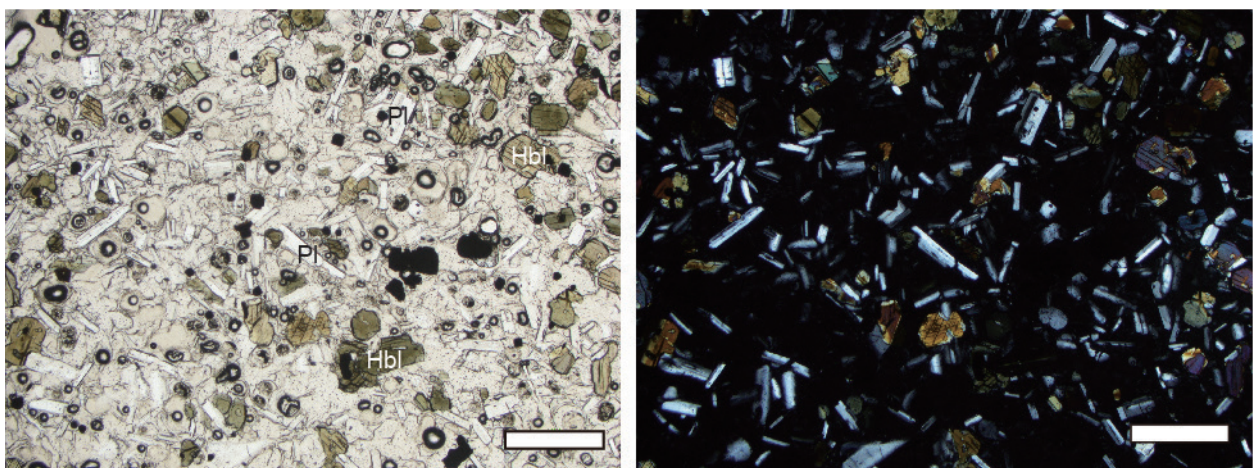


Scale bar=0.3 mm

図40 PpPの薄片写真.PI=斜長石, Hbl=ホルンブレンド

### 5.2.2 斑晶に乏しい軽石 (PpP)

WPと似るが斑晶量が22–31 vol.%とやや少なく(図37A, 39), 斑晶として斜長石, 角閃石(ホルンブレンド), 斜方輝石, 磁鉄鉱およびチタン鉄鉱を含み, 石英を含むこともある(図44). 石基鉱物として燐灰石を含む. 斑晶の多くは半自形を示し, 融食形のものも見られる. また, 斑晶サイズはWPと比べ全体的に小さい. 斜長石は斑晶量15–24 vol.%で, 最大径1 mmである. 石英は含まれないかWPと比べてやや少なく(0–7 vol.%), 融食形を示す. ホルンブレンドは斑晶量3–6 vol.%で, 最大径2.2 mmである. ホルンブレンドは分解し, 結晶周囲が細粒な単斜輝石に取り囲まれているものもみられる. 斜方輝石は斑晶量1–3 vol.%で, 最大径は1.1 mmである. 気泡量は69–76 vol.%と一様に高く, 気泡はWPに比べ細長く伸長していることが多い.



Scale bar=0.3 mm

図41 PrPの薄片写真.大量の斜長石とホルンブレンドの微斑晶からなる.PI=斜長石, Hbl=ホルンブレンド.

### 5.2.3 微斑晶に富む軽石（PrP）

斑晶量（微斑晶を含む）48–71 vol.% の軽石で（図 37C），角閃石（ホルンブレンド）と斜長石の微斑晶に富む（図 39, 41）. 単独あるいは WP 中にパッチ状に取り込まれて産し，斑晶として斜長石，角閃石，磁鉄鉱，チタン鉄鉱を含み，石英，斜方輝石を含むこともある（図 44）. 石基に燐灰石を含むものと含まないものがある．斑晶サイズ（ $\geq 0.3$  mm）の斜長石は，斑晶量 16–31 vol.% で最大径 1.1 mm であるが，ほとんどが 0.5 mm 未満の斜長石である．微斑晶サイズの斜長石は斑晶量 1–25 vol.% である．ホルンブレンドは，斑晶サイズのものが 2–19 vol.%，微斑晶サイズのものが 0–21 vol.% 含まれる．斜長石の微斑晶を多く含む試料にホルンブレンドの微斑晶が多く含まれる．石英はほとんどの試料で含まれず，1 vol.% 未満である．斜方輝石は斑晶量 0–2 vol.% で，最大径 1 mm である．気泡量は約 64–75 vol.% で，最大で 200

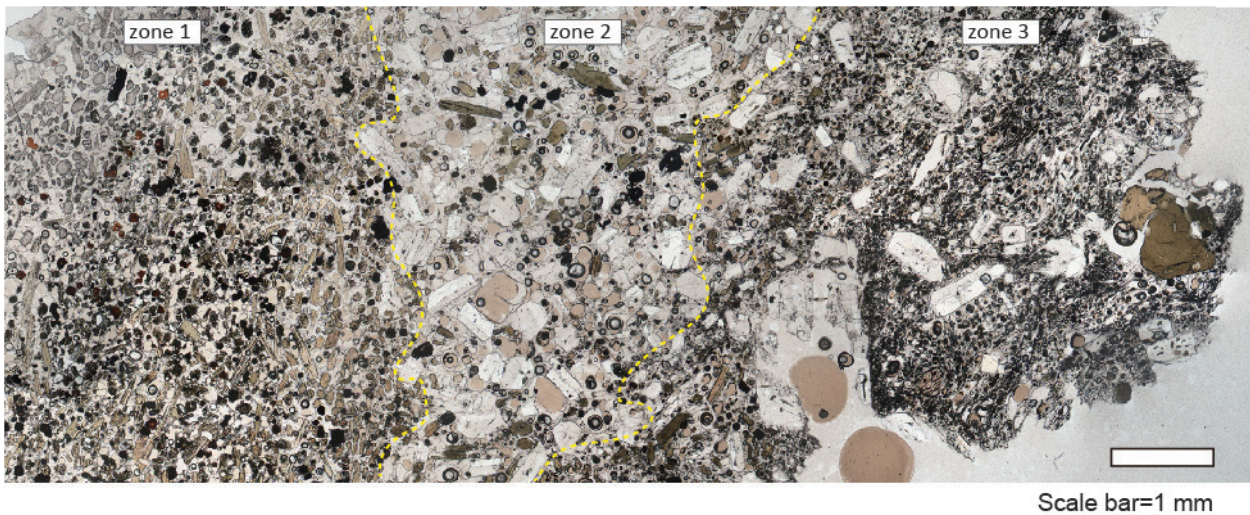


図 42 WP と PrP が層構造をなす軽石の薄片写真. 複数の写真を Photoshop で合成し広範囲を示した.

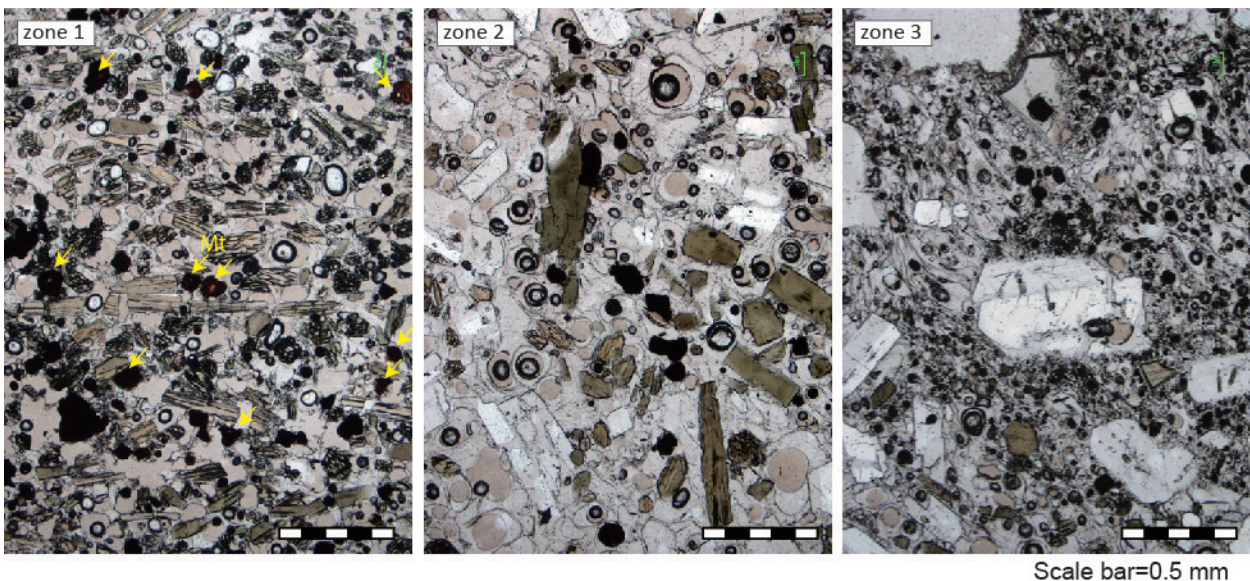


図 43 WP と PrP が層構造をなす軽石の zone 1～3 の薄片写真. zone 1 の磁鉄鉱は変質し，赤色を呈す.

μm サイズの円形を示す。

PrP の一部の試料は、斑晶量・組合せの異なる3層構造をなし、WP へと漸移する（図 37D, 42）。斑晶量の最も多い部分（zone 1）は、斑晶量が約 71 vol.% に達し、自形のホルンブレンド、磁鉄鉱、チタン鉄鉱および少量の斜長石（角閃石をオフィテックに包有する）を含む（図 43）。磁鉄鉱は、周囲から変質が進み、透過光で濃赤～茶色を呈し、わずかに光を透過する（図 43）。zone 1 は、単独で産する PrP と同様の斑晶量と斑晶組合せをもつ zone 2（図 43）へと漸移し、さらに zone 2 は WP と同様の斑晶量と斑晶組合せをもつ zone 3 へと漸移する（図 43）。その境界は鏡下で明瞭に認めることができるものの、互いが混交し、鋸歯状である。

## 5.2.4 黒色スコリア

4.1.6 を参照のこと

## 5.2.5 灰色スコリア

4.1.6 を参照のこと

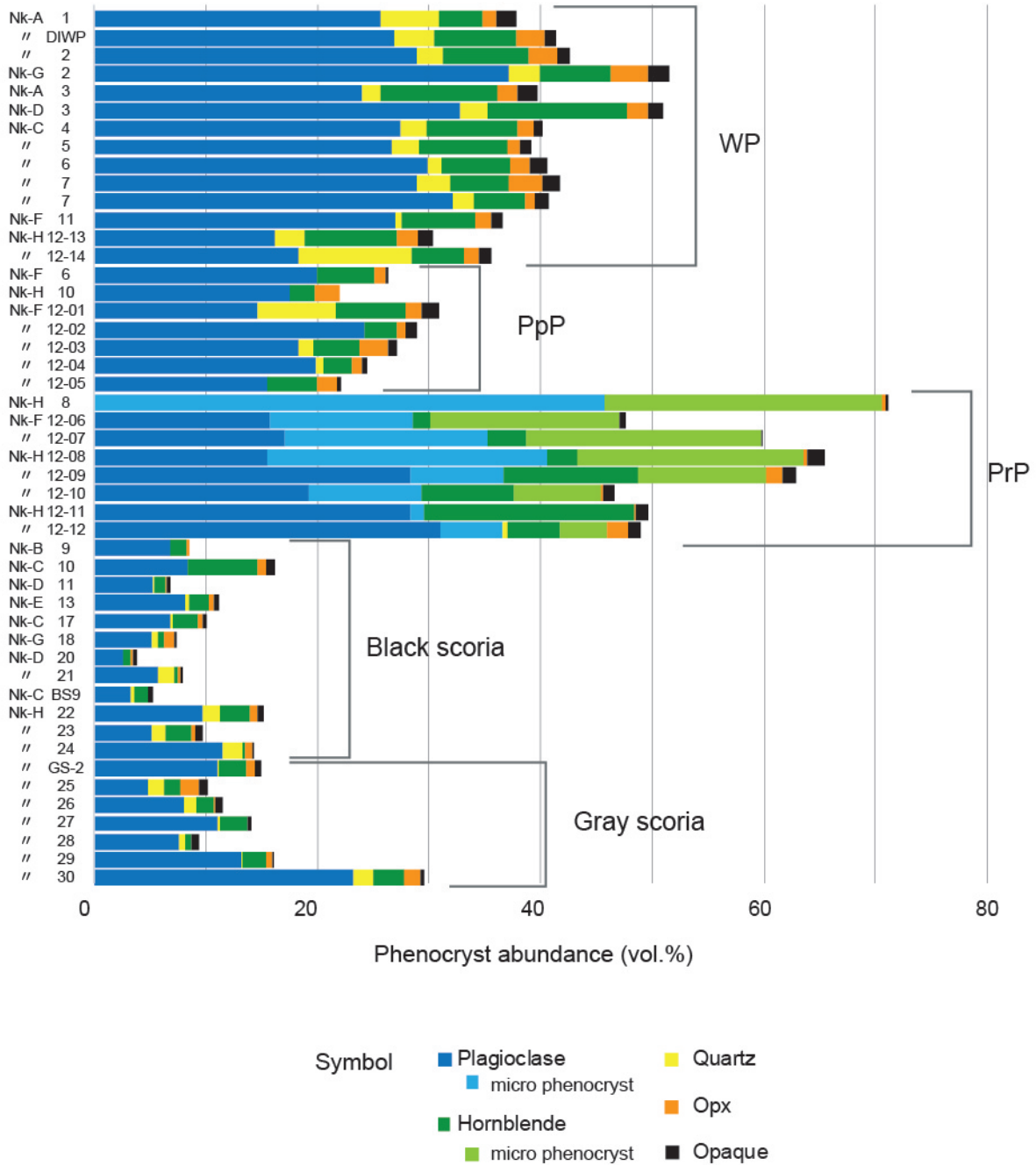


図44 沼沢湖火砕堆積物の本質物の斑晶モード組成. 斜長石と角閃石(ホルンブレンド)の微斑晶(0.1-0.3 mm)はPrPのみで計測した.

### 5.3 全岩化学組成

本節では、沼沢湖火砕堆積物の本質物の全岩化学組成について述べる。なお、WP、黒色スコリアおよび灰色スコリアのデータは増渕・石崎（2011）および増渕ほか（2016）を引用する。全岩化学組成の分析データは付録（Appendix 3）に示してある。

#### 5.3.1 主成分および微量成分組成

沼沢湖火砕堆積物の軽石の全岩 SiO<sub>2</sub> 量は、WP (SiO<sub>2</sub> 64.7–67.1 wt.%) と PpP (SiO<sub>2</sub> 63.7–66.0 wt.%) はデイサイト、PrP (SiO<sub>2</sub> 55.3–62.0 wt.%) は安山岩に分類される（図 45）。WP と PpP は同様の全岩化学組成をもつが、WP と比較し PpP の方がやや全岩 SiO<sub>2</sub> 量が乏しい。また、PpP の一部の試料は WP と比較し FeO に乏しく Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Sr に富む（図 45）。PrP は、WP や PpP と比較し多様な組成をもつ。PrP の全岩 SiO<sub>2</sub> 量は沼沢湖火砕堆積物のスコリアと同様であるが、ハーカー図上ではそれらとは明瞭に異なる組成範囲にプロットされる。PrP はスコリアと比較し MnO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Sr および Zr に乏しく、MgO、K<sub>2</sub>O、Rb、Y、Ba および V に富む。また、PrP は P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> に富むグループ（0.19–0.23 wt.%）と乏しいグループ（0.03–0.08 wt.%）に 2 分できる（図 45）。

#### 5.3.2 希土類元素組成パターン

図 46 に代表的な試料の希土類元素組成について、コンドライトで規格化（Sun and McDonough, 1989）した組成パターンを示す。

WP と PpP は類似した希土類元素パターンを示すが、PpP は WP に比べやや希土類元素に富む。

PrP には WP および PpP と似たパターンを示すものと、それらより希土類元素に富むものがある。前者は弱い正の Eu 異常を示すが、後者は負の Eu 異常を示す。また後者は、沼沢湖火砕噴火の本質物の中で最も希土類元素に富み、黒色および灰色スコリアよりも希土類元素に富む。

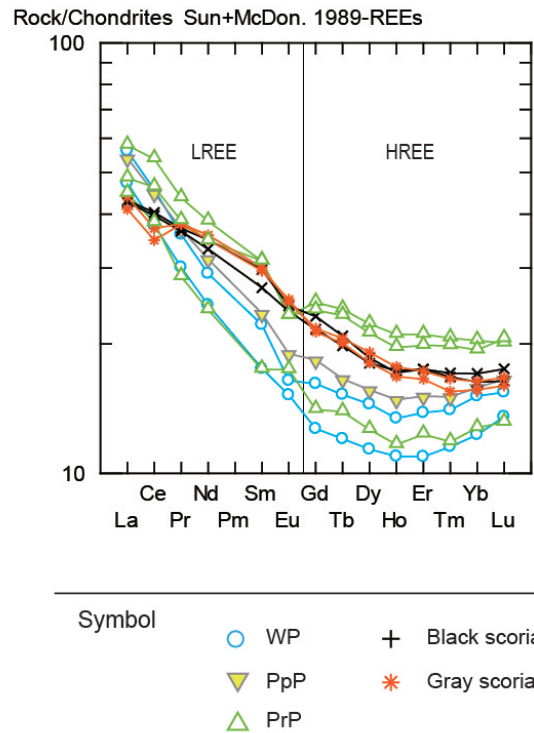


図 46 沼沢湖火砕堆積物の本質物の希土類元素組成パターン。

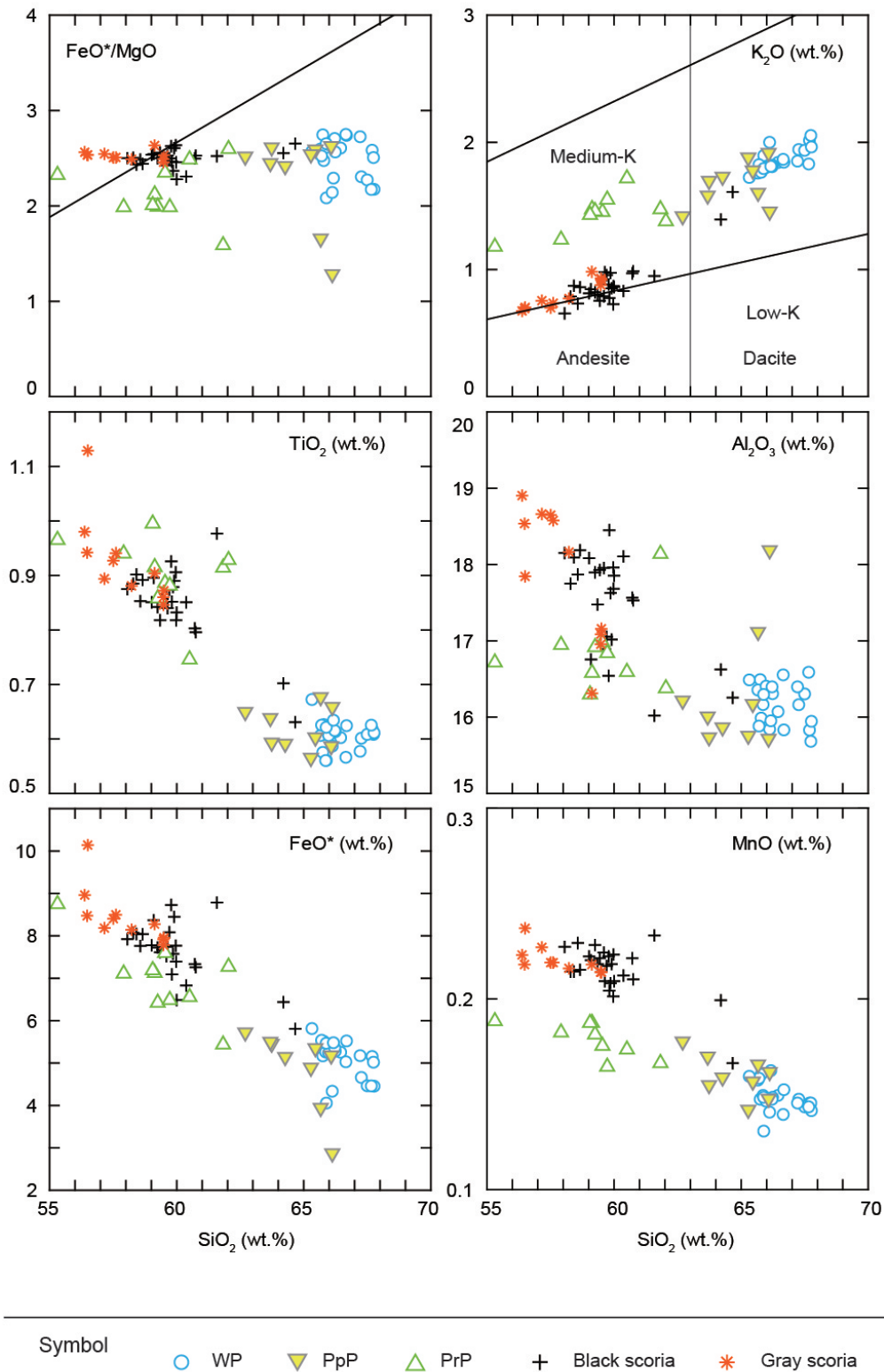


図45 沼沢湖火砕堆積物の本質物（軽石とスコリア）の全岩化学組成のハーカー図.  $\text{FeO}^*/\text{MgO}$ - $\text{SiO}_2$  図の境界線は Miyashiro (1974),  $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$  図の境界線は Peccerillo and Taylor (1976) に従った.

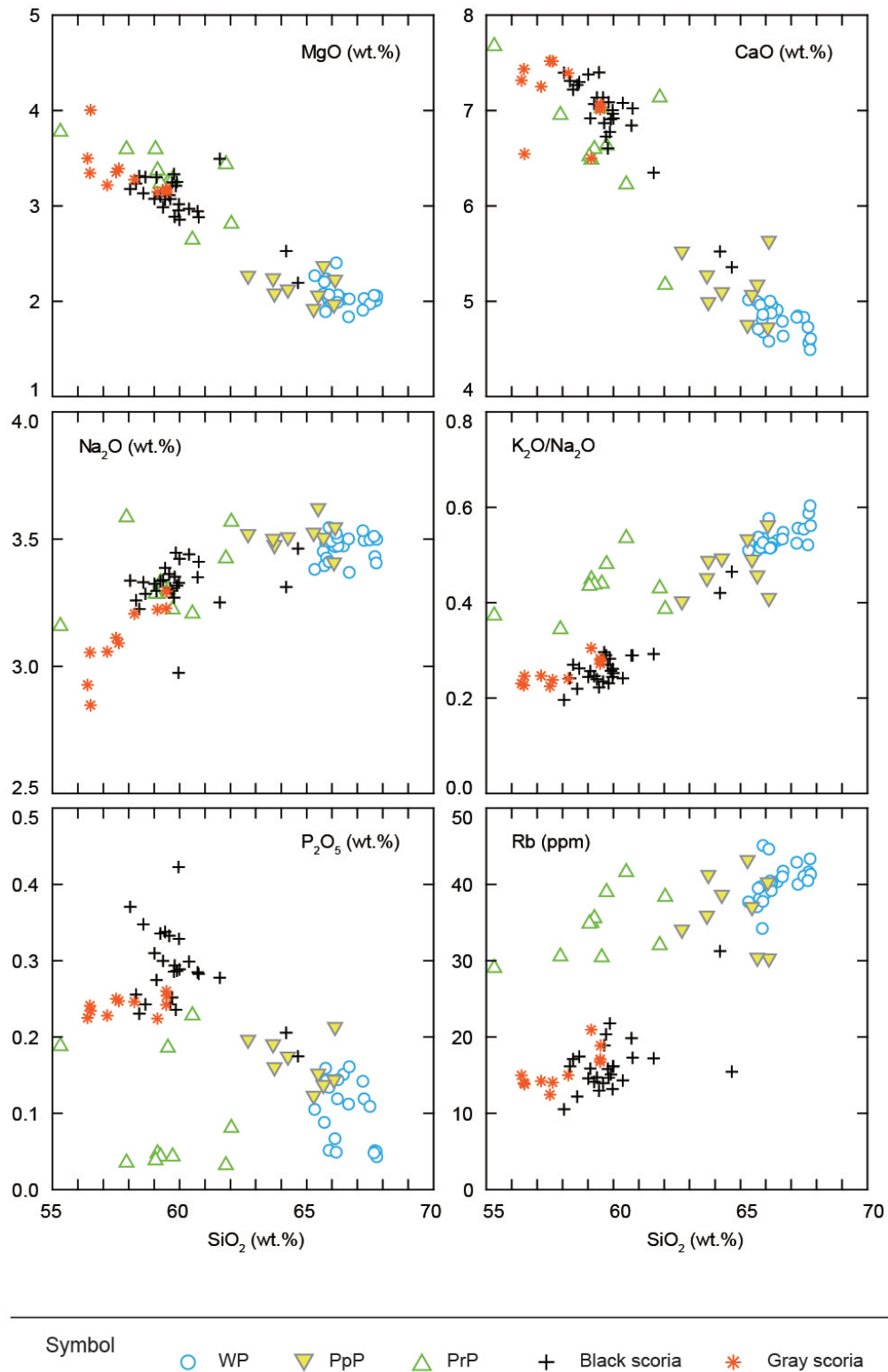


図45 (続き) 沼沢湖火砕堆積物の本質物（軽石とスコリア）の全岩化学組成のハーカー図。

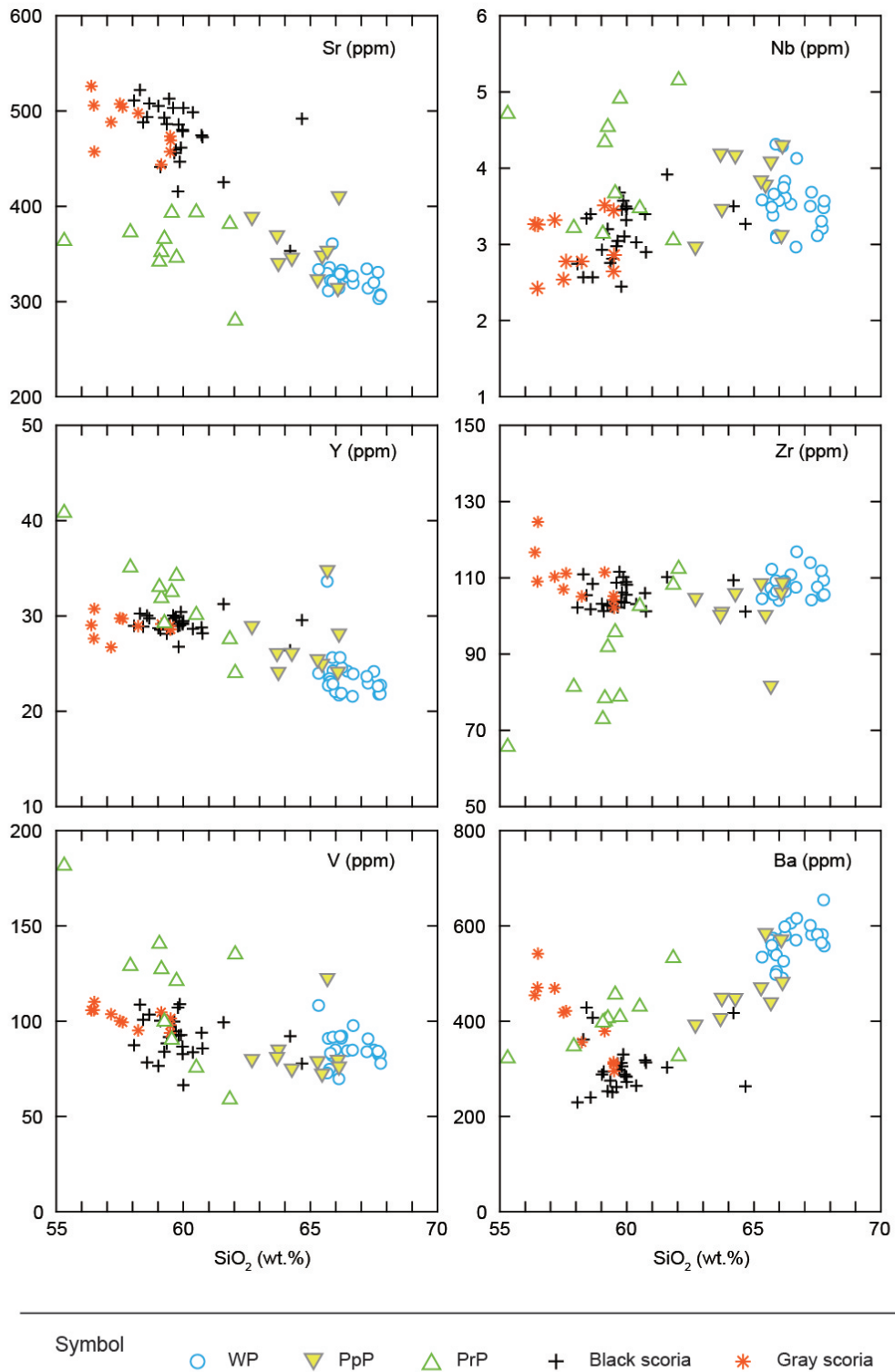


図45（続き） 沼沢湖火砕堆積物の本質物（軽石とスコリア）の全岩化学組成のハーカー図.



### 5.3.3 石基ガラス組成

沼沢湖火砕堆積物の本質物の石基ガラス組成を求めた。なお、スコリアは石基中に大量のマイクロライトが存在し、分析に必要なだけのビーム面積を得られないため、3タイプの軽石のみ分析を行った。なお、代表的な分析値は付録A3に示した。

石基ガラス組成のSiO<sub>2</sub>量は、WP 77.4–78.2 wt.%（100 wt.%再計算；以下同様）、PpP 76.1–78.8 wt.%、PrP 77.6–78.6 wt.%で、いずれも約78 wt.%であるものの、PpPの石基ガラス組成はWPやPrPと比べやや低い。また、各成分の組成図（図47）を見てみると、WPは均質な組成を示すが、PpPはWPと比較しAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeOおよびCaOに富み、K<sub>2</sub>Oに乏しい傾向がある。PrPはWPと同様の組成を示すが、PrPの一部はWPよりAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に富み、K<sub>2</sub>Oに乏しい。

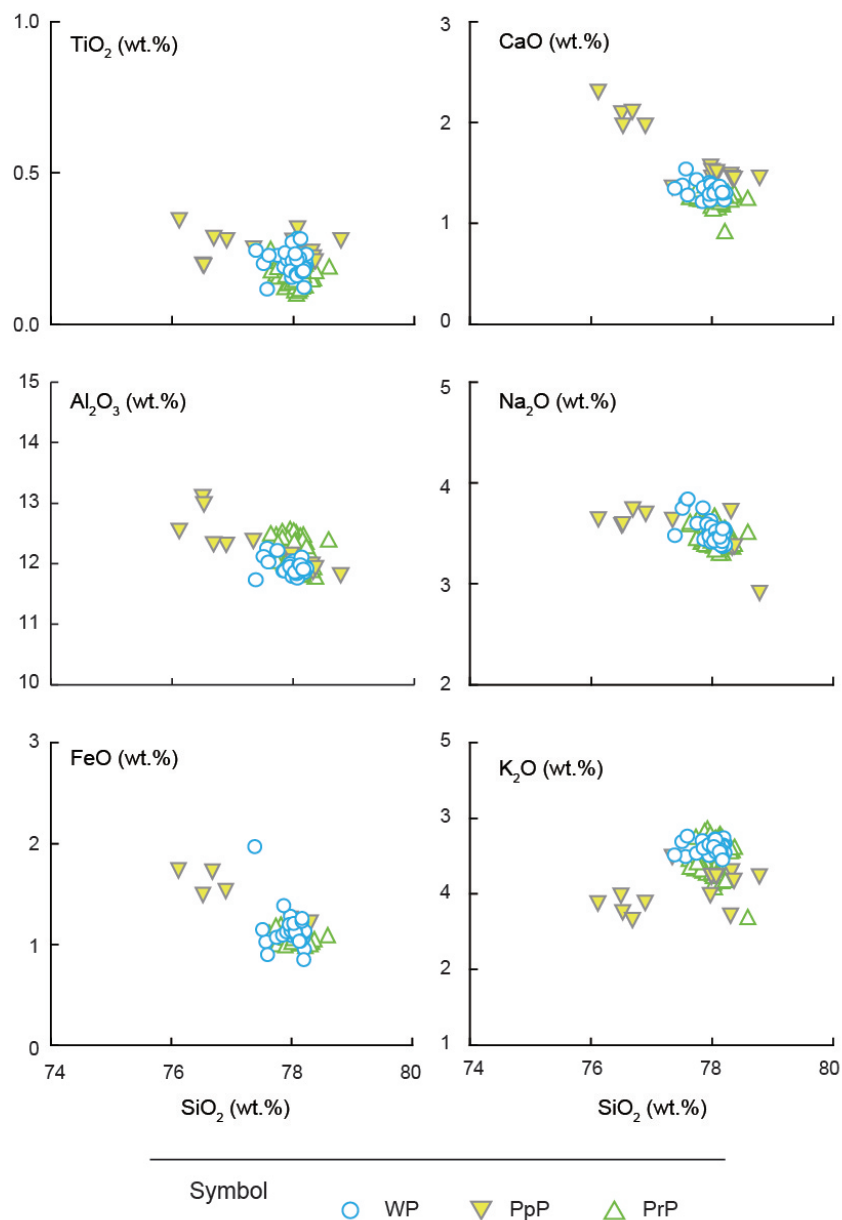


図47 沼沢湖火砕堆積物の軽石の石基ガラス組成のハーカー図。

### 5.3.4 Sr および Nd 同位体組成

沼沢湖火砕堆積物の本質物（軽石とスコリア）の  $\text{SiO}_2$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  図（図 48）を見てみると、同様の全岩  $\text{SiO}_2$  量をもつ WP と PpP は、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比も 0.703922–0.703943 でほぼ同一である。PrP の全岩  $\text{SiO}_2$  量は黒色スコリアと似るが、その  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比（0.703909–0.703940）は黒色スコリア（0.703848–0.703881）より高く、WP および PpP とほぼ同一である。また、PrP には、違いはわずかなものではあるものの、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比に富むものとやや乏しい 2 つのグループが認められる。前者は WP および PpP と同様の、後者は黒色スコリアに近い  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比をもつ。

$\text{SiO}_2$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  図（図 48）を見てみると、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比は 0.51284–0.51287 で、いずれの本質物も誤差の範囲で同様である。PrP には  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比に富むもの（0.512865–0.512873）とやや乏しい（0.512841）2 つのグループが認められる。前者は黒色スコリア（0.512857–0.512864）と、後者は WP および PpP（0.512843–0.512854）と誤差の範囲で一致する。

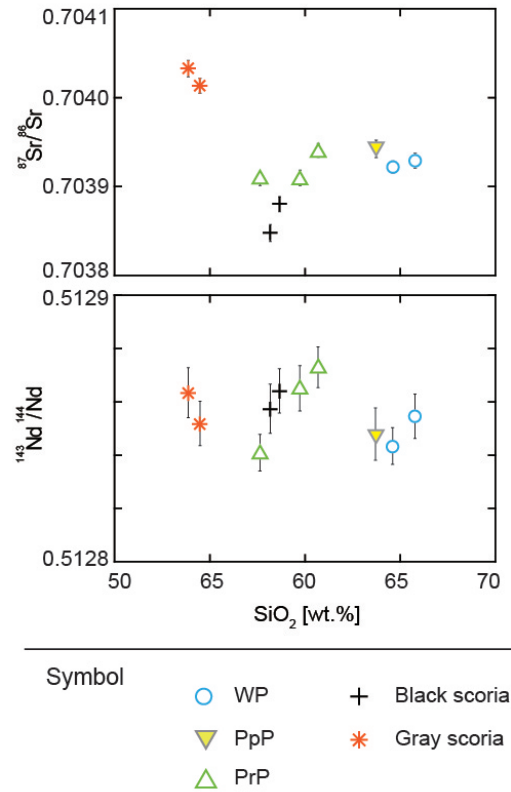


図 48 沼沢湖火砕堆積物の本質物（軽石とスコリア）の Sr および Nd 同位体組成図。

## 5.4 鉱物組成累帯構造

沼沢湖火砕堆積物の軽石中に含まれる斑晶鉱物は、軽石のタイプごとに特徴的な組成累帯構造をもつ。その累帯構造は複雑であり、定量的なタイプ分けを行うことは難しいが、本節では斜長石、ホルンブレンド、斜方輝石斑晶の組成累帯構造について述べる。なお斜方輝石では特徴的な累帯構造が見られたため、併せてEPMAによる線分析も行った。

### 5.4.1 斜長石

軽石中に含まれる斜長石は複雑な累帯構造をもつが、主にコアの組成と組織から次の5タイプに分けられる（図49）。

Pl-a：波動累帯構造をもつもの。

Pl-b：An-richなコアとAb-richなリムをもち、正累帯するもの。内部にAb-richな部分が湾状に入り込んでいることがある。

Pl-c：Pl-bの周囲に、An-richなマントルとAb-richなリムが成長したもの。コア部は融食され、円形～楕円形を示す。

Pl-d：篩状組織を示すコアをもつもの。コア部は融食され、円形～楕円形を示す。、その周囲を清澄な斜長石が取り巻く。

Pl-e：Ab-richなコアをもつもの。コア部は融食され、円形～楕円形を示し、その周囲を清澄な斜長石が取り巻く。

WPとPpPには全てのタイプの斜長石が含まれるが、PrP中に含まれるのはほとんどがPl-bの単純な正累帯構造を示す斜長石で、わずかにPl-dのタイプを含む（図49）。

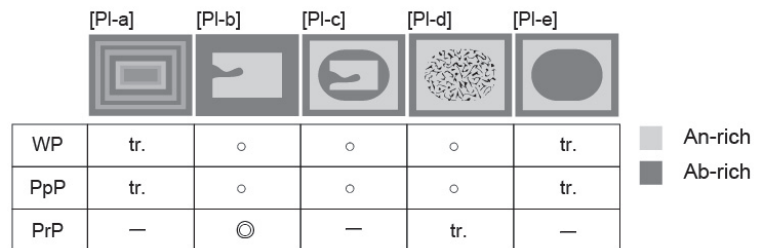


図49 沼沢湖火砕堆積物の軽石中に見られる斜長石の累帯構造のタイプと存在比。◎は多く含まれる、○は普通に含まれる、tr.はわずかに含まれることを示す。

### 5.4.2 ホルンブレンド

ホルンブレンドは、累帯構造から次の3タイプに分けられる（図50）。

Hbl-a：均質な組成をもち、累帯構造を持たないものあるいは波動累帯構造をもつもの

Hbl-b：不均質な組成分布をもつもの

Hbl-c：高いMg#と低いAl, Ti含有量をもつリム部をもつもの

いずれの軽石も全てのタイプのホルンブレンドを含むが、WPとPpP中ではHbl-a、PrP中ではHbl-bのタイプが多く含まれる（図50）。

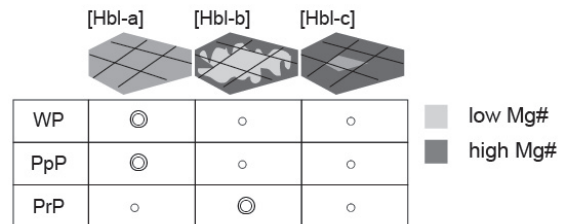


図50 沼沢湖火砕堆積物の軽石中に見られるホルンブレンドの累帯構造のタイプと存在比。

### 5.4.3 斜方輝石

斜方輝石はコア、マントル部およびリムの組成から、次の3タイプに分けられる（図51）。

Opx-a：均質な組成をもつもの、あるいはMg#が高いコアをもち正累帯するもの

Opx-b：リム部で急激にMg#が増加し（コア比約+6；図52）、逆累帯しているもの

Opx-c：Mg#が高いマントル部（コア比約+2；図52）をもつもの

WP中にはOpx-aと少量のOpx-cを、PpP中にはOpx-aとOpx-bを、PrP中にはOpx-aとOpx-cを含む（図51）。Opx-bタイプの斜方輝石は、PpP中のみで特徴的に見られる。

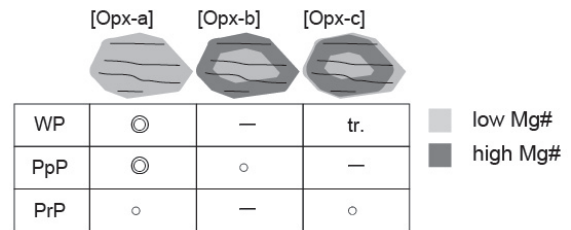


図51 沼沢湖火砕堆積物の軽石中に見られるホルンブレンドの累帯構造のタイプと存在比。

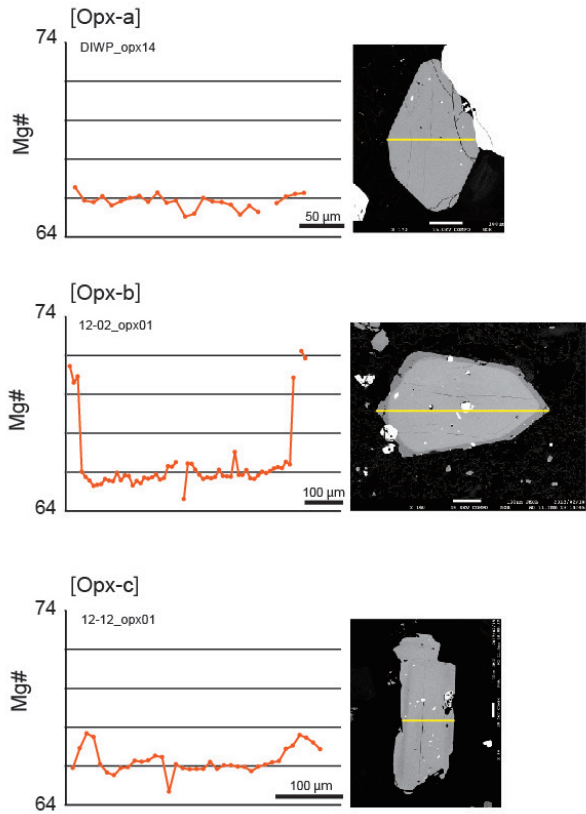


図52 斜方輝石の累帯構造別の化学組成。EPMAを使用した線分析により、粒子のリムからリムに向かって組成の変化を測定した。縦軸にはMg#を示している。

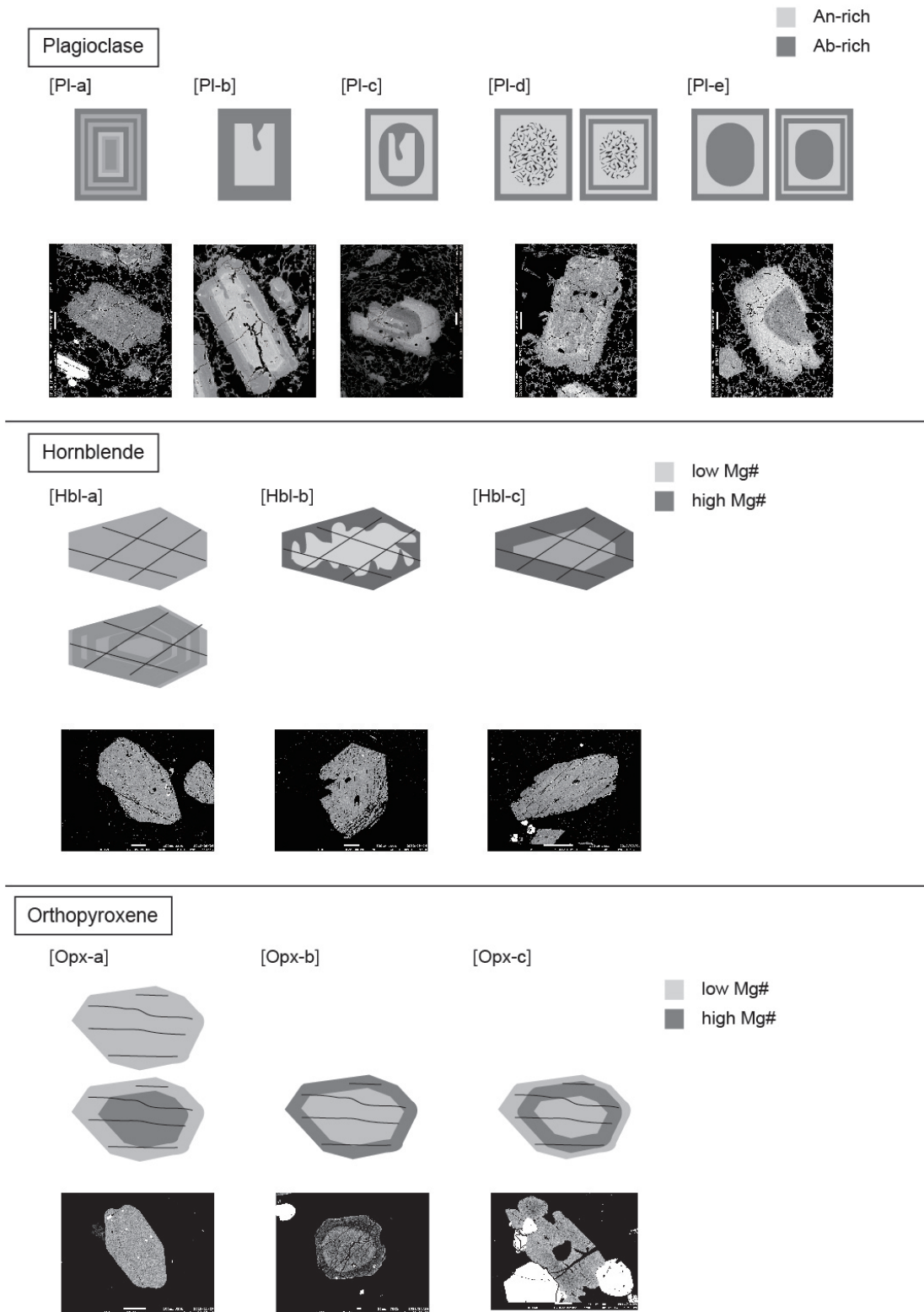


図 53 沼沢湖火砕堆積物の軽石中で見られる斜長石，ホルンブレンド，斜方輝石の組成像の全タイプと EPMA を使用し撮影した組成像。原子番号の小さな元素が多く含まれる部分は暗く見え，原子番号の大きな元素が多く含まれる部分は明るく写る。

## 5.5 鉱物化学組成

### 5.5.1 斜長石

沼沢湖火砕噴火で噴出した軽石中の斜長石斑晶のコア組成は、いずれの軽石タイプにおいても  $An_{40-85}$  と幅広い組成範囲を示すが、 $An$  のヒストグラム上において、固有の組成分布を示す（図 54）。

コア組成を見てみると、WP は  $An_{40-55}$  と  $An_{60-75}$  付近に小さなピークをもつバイモーダルな組成分布を示す。PpP も WP と同様の組成範囲にバイモーダルなピークをもつが、WP に比べ  $An$  に富む斜長石 ( $An$ ) が多く含まれる。特に WP 中には見られない  $An_{75}$  以上の斜長石を含むことが特徴である。PrP 中に含まれるのはほとんどが  $An_{60-80}$  の高  $An$  斜長石である。WP や PpP 中に含まれる高  $An$  斜長石は、黒色スコリア中に含まれる高  $An$  斜長石のピーク（最頻ピーク  $An_{70-75}$ ）とほぼ一致する。WP や PpP が  $An_{40-55}$  に主ピークをもつのに対し、PrP は含まれる斜長石のほとんどが  $An_{60}$  以上である。PrP は WP や PpP のような明瞭なバイモーダルな組成分布はもたず、 $An_{45-50}$  の低  $An$  斜長石をわずかに含む。

リム組成を見てみると、いずれの軽石タイプも共通して  $An_{45-50}$  に主ピークをもつ。PpP の中には、明瞭なバイモーダル組成を示すものがあり、 $An_{45-50}$  と  $An_{65-70}$  にピークが見られる。スコリアのリム組成も軽石同様  $An_{45-50}$  にピークをもつ。黒色スコリアは PpP と同様、 $An_{45-50}$  と  $An_{65-70}$  にピークをもつバイモーダルな組成分布を示す。

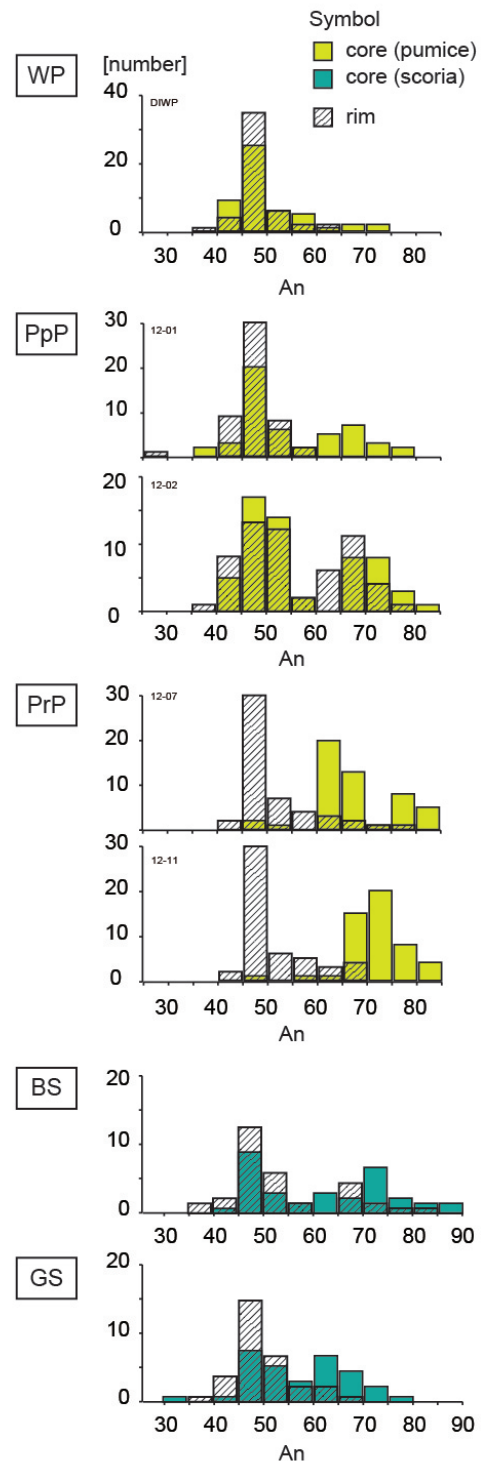


図 54 沼沢湖火砕堆積物の軽石とスコリア中に含まれる斜長石斑晶の  $An$  ヒストグラム。BS= 黒色スコリア, GS= 灰色スコリア。

5.5.2 ホルンブレンド

軽石中に含まれるホルンブレンド斑晶は、構造式単位あたりのSi原子数とA席の(Na+K)原子数から、ホルンブレンド（狭義）、エデン閃石もしくはパーガス閃石に分類される（図55；分類はDeer et al., 1992に従う）。コア組成をしてみると、いずれの軽石タイプ中においてもほとんどがホルンブレンド（狭義）に分類され、(Na+K)<sub>A</sub>に富む一部の斑晶がエデン閃石に分類される。一方で、一部のPpPはパーガス閃石を少量含み、バイモーダルな組成分布をもつ。このパーガス閃石は、スコリア中に含まれるパーガス閃石と同様の組成をもつ。PrP中にもパーガス閃石が含むものがあるが、PpPとは異なり、ホルンブレンドからパーガス閃石まで様々な組成の斑晶が含まれ、その組成分布は組成図上で連続的である。また、PpP中に含まれるパーガス閃石はリム組成もパーガス閃石に分類されるが、PrP中に含まれるパーガス閃石はホルンブレンド組成に分類される。

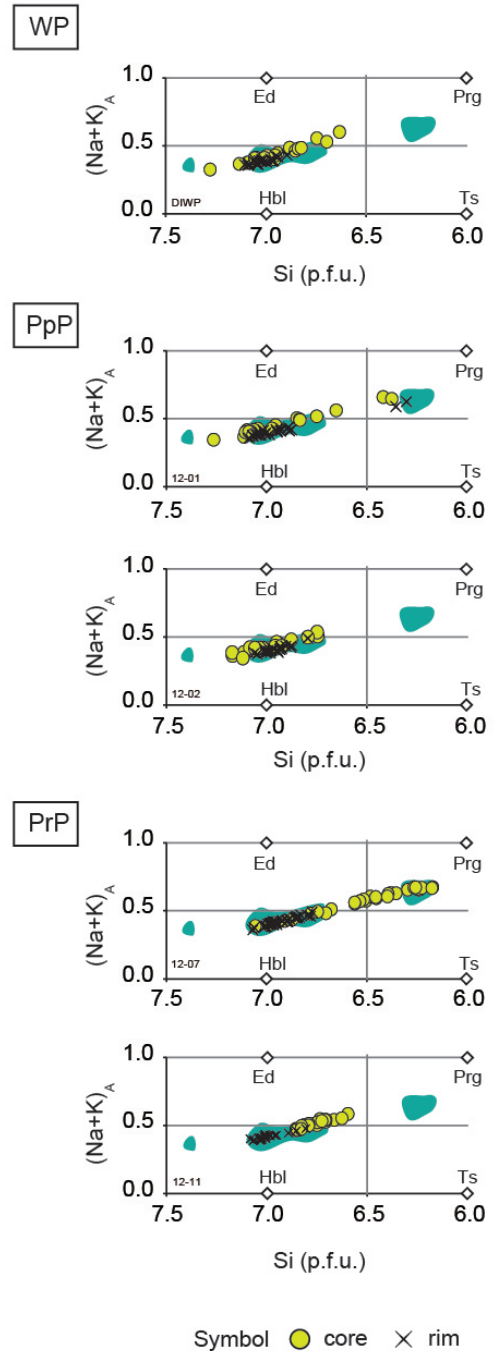


図55 沼沢湖火砕堆積物の軽石中に含まれる角閃石（広義のホルンブレンド）のコアおよびリム組成。黒色スコリアと灰色スコリアのコア組成も合わせて示した。横軸には構造式単位あたりのSi，縦軸にはA席の(Na+K)原子数を示している。Ed= エデン閃石，Prg= パーガス閃石，Hbl= ホルンブレンド（狭義），Ts= ツェルマク閃石。

### 5.5.3 斜方輝石

軽石中に含まれる斜方輝石斑晶は、軽石タイプごとに固有の組成的特徴をもつ。

コア組成を見てみると（図56）、いずれの軽石タイプにおいても、Mg#が63-68であるが、WPやPpP中ではほとんどがMg#が63-66の斜方輝石である。一方でPrP中に含まれる斜方輝石は、Mg#が65-68で、WPやPpPよりややMg#に富むものが多い。軽石中に含まれる斜方輝石のコア組成は、スコリア中に見られるもののほぼ同じ組成である。

リム組成を見てみると（図56）、WPはMg#63-65のユニモーダルな組成分布、PpPがMg#63-54とMg#68-70にピークをもつバイモーダルな組成分布、PrPはMg#65-67のユニモーダルな組成分布をもつ。また、PpP中には逆累帯構造を示す斜方輝石が含まれる。スコリア中の斜方輝石もリム部でMg#が増加し、逆累帯構造を示すものが見られる。

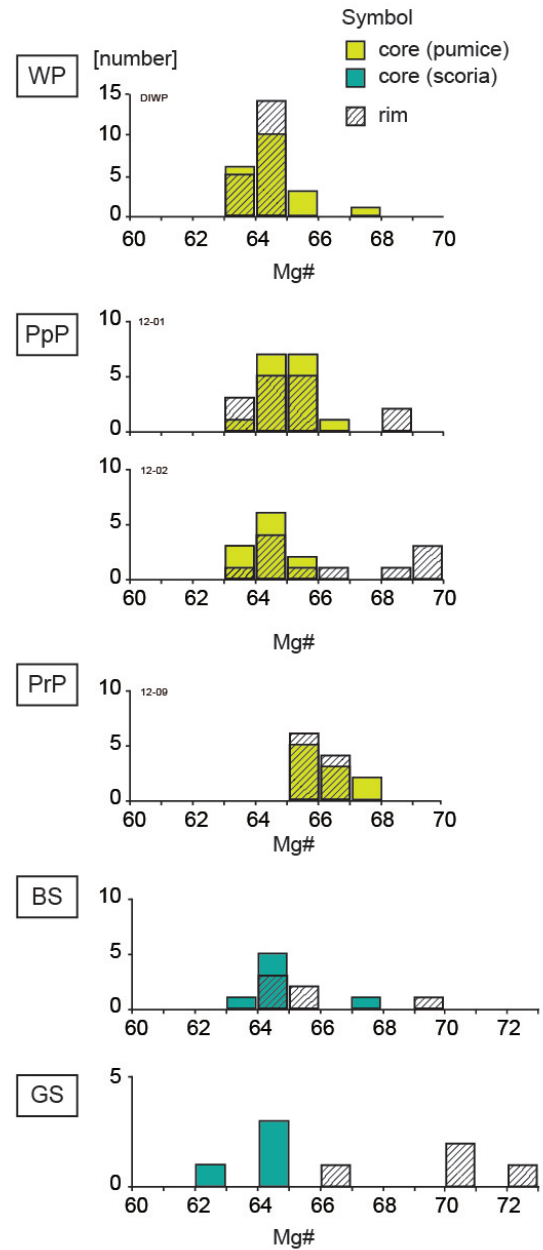


図56 沼沢湖火砕堆積物の軽石とスコリア中に含まれる斜方輝石のコアとリムのMg#のヒストグラム。BS= 黒色スコリア,GS= 灰色スコリア。

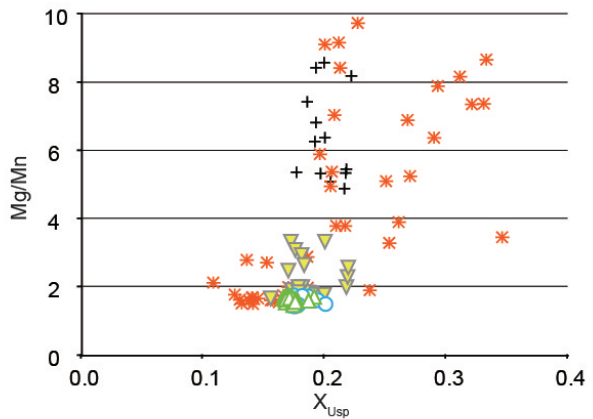


### 5.5.4 Fe-Ti 酸化鉱物

軽石とスコリア中に含まれる磁鉄鉱のコア組成を求めた。

WP と PrP 中に含まれる磁鉄鉱斑晶は、ともにコア組成が Mg/Mn 比が 1.39–1.72, ウルボスピネルのモル分率 ( $X_{Usp}$ ) が 0.17–0.20 で、均一な組成をもつ (図 57)。一方で PpP の磁鉄鉱は、Mg/Mn 比が 1.62–3.29,  $X_{Usp}$  が 0.16–0.22 で、WP や PrP と比較し Mg/Mn 比に富む傾向がある。

スコリア中に含まれる磁鉄鉱のコア組成は、軽石中のものと比較し組成が多様である。黒色スコリア中では、Mg/Mn 比が 1.65–8.57,  $X_{Usp}$  が 0.17–0.22 であり、高い Mg/Mn 比をもつ磁鉄鉱が多く含まれる。灰色スコリア中では、Mg/Mn 比が 1.48–9.73,  $X_{Usp}$  が 0.11–0.35 で、高い Mg/Mn 比と  $X_{Usp}$  をもつ磁鉄鉱が多く含まれる (図 57)。



Symbol

○ WP	+ Black scoria
▼ PpP	* Gray scoria
△ PrP	

図 57 沼沢湖火砕堆積物の軽石とスコリア中に含まれる磁鉄鉱のコア組成。

## 5.6 マグマの物理化学的条件

### 5.6.1 マグマ温度

斜方輝石の鉱物化学組成から QUILF (Anderson et al., 1993) を使用しマグマ温度を求めた (図 58)。コア温度は, WP 736–919°C, PpP 726–1089°C, PrP 799–903°C である。PpP 中には 1089°C という高温のコア温度を示す斜方輝石が 1 粒子含まれるものの, ほとんどは 900°C 未満である。PrP 中には 700°C 台のコア温度を示す斜方輝石をほとんど含まず, WP や PpP と比較し, 全体的に高いコア温度を示す。

リム温度を見てみると, WP は 771–860 °C, PpP は 741–986 °C, PrP は 822–893°C である。PpP 中にはリム部で逆累帯している斜方輝石が多く含まれるが, そのような斜方輝石はリム部で約 940–980°C という高い温度を示す (図 58)。

ホルンブレンドのコア組成から, Ridolfi et al. (2010) による角閃石温度圧力計を使用し温度を求めた。それによると, WP 761–876°C, PpP 776–918°C, PrP 763–943°C, 黒色スコリア 767–955°C, 灰色スコリア 777–947°C である (図 59)。それぞれ温度のヒストグラムを見てみると, いずれも 780–800°C にピークをもつ (図 60A)。しかし, WP が単峰性の狭い温度範囲 (780–880°C) を示すのに対し, PpP 中には 900–920°C という高温を示すホルンブレンドが少量含まれ, バイモーダルな温度分布を示す。PrP では, 低温から高温まで, 多様な温度を示すホルンブレンドが含まれる。両スコリアは, 920–960°C という高温を示すホルンブレンドを含み, バイモーダルな温度分布を示す。

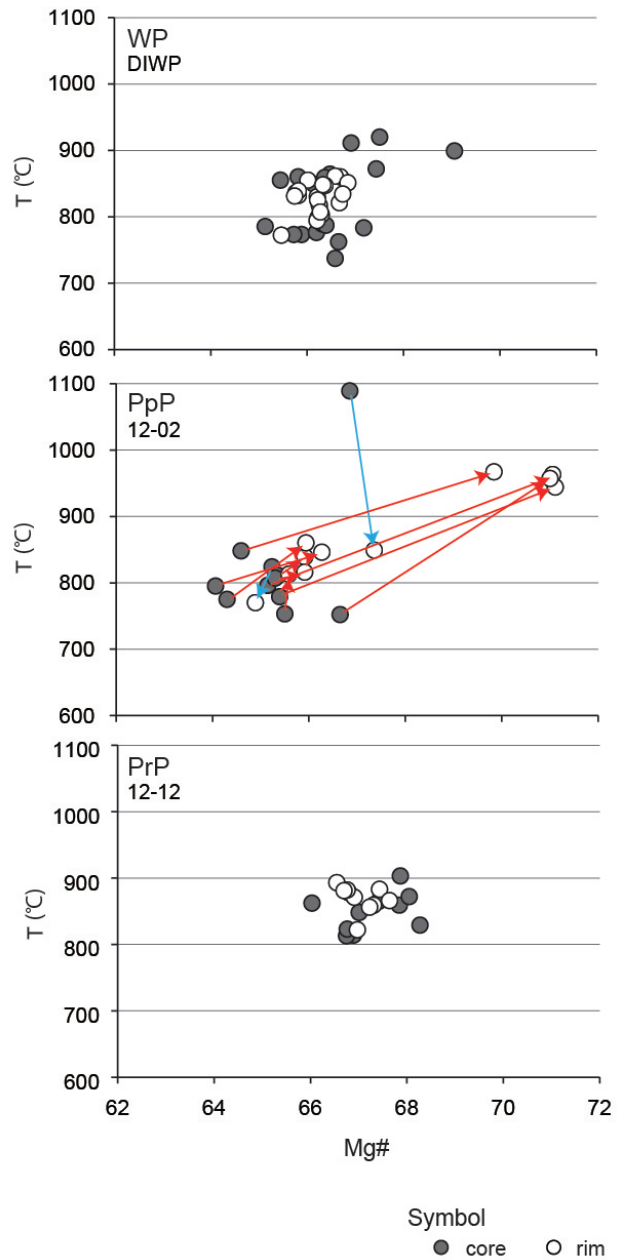


図 58 単一のサンプル中における斜方輝石のコアとリム組成から QUILF (Anderson et al., 1993) を使用し求めたマグマ温度。PpP 中の矢印は, 同一の粒子におけるコアからリムに向かう温度変化を示している (赤色: 増加, 水色: 減少)。

### 5.6.2 圧力

ホルンブレンドのコア組成から, Ridolfi et al. (2010) を使用し求めた圧力は, WP 74–204 MPa, PpP 89–344 MPa, PrP 80–395MPa で, いずれも 100–120 MPa のホルンブレンドを多く含む (図 59, 60). WP が単峰性の圧力分布を示すのに対し, PpP 中には 320–360 MPa の高い圧力を示すホルンブレンドが少量含まれ, PrP 中には最大で 395 MPa の幅広い圧力を示すホルンブレンドが含まれる.

### 5.6.3 含水量

ホルンブレンドのコア組成から, et al. (2010) を使用し求めた含水量は, WP 4.9–6.6 wt.%, PpP 4.9–7.7 wt.%, PrP 4.7–7.6 wt.% で (図 59), いずれのタイプも平均 5.7–5.8 wt.% である. また Lange et al. (2009) による斜長石–メルト含水量計を使用すると, WP は約 5.9 wt.%, PpP は 6.3 wt.%, PrP は 6.8 wt.% であり, WP と比較し PpP や PrP 中で高い含水量が示される.

### 5.6.4 マグマ粘性

Shaw (1972) による粘性の計算式と Einstein-Roscoe 方程式を使用し, メルト組成, 含水量, 温度, 結晶量からマグマの粘性を求めた. 計算に用いた各データを表 4 に示す.

粘性はそれぞれ WP  $10^{5.6}$  Pa·s, PpP  $10^{4.6}$  Pa·s, PrP  $10^{7.6}$  Pa·s である.

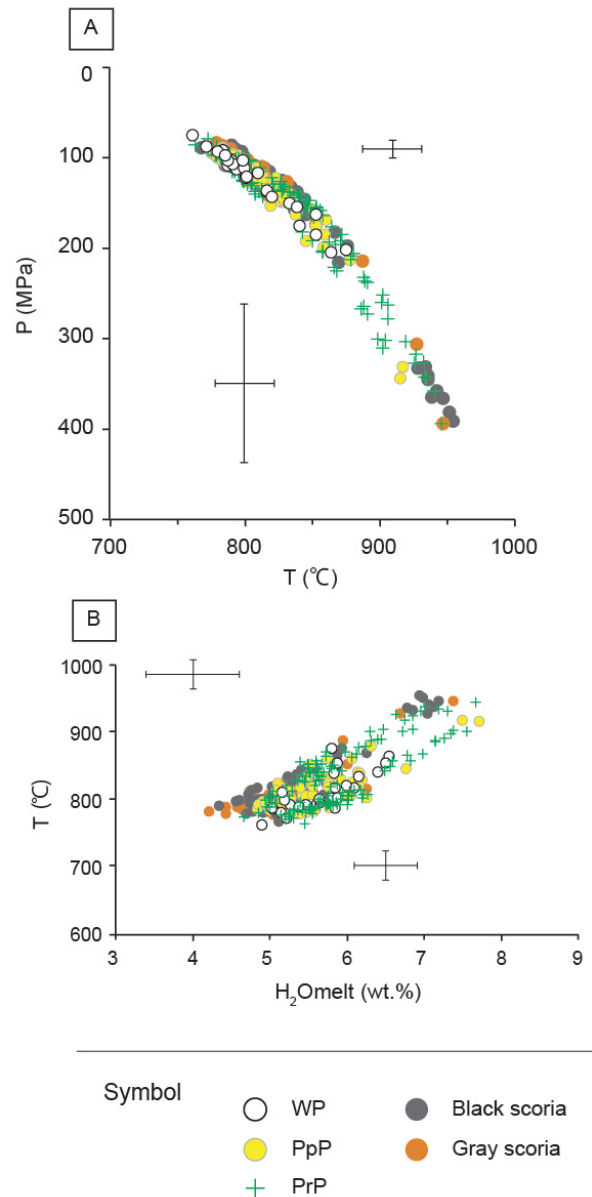


図 59 ホルンブレンドのコア組成から角閃石温度圧力計 (Ridolfi et al., 2010) を使用し求めたマグマ温度, 圧力, 含水量.

表 4 マグマ粘性の計算に用いたデータ. メルト組成は石基ガラス組成の平均値, 含水量は斜長石・メルト含水量計 (Lange et al., 2009), 温度は Ridolfi et al. (2010) により得た平均値, 結晶量はモード組成分析の平均値 (PrP は微斑晶を含む) を用いた.

	melt composition (wt.%)											H <sub>2</sub> O (%)	T (°C)	% crystal	Viscosity (Pa·s)
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>				
WP	76.4	0.2	11.7	0.0	1.1	0.1	0.2	1.3	3.5	3.5	0.0	5.9	809	40.4	10 <sup>5.6</sup>
PpP	74.6	0.3	12.2	0.0	1.6	0.1	0.4	2.0	3.6	2.7	0.0	6.3	809	22.1	10 <sup>4.6</sup>
PrP	75.8	0.2	11.6	0.0	1.1	0.1	0.2	1.2	3.3	3.6	0.0	6.8	817	60	10 <sup>7.6</sup>

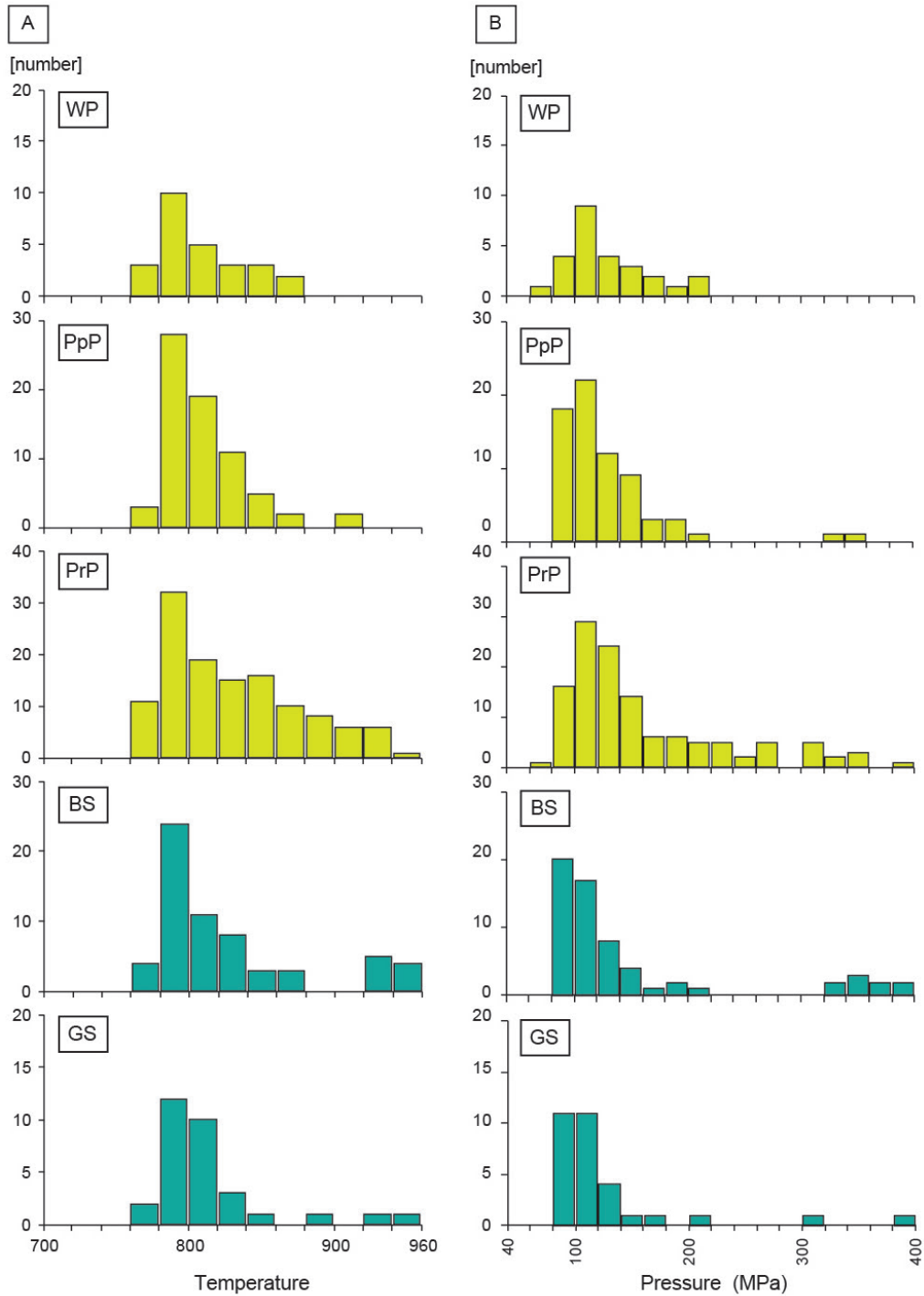


図 60 ホルンブレンドのコア組成から角閃石温度圧力計 (Ridolfi et al., 2010) を使用し求めたマグマ温度 (A) と圧力 (B) のヒストグラム. BS= 黒色スコリア, GS= 灰色スコリア

## 5.7 議論

### 5.7.1 沼沢湖火砕噴火で噴出した多様な本質物の岩石学的特徴

沼沢湖火砕噴火は、堆積物中に斑晶量の異なる3種類の軽石と外観色の異なる2種類のスコリアが見られ、先カルデラ期の噴出物とは異なり、本質物の種類が多様である。噴火初期に発生した大規模火砕流では、沼沢湖火砕噴火の総噴出量（DRE換算）の約90 wt.%を噴出している（山元, 2003）。火砕流堆積物の本質物は93 wt.%がデイサイト質軽石であることから（増淵・石崎, 2011）、沼沢湖火砕噴火はこの大規模なデイサイト質マグマ溜りによって引き起こされたと考えられる。一方で、この火砕流堆積物中からは斑晶量の異なる多様な軽石が産することから、噴火直前のデイサイト質マグマ溜りは不均質な構造をもっていたと考えられる。以下では3タイプの軽石の岩石学的特徴をまとめ、多様な軽石の成因と沼沢湖火砕噴火を引き起こしたデイサイト質マグマ溜りの内部構造について述べる。

#### WP

火砕流堆積物の主体となったデイサイト質軽石のタイプ別の存在比は、WPが92–94 vol.%, PpPが0–3 vol.%, PrPが3–8 vol.%である（表3）。したがって、噴火直前のデイサイト質マグマ溜りは、WPを形成した斑状デイサイト質マグマに満たされていたと考えられる。

WPは斑晶量が38–52 vol.%で、斑晶組合せは斜長石 + 石英 + ホルンブレンド + 斜方輝石 + 磁鉄鉱 + チタン鉄鉱である。WPは均質なモード組成（図44）と全岩化学組成（図45）をもつことから、WPを形成したデイサイト質マグマはマグマ溜り内で均質な状態で存在していたと考えられる。斑晶鉱物組成をしてみると、斜長石と斜方輝石でバイモーダルな組成分布が見られる（図54, 56）。増淵・石崎（2011）では、白色軽石を形成したデイサイト質マグマは、噴火の数日前に黒色スコリアを形成した安山岩質マグマとマグマ混合をしていると結論している。WP中に含まれる少量の高An斜長石（ $An_{65-75}$ ）は、黒色スコリア中の高An斜長石のピークと一致することから（図54）、黒色スコリア形成マグマに由来すると考えられる。またWP中の高Mg#（Mg# 67–68）斜方輝石も、黒色スコリア中に含まれる高Mg#組成の斜方輝石と組成が一致することから（図56）、黒色スコリア形成マグマに由来すると考えられる。WP中に含まれる斜長石、ホルンブレンド、斜方輝石はリム部で均質な組成をもち、また石基ガラス組成も均質である（ $SiO_2$  78 wt.%；図47）。メルトと平衡であったと考えられる斜方輝石のリム部の温度から、WPを形成したデイサイト質マグマは771–860°Cであったと考えられる。これは、Fe-Ti酸化鉱物を用いて求めた790–795°C（本論4.4.2を参照）やホルンブレンドのコア組成から求めた761–876°Cとも一致する。

#### PpP

噴火の最初期にのみ少量噴出したPpPは、斑晶量が22–31 vol.%と少なく、斑晶組合せは斜長石 + 石英 + ホルンブレンド + 斜方輝石 + 磁鉄鉱 + チタン鉄鉱で、石英を欠くことがあるのが特徴である。PpPの全岩 $SiO_2$ 量は63.7–67.0 wt.%で、WP（64.7–67.1 wt.%）と比較しやや

SiO<sub>2</sub> に乏しいものの、希土類元素組成パターン（図 46）、石基ガラス組成（図 47）および Sr・Nd 同位体組成（図 48）は WP と一致する。PpP 中に含まれる斑晶鉱物組成および組成累帯構造も WP と同様であることから、WP と PpP は同質のデイサイト質マグマに由来すると考えられる。

一方で、PpP 中に含まれる斑晶鉱物の化学組成を詳しくみてみると、斜長石は WP と同様 An<sub>45-50</sub> にピークをもつが、WP に比べ An<sub>60</sub> 以上の高 An 斜長石が多いのが特徴である（図 54）。また PpP は、WP では見られなかった (Na+K)<sub>A</sub> に富むパーガス閃石を含むことがある（図 55）。角閃石の (Na+K)<sub>A</sub> 量は、温度と正の相関関係があり（Helz, 1973）、PpP 中に含まれるパーガス閃石は高温の苦鉄質マグマに由来すると考えられる。またリム部で Mg# に富み逆累帯構造を示す斜方輝石（図 52）を含むことから、PpP は WP より強く苦鉄質マグマとの混合の影響を受けたことが示唆される。PpP 中に含まれる融食形の石英や、リム部が分解したホルンブレンドも、苦鉄質マグマとの混合により形成されたものであろう。PpP の希土類元素パターン（図 46）を見てみると、PpP の組成パターンが WP と黒色スコリアの間に位置することも、WP 形成マグマと黒色スコリア形成マグマの混合を支持する。

斜方輝石斑晶の化学組成からマグマ温度を見積もると、コア部では 726–892 °C（苦鉄質マグマ由来と考えられる高 Mg# の斜方輝石を除く）であるのに対し、リム部では 741–986 °C で（図 58）、リム部で約 200 °C の温度上昇を記録している。また、磁鉄鉱コアの組成を見てみると、PpP 中では WP に比べ Mg/Mn 比が高い（図 57）。磁鉄鉱中の Mg/Mn はマグマ組成一定のとき、温度と正の相関があり（Bacon and Hirschmann, 1988）、PpP を形成したマグマの温度上昇を示唆している。

沼沢湖火砕噴火で噴出したデイサイトと似た全岩化学組成をもつ Pinatubo 火山 1991 年噴火によるデイサイトの相平衡実験（Scaillet and Evans, 1999）によれば、WP と同じ斑晶組合せと高い含水量をもつデイサイト質マグマは、温度あるいは含水量が増加すると石英が安定で存在できない。WP を形成したデイサイト質マグマの含水量を約 5.9 wt.%（Lange et al., 2009 による斜長石–メルト含水量計による値）と見積もると、Scaillet and Evans (1999) の相平衡図によれば石英が安定に存在するのは約 790 °C 未満である。すなわち PpP は、WP を形成したデイサイト質マグマが黒色スコリアを形成した安山岩質マグマとの混合により温度が上昇し、その

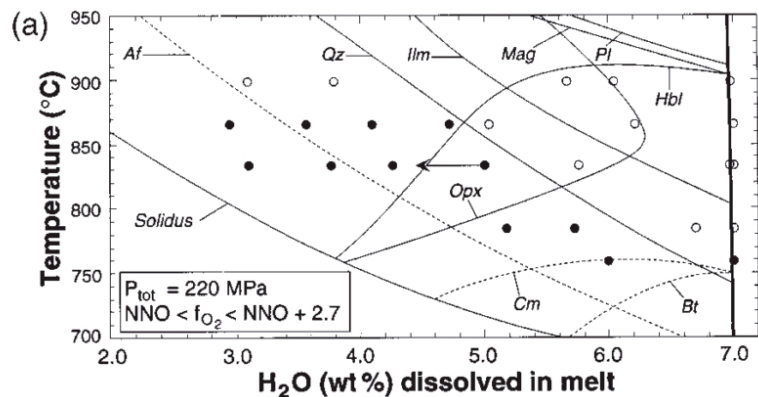


図 61 Pinatubo 火山の 1991 年噴火で噴出したデイサイト質マグマの 220 MPa における相平衡図。Scaillet and Evans (1999) の Fig. 2 を一部引用。

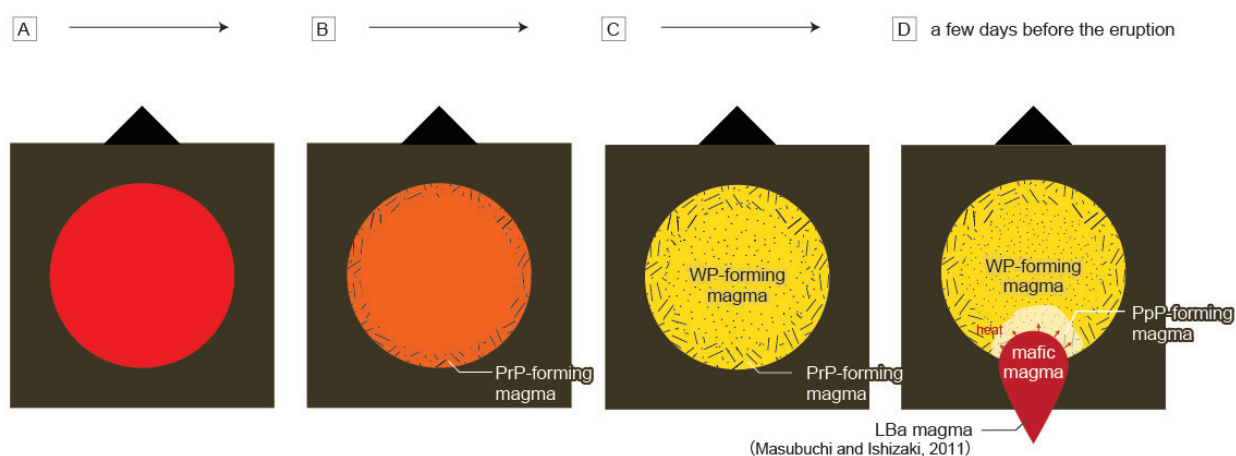


図 62 沼沢湖火砕噴火前のデイサイト質マグマ溜りの進化と WP, PpP, PrP の成因を示した図. A: 前山溶岩噴火のあとに, 新たなマグマがマグマ溜り内に注入した. B: 壁岩付近で分別結晶作用が進み, 微斑晶に富む PrP 形成マグマが形成された. C: 内部まで結晶化が進み, マグマ溜り内の中心部には WP を形成した斑状のデイサイト質マグマが形成された. D: 噴火の数日前に黒色スコリアを形成した苦鉄質マグマ (LBa マグマ) がマグマ溜り内に注入し (増淵・石崎, 2011), その結果, WP 形成マグマが加熱され, 斑晶が溶融した低粘性のマグマ (PpP 形成マグマ) が形成された.

結果, 斑晶が安定に存在できず融解したために斑晶量が減少したものと考えられる (図 62).

### PrP

PrP は, WP や PpP に比べ明らかに斑晶量が多く, 特に微斑晶に富むのが特徴である. 微斑晶を含めた斑晶量は 48–71 vol.% で, 大量のホルンブレンドと斜長石からなる. 斑晶組合せは斜長石 + ホルンブレンド + 磁鉄鉱 + チタン鉄鉱で, 少量の石英と斜方輝石を含むこともある. 石英は, 斑晶量が 50 vol.% の斑晶量が比較的少ない PrP 中のみで見られる. WP と層構造をなす PrP の存在 (図 37D, 42), PrP が WP と同様の石基ガラス組成をもつ (図 47) ことから, PrP を形成したマグマは WP 形成マグマとマグマ溜り内で接しており, 同じデイサイト質マグマのうち斑晶量が多い部分であったと考えられる. 一般には, マグマ溜りの底の沈積岩が考えられるが, PrP は微斑晶を多く含むことから (図 39), 過冷却度の高い状態, すなわち結晶成長速度より核化形成速度が大きい状態で結晶が晶出したもの (例えば Cashman, 2004) であり, マグマ溜りの壁岩や天井付近で急速にマグマの冷却が進み形成された (de Silva, 1989; Pupier et al., 2008), 半固結状のクリスタルマッシュであると解釈される. 産出量は僅かではあるものの, PrP が火砕流噴火を通して噴出していることも, PrP の形成がマグマ溜りの天井もしくは側壁であるという上記の考えを支持する. PrP 中には An 成分に富むコアをもつ斜長石 ( $An_{60-80}$ ) や (図 54),  $(Na+K)_A$  に富む角閃石 (図 55) を多く含むことから, WP を形成したマグマより苦鉄質で高温なマグマから晶出したと考えられる (Helz, 1973).

Pupier et al. (2008) は, 南西ニジェールの Dolel 花崗岩体 (バソリス) に見られる層状構造の岩石学的研究から, 珪長質マグマが地殻内に定置し, 新たなマグマの間欠的注入を伴いながらマグマ溜り内で多段階的に結晶分化作用が進んだことを明らかにした. これは花崗岩の研究

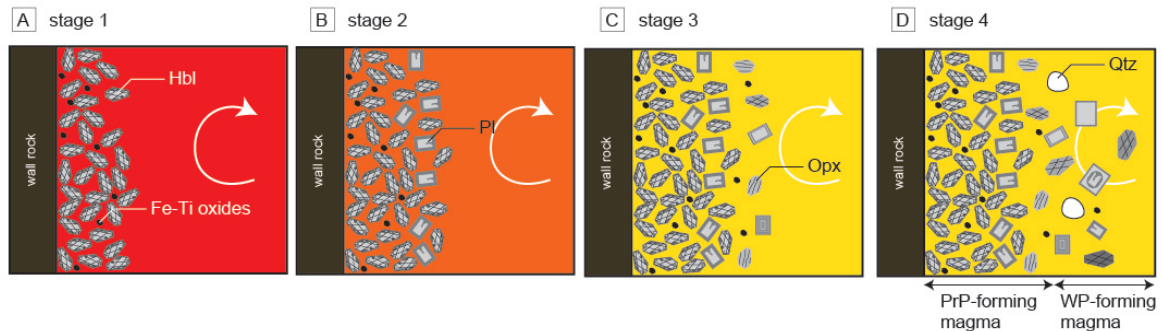


図 63 沼沢湖火砕噴火のマグマ溜りの壁岩における結晶分化作用の模式図。詳しくは本文を参照。

であるものの、沼沢湖火砕噴火で見られる PrP と同様の斑晶組合せと層構造が見られる。WP と層構造をなす PrP は、マグマ溜りの壁岩（あるいは天井）部からマグマ溜り中心の主体部（WP 形成マグマ）への層構造、すなわちマグマ溜り内部の構造とマグマの定置から結晶分化作用の段階を表しているものと考えられる（図 63）。層状 PrP の最も斑晶に富む部分（zone 1；図 43）は、ホルンブレンドの微斑晶と磁鉄鉱およびチタン鉄鉱からなることから、ホルンブレンドと Fe-Ti 酸化鉱物が最初期に晶出したと考えられる（第 1 段階）。zone 1 は少量の斜長石を含み、ホルンブレンドをオフィティックに包有していること、また zone 2 は斜長石とホルンブレンドの微斑晶と Fe-Ti 酸化鉱物からなることから（図 43）、次に斜長石の晶出が進んだと考えられる（第 2 段階）。zone 2 は少量の斜方輝石を含むことから、次いで斜方輝石（第 3 段階）、zone 3 が WP と同様の斑晶組み合わせと斑晶サイズをもつことから、最後に石英が晶出し（第 4 段階）、最終的に WP を形成したデイサイト質マグマが形成されたと考えられる（図 63）。

PrP は全岩化学組成の  $P_2O_5$  のハーカー図（図 45）と希土類元素含有量（図 46）において、2 つのグループに区別できる。PrP は産出量が少なく、また火山砕屑物のサイズも細粒～中粒火山礫サイズであるため、これら 2 つのグループのモード組成、全岩化学組成、鉱物化学組成および鉱物温度計のデータを詳細に比較することは困難であるが、先に述べたように、PrP が多段階的な結晶分別作用とその集積によって形成されたのだとすれば、今後、全岩化学組成と燐灰石やジルコンなどの副成分鉱物の晶出関係を明らかにすることで、より詳細な結晶分化作用の段階とデイサイト質マグマの成因を明らかにできると考えられる。

### 5.7.2 斑晶鉱物の組成と累帯構造からみたデイサイト質マグマの蓄積過程

斑晶鉱物の多くは、その組成や累帯構造に噴火前と噴火の最中のマグマ溜りの情報を記録しており、斑晶の累帯構造からマグマの進化を明らかにする研究は以前より多くなされている（例えば Humphreys et al., 2006 や Kuritani, 1998 など）。特に、斑晶の逆累帯構造は、噴火のトリガーとなることがある珪長質および苦鉄質マグマのマグマ混合（例えば Sparks et al., 1977；Pallister et al., 1992；Tomiya and Takahashi, 1995 など）によって形成されることがあり（例えば Eichelberger, 1978；Sakuyama, 1979）、累帯構造からマグマの混合過程や進化を読み解く研究が多くなされている。



沼沢湖火砕噴火の軽石中には複雑な累帯構造をもつ斑晶鉱物が共存し、また累帯構造のタイプも多いことから（図 53），デイサイト質マグマがマグマ溜り内で静穏に進化したとは考えにくい。軽石中に含まれる斑晶には、斜長石の溶融組織（図 53 Pl-b, c, d）や篩状のコア（図 53 Pl-d），ホルンブレンドの不均質な累帯構造（図 53 Hbl-b），斜方輝石のリム部における逆累帯構造（図 52 Opx-b）や Mg# に富むマントル部（図 52 Opx-c）など、非平衡な組織をもつものが存在する。沼沢湖火砕噴火では、噴火直前に珪長質マグマと苦鉄質マグマのマグマ混合が起こっており（増渕・石崎，2011），これらの種々の非平衡組織の一部は、噴火直前に形成されたものであろう。しかし、斜長石斑晶には、An に富むコアが湾状に浸食され、その周囲を Ab に富むリムが取り巻くもの（図 53 Pl-b）や、Ab に富むコアが丸みを帯びた形を示すもの（図 53 Pl-c, e）があり、これらの溶融組織は、結晶が晶出する途中で一度融解し、さらにその後結晶が成長したことを示唆する。また、斜方輝石に見られる Mg# に富むマントル部（図 52 Opx-c）は、晶出の途中で苦鉄質なマグマとの混合があったことを示唆する。また、WP や PpP 中にこのような様々なタイプの累帯構造をもつ斑晶が共存するにもかかわらず、噴火を通してデイサイト質マグマの全岩化学組成は均質である。このことは、結晶分化作用が進行し WP 形成マグマへと進化するまでは、マグマ溜りの中心部は対流が充分活発であったことを示唆している。

珪長質なマグマの成因には、苦鉄質マグマからの分別結晶作用や下部地殻の部分溶融が考えられるが、沼沢火山では、下部地殻（角閃岩）の部分溶融によって珪長質マグマが形成されたことが明らかとなっている（Yamatomo, 2007）。この下部地殻からのマグマが継続的に繰り返され、それが蓄積されたことで、カルデラ形成を引き起こすほどに大量のデイサイト質マグマが溜まったと考えられる。

### 5.7.3 沼沢湖火砕噴火のトリガーと噴火開始条件

近年、大規模な珪長質マグマ溜りの大部分はマッシュ状（結晶含有量が 40–50 vol.% 以上）で、ほとんど流動できない状態にあると考えられている（例えば Bachmann and Bergantz, 2008; Marsh, 2015; 東宮, 2016）。沼沢湖火砕堆積物の主体を占める WP も斑晶量が 38–52 vol.% であることから、沼沢湖火砕噴火のマグマ溜りは、噴火直前には流動しにくいマッシュ状マグマ溜りへ進化していたと考えられる。WP から求めたデイサイト質マグマの粘性は、 $10^{5.6}$  Pa·s で、マグマ噴出の粘性限界（岩脈成長の粘性限界；Takeuchi, 2004）と同等である。これより高粘性のマグマは、上昇が遅すぎて途中で固化してしまうため（東宮, 2016），WP 形成マグマは単独での噴出は難しいと考えられる。

一方で、他の珪長質な大規模噴火の例を見てみると、マグマ溜りの本体を構成していたと考えられる高結晶度マグマが爆発的に噴火する際に、より低粘性のマグマが先駆的に上昇・噴火する例が多く知られている（例えば、ピナツポ火山 1991 年噴火：Pallister et al., 1992；北海道駒ヶ岳 1929 年噴火；Takeuchi and Nakamura, 2001 など）。この低粘性のマグマは、低

---

温でマッシュ状の本体マグマと新たに供給されたマグマの混合マグマである（東宮，2016）. Burgisser and Bergantz (2011) は，マッシュ状態の噴火しにくいマグマ溜りに高温のマグマが注入・定置し，成層マグマ溜りを形成した後，両者の境界に結晶度の低い（粘性の低い）流動層を発達させるというモデルを提唱している．沼沢湖火砕噴火で見られる PpP も，先に述べたように，苦鉄質マグマとの混合により結晶度が低くなったマグマであり，Burgisser and Bergantz (2011) の流動層に相当するものといえる．PpP を形成したマグマの粘性は，WP を形成したマグマの 1/10 程度 ( $10^{4.6}$  Pa·s) である．PpP が噴火の最初期にのみ噴出していることから，苦鉄質マグマの注入が沼沢湖火砕噴火の引き金となり，低粘性マグマの形成と上昇が噴火を開始させる原動力となったと言える．



## 第6章 総括

本章では、4章と5章をまとめ、沼沢火山のマグマの起源と成因、蓄積過程について、増渕ほか(2016)を一部引用し、先行研究や他の火山との比較検討から述べる。また、沼沢火山における大規模噴火の準備過程とその発生要因について考察する。

### 6.1 沼沢火山の珪長質マグマの起源

沼沢火山では、11万年間の活動を通して、流紋岩～デイサイト質マグマの噴出を主体とした珪長質マグマ活動を継続させてきた。珪長質マグマの成因は、一般に、マントル由来の苦鉄質マグマの結晶分別作用や同化分別結晶作用、あるいは地殻物質の溶融などが考えられている(Hildreth et al., 1991; Ohki et al., 1993; Graham et al., 1995; Ewart et al., 2004; Shukuno et al., 2006)。島弧においては、特に地殻物質の溶融は一般的なメカニズムである(Hildreth, 1981; Cornad et al., 1988)。Yamamoto (2007)は、下部地殻を構成すると考えられている角閃岩の溶融実験の結果(Takahashi, 1986; Beard and Lofgren 1991; Johannes and Holz, 1996; 高橋ほか, 1997)と、沼沢火山の流紋岩～デイサイト質マグマの同位体組成がほぼ均一( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が0.7039–0.7040,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比が0.51283–0.51286)であることから、活動期間中に噴出した珪長質マグマが同一の起源物質(下部地殻の角閃岩)に由来し、活動期が進むにつれて部分溶融度が徐々に増加した結果、噴出したマグマの全岩 $\text{SiO}_2$ 量が時間とともに減少したと結論している。本論で得られた珪長質マグマの同位体組成も、Yamamoto (2007)と同様の値( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が0.703850–0.703960,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比が0.512843–0.512864)であり、根本的にはYamamoto (2007)が提示した下部地殻の起源物質の部分溶融で説明可能なデータと思われる。

沼沢火山では、各噴火期に斑晶組合せ、鉱物組成、全岩主・微量成分組成および $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比により前後の噴火期とは区別される珪長質マグマが噴出している(本論4.4.1)。このように固有の岩石学的性質を有するマグマがある特定の噴火期に噴出し、直前・直後の噴火期を含む他の噴火期には噴出していないことから、各噴火期の珪長質マグマはその噴火期の先行休止期間の間に形成され、噴火ごとに新たな珪長質マグマが活動したと考えるのが自然である。沼沢火山の珪長質マグマの全岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は、各噴火期の間で、違いはわずかであるものの明瞭に区別できる(図29)。このような $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比の多様性を、同一の起源物質の部分溶融で説明することは困難である。このことは、マグマ発生場である下部地殻の同位体組成が不均質であり、噴火期毎に部分溶融する部位(例えば深度)を変えながらマグマを発生させたことを示唆している(増渕ほか, 2016)。

### 6.2 各噴火で噴出した苦鉄質マグマと珪長質マグマの地球化学的関係

惣山溶岩噴火以降は、珪長質マグマの噴出に伴い、少量の苦鉄質マグマの噴出が見られる。ここでは、苦鉄質岩と珪長質岩の成因関係について述べる。

惣山および前山の各溶岩噴火では、溶岩と苦鉄質包有岩の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比がほぼ同一であり、両

噴火において、苦鉄質および珪長質マグマの起源物質は同一である可能性を示唆している。一方で、溶岩と包有岩の希土類元素（以下 REE）組成パターン（図 28）を見てみると、溶岩の REE は、La を除き、いずれの成分も包有岩より乏しい。包有岩中に含まれる主な斑晶鉱物は斜長石、ホルンブレンドと Fe-Ti 酸化鉱物であり、苦鉄質マグマに存在する斑晶鉱物を結晶分化した結果生じる珪長質マグマの REE パターンは、苦鉄質マグマに対し上方に平行移動したパターンか、やや左上がりになるはずである（例えば Mann, 1983; Gerlach et al., 1987）。しかし、惣山および前山溶岩にはこの特徴が見られず、溶岩と苦鉄質包有岩の親子関係が無いことを示している。また、沼沢湖火砕噴火で噴出した軽石（WP, PpP, PrP）と安山岩質の黒色スコリアと灰色スコリアは、それぞれ異なる  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比をもつことから（図 29）、起源物質が異なっており、親子関係を持たないことが明白である。すなわち、沼沢火山では惣山溶岩噴火以降、成因関係の無い複数のマグマが同時に噴出しており、さらに、沼沢湖火砕噴火においては、下部地殻の多様な場所でマグマが生成し、それが 1 箇所集積し、同時期に噴出している。

大規模な噴火において、珪長質マグマとともに苦鉄質なマグマが噴出することは良く知られており、両者の関係は以下のように 3 タイプに分けられる（金子ほか, 2008）。

- ①珪長質マグマと苦鉄質マグマが同一の同位体組成をもち、かつ珪長質マグマと苦鉄質マグマからの単純な結晶分化作用によって生じたと解釈できるもの（例えば Katmai 火山の 1912 年噴火；Hildreth and Fierstein, 2000）
- ②珪長質マグマと苦鉄質マグマが同一の同位体組成をもつが、その珪長質マグマの岩石学的・地球化学的性質が、苦鉄質マグマからの単純な結晶分別作用では説明できないもの（例えば阿蘇火山の阿蘇 4 噴火；Kaneko et al., 2007）
- ③珪長質マグマと苦鉄質マグマが異なる同位体組成をもつもの（例えば Crater Lake；Bacon et al., 1994）

これらのタイプは、大規模珪長質マグマの溶融過程と結晶分化過程の違いによってもたらされる（金子ほか, 2008）。沼沢火山では、惣山溶岩と前山溶岩は②のタイプに、沼沢湖火砕噴火は③のタイプであり、同一の火山においても、異なるマグマプロセスが起きたことを意味している。

### 6.3 沼沢火山のマグマプロセスとマグマ蓄積率

沼沢火山のマグマプロセスを時代とともに整理すると、

110–53 ka：噴火期ごとに形成された単一の流紋岩～デイサイト質マグマの活動（尻吹峠火砕噴火、木冷沢溶岩噴火、水沼火砕噴火）

43–24 ka：噴火期ごとに形成された単一のデイサイト質マグマと苦鉄質マグマの活動（同一の同位体組成をもつが親子関係はない；惣山溶岩噴火、前山溶岩噴火）

5.4 ka：新たに形成された単一のデイサイト質マグマと 2 種類の安山岩質マグマの活動（全て異なる同位体組成もち、起源が異なる；沼沢湖火砕噴火）

の3期にわけられ、カルデラ形成噴火である沼沢湖火砕噴火においてのみ、異なる起源をもつ複数のマグマが同時に噴出するという、特異なマグマプロセスが見られる。

沼沢火山では、最初期の尻吹峠火砕噴火を除き、各噴火に先行する休止期間の長さが明らかにされている(山元, 2003; 山元・駒澤, 2004)。各噴火期のマグマ噴出量(DRE)を先行休止期間の長さで割ると、各噴火で活動したマグマ溜りへのマグマ蓄積率を概算することができる。このようにして求められたマグマ蓄積率は、木冷沢溶岩噴火では  $2.6 \times 10^6 \text{ km}^3/\text{yr}$ , 水沼火砕噴火では  $5.6 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{yr}$ , 惣山溶岩噴火では  $3.0 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{yr}$ , 前山溶岩噴火では  $1.6 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{yr}$ , 沼沢湖火砕噴火では  $1.1 \times 10^4 \text{ km}^3/\text{yr}$  である。なお、この計算では、休止期間中に一定の速度でマグマが単一のマグマ溜りに蓄積され、そのマグマが各噴火で全て噴出したことを前提としているため、求められた値は、実際のマグマ蓄積率の最小値と考えてよいだろう。あくまで概算値であるものの、カルデラ形成噴火である沼沢湖火砕噴火は、同じ火砕噴火である水沼火砕噴火の約2倍、溶岩噴火期に比べ4-40倍ほどの速さでマグマが蓄積された可能性がある(増渕ほか, 2016)。

大規模なカルデラ噴火の発生には、地下に大量のマグマが蓄積されている必要がある。この大量のマグマを蓄積させるには、①長い時間をかけて大量のマグマを溜める、あるいは、②マグマ生産率が上昇する という2つのプロセスが考えられる。

これまでは、大規模な噴火は発生頻度が低く、長い時間をかけてマグマを溜めているというイメージがあった。しかし近年では、噴火可能なマグマが存在できる期間(マグマ滞留時間)は限られており、比較的短時間で一気に大量のマグマが準備されると考えられるようになってきた(東宮, 2016)。例えば、近年、珪長質マグマに含まれる石英中のTiや斜方輝石中のFe-Mgの累帯構造と拡散係数から、マグマの滞留時間を明らかにする研究がなされるようになってきたが、それによると、巨大マグマ溜りの形成はBishop Tuff噴火では噴火の500-3000年前に(Gualda et al., 2012)、Oruanui Tuff噴火では噴火の1600年前以降に始まり、230年前にピークがあった(Allan et al., 2013)という推定がなされている。また、マグマ中の結晶サイズ分布からマグマ滞留時間を推定する研究もなされている(例えばMarsh, 1988, 1998; Cashman and Marsh, 1988)。Tomiyama and Takahashi (1995)は、有珠火山の1663年プリニー式噴火の流紋岩マグマ中の斜長石の結晶サイズ分布からマグマ滞留時間を求めており、それによると100-1000年である。沼沢火山のような、他のカルデラ火山と比較し小型なマグマ溜りでは、マグマの冷却が早く進むため、さらにマグマの噴出可能な期間は短いであろう。

一方で、マグマの生産率が上昇すれば、短期間に大量のマグマを溜めることも可能である。例えば、下部地殻に大量のマンテル由来のメルトがきて大量のマグマが生成される、あるいは、小型のマグマ溜りを一度に多数用意しておいて、生成された珪長質マグマが効率よく集まることでマグマの生産率は上がる(高橋, 1995)。沼沢湖火砕噴火では、下部地殻の多様な場所で形成された複数のマグマが1つのマグマ溜りに集積して、噴火が発生している。このことがカルデラ形成噴火の高いマグマ蓄積率を生み出したと考えられる(増渕ほか, 2016)。

## 6.4 カルデラ形成噴火のマグマ蓄積過程

山元 (2003) も指摘しているように, 沼沢火山のマグマ噴出率は徐々に増加している (図 6). 上で述べたように, 43 ka 以降, 苦鉄質マグマの活動が顕在化し, 下部地殻の多様な場所でマグマが生成されるようになったことと関連があるようにもみえる.

6.1 で述べたように, 沼沢火山のマグマが下部地殻の部分溶融により生じたとすると, 珪長質マグマの温度変化は, 起源物質である下部地殻の温度変化に対応すると考えられる (石塚・中川, 1999). 斜長石とホルンブレンドのペアから求めた沼沢火山の珪長質マグマの温度分布 (図 35) を見ると, 高温側には時間的な変化は見られないが, 低温側は水沼火砕噴火以降, 上昇する傾向が見られる. このことを考えると, 沼沢火山のマグマの発生源である下部地殻が, 時間とともに温度が増加し, 多様な場所でマグマが発生しやすくなっていると考えないと合理的である. Yamamoto (2007) が沼沢火山の珪長質マグマの全岩  $\text{SiO}_2$  量の変化は部分溶融度の増加であるとしていることとも, 調和的である.

また, 沼沢湖火砕噴火の斑晶の累帯構造からは, デイサイト質マグマが蓄積する過程において, 苦鉄質なマグマの注入があったものの, 噴火には至らず, その後マグマ溜り内の対流により均質化したことが読み取れる (本論 5.7.2). すなわち, 少なくとも沼沢湖火砕噴火においては, マグマが蓄積しやすい条件があったと考えられる.

マグマの物質移動と蓄積は, 地殻・マントル構造と密接に関わっている. 沼沢火山が位置する地域には, 後期中新世から更新世に形成された直径 10 km 以上の大型カルデラが多く分布するが (図 8), これらの大型カルデラが形成された当時, 本地域は弱い圧縮応力場あるいは引張応力場であり (山元, 1992; 図 9), 地殻浅所にマグマが停滞するのに好条件であったと考えられる. 一方, 約 4 Ma 以降は, 太平洋プレートの運動方向の変化により, 本地域は強い圧縮応力が支配しており (Pollitz, 1986), 広域的なテクトニクスから考えると, マグマは蓄積しにくい環境である. 事実, 1 Ma 以降に形成された砂子原カルデラと沼沢カルデラは小型のカルデラである.

マグマ溜りに作用する実際の応力は, 火山活動に伴い発生する局所的な応力と広域的な応力の重ね合わせのため, 広域的なテクトニックな応力状況とは必ずしも一致する必要はないという考え方もある (三浦・和田, 2007). 大規模なマグマ溜りを形成するためには, 岩脈を形成するような応力集中を壁岩の特定箇所に起こさずに, マグマ溜りの体積を増やすことが必要である (東宮, 2016). マグマ溜り内の過剰圧の急激な上昇と, それによるマグマ溜り母岩への応力集中を抑制するようなプロセスが生じれば, マグマ溜りからマグマを噴出させない, すなわちマグマを溜めこむ事が可能だからである (東宮, 2016).

近年, マグマ溜りを取り囲む壁岩の粘弾性物性が, マグマ溜りの成長に重要な働きをしているとのモデルが提唱されるようになってきた (東宮, 2016). Gregg et al. (2013) は, マグマ溜りの形成によって壁岩が加熱されると, 脆性破壊強度よりも塑性変形強度が小さくなりうるため, 開口割れ目を形成する前に母岩が流動変形して, 応力集中を開放することを述べている.

沼沢火山では、噴火期が新しくなるほど、下部地殻の温度増加が示唆されており、マグマ溜り内の珪長質マグマの最低温度も上昇している。このことがマグマを蓄積しやすい環境を生み出し、カルデラ形成噴火を引き起こす原因の1つとなったと考えられる。





## 引用文献

- Allan, A. S., Morgan, D. J., Wilson, C. J. N. and Millet, M. A. (2013) From mush to eruption in centuries: assembly of the super-sized Oruanui magma body. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 166, 143–164.
- Andersen, D. J., Lindsley, D. H. and Davidson, P. M. (1993) QUILF: a PASCAL program to assess equilibria among Fe–Mg–Ti oxides, pyroxenes, olivine and quartz. *Computers and Geosciences*, 19, 1333–1350.
- Bachmann, O. and Bergantz, G. W. (2004) On the origin of crystal-poor rhyolites: extracted from batholithic crystal mushes. *J. Petrol.*, 45, 1565–1582.
- Bachmann, O. and Bergantz, G. W. (2008) The magma reservoirs that feed supereruptions. *Elements*, 4, 17–21.
- Bachmann, O., Dungan, M. A. and Lipman, P. W. (2002) The Fish Canyon magma body, San Juan volcanic field, Colorado: rejuvenation and eruption of an upper-crustal batholith. *J. Petrol.*, 43, 1469–1503.
- Bacon, C. R., Gunn, S. H., Lanphere, M. A. and Wooden, J. L. (1994) Multiple isotopic components in Quaternary volcanic rocks of the Cascade arc near Crater Lake, Oregon. *J. Petrol.*, 35, 1521–1556.
- Bacon, C. R. and Hirschmann, M. M. (1988) Mg/Mn partitioning as a test for equilibrium between coexisting Fe-Ti oxides. *Am. Mineral.*, 73, 57–61.
- Beard, J. S. and Lofgren, G. E. (1991) Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1.3 and 6.9 kb. *J. Petrol.*, 32, 365–401.
- Blundy, J. and Cashman, K. V. (2008) Petrologic reconstruction of magmatic system variables and processes. *Rev. Mineral. Geochem.*, 69, 179–239.
- Burgisser, A. and Bergantz, G. W. (2011) A rapid mechanism to remobilize and homogenize highly crystalline magma bodies. *Nature*, 471, 212–215.
- Cashman, K. V. (2004) Volatile controls on magma ascent and eruption. *Geophys. Monogr. Ser.*, 150, 109–124.
- Cashman, K. V., and Marsh, B. D. (1988) Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization II: Makaopuhi lava lake. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 99, 292–305.
- Conrad, W. K., Nicholls, I. A. and Wall, V. J. (1988) Water-saturated and undersaturated melting of metaluminous and peraluminous crustal compositions at 10 kbar: evidence for the origin of silicic magmas in the Taupo volcanic zone, New Zealand, and other occurrences. *J. Petrol.*, 29, 765–803.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J. (1996) *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. 2nd edition. Prentice Hall, London, 696p
- Eichelberger, J. C. (1978) Andesitic volcanism and crustal evolution. *Nature*, 275, 21–27.

- 
- Ewart, A., Marsh, J. S., Milner, S. C., Duncan, A. R., Kamber, B. S. and Armstrong, R. A. (2004) Petrology and geochemistry of early Cretaceous bimodal continental flood volcanism of the NW Etendeka, Namibia. Part 2: Characteristics and Petrogenesis of the high-Ti latite and high-Ti and low-Ti voluminous quartz latite eruptives. *J. Petrol.*, 45, 107–138.
- Ganio, M., Latruwe, K., Brems, D., Muchez, Ph., Vanhaecke, F. and Degryse, P. (2012) Sr-Nd isolation procedure for subsequent isotopic analysis using multi-collector ICP-mass spectrometry in the context of provenance studies on archaeological glass. *J. Anal. At. Spectrom.*, 27, 1335–1341.
- Gerlach, D. C., Frey, F. A., Moreno, H. and López-Escobar, L. (1987) Recent volcanics of the Puyehue-Cordon Caulle region, southern Andes, Chile (40.5°S), I. Petrogenesis of evolved lavas. *J. Petrol.*, 29, 333–382.
- 下司信夫 (2016) 大規模火砕噴火と陥没カルデラ：その噴火準備と噴火過程. *火山*, 61, 101–118
- Ghiorso, M. S. and Evans, B. W. (2008) Thermodynamics of rhombohedral oxide solid solutions and a revision of the Fe-Ti two-oxide geothermometer and oxygen-barometer. *Am. J. Sci.*, 308, 957–1039.
- Graham, I. J., Cole, J. W., Briggs, R. M., Gamble, J. A. and Smith, I. E. M. (1995) Petrology and Petrogenesis of volcanic rocks from the Taupo Volcanic Zone : a review. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 68, 59–87.
- Gregg, P. M., de Silva, S. L. and Grosfils, E. B. (2013) Thermomechanics of shallow magma chamber pressurization: Implications for the assessment of ground deformation data at active volcanoes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 384, 100–108.
- Gualda, G. A. R., Pamukcu, A. S., Ghiorso, M. S., Anderson, A. T., Sutton, S. R. and Rivers, M. L. (2012) Timescales of quartz crystallization and the longevity of the Bishop giant magma body. *PLoS ONE* :e37492
- Hayakawa, Y. (1985) Pyroclastic geology of Towada volcano. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 60, 507–592.
- Helz, R. T. (1973) Phase relations of basalts in their melting range at  $P_{H_2O}=5$  kb as a function of oxygen fugacity. Part I Mafic phases. *J. Petrol.*, 14, 249–302.
- Hildreth, W. (1981) Gradients in silicic magma chambers: implications for lithospheric magmatism. *J. Geophys. Res.*, 86, 10153–10192.
- Hildreth, W. and Fierstein, J. (2000) Overview: Katmai volcanic cluster and the great eruption of 1912. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 112, 1594–1620.
- Hildreth, W. and Wilson, C. J. N. (2007) Compositional zoning of the bishop tuff. *J. Petrol.*, 48, 951–999.
- Hildreth, W., Halliday, A. N. and Christiansen, R. L. (1991) Isotopic and chemical evidence concerning the genesis and contamination of basaltic and rhyolitic magma beneath the Yellowstone

- Plateau volcanic. *J. Petrol.*, 32, 1, 63–138.
- Holland, T. and Blundy, J. (1994) Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 116, 433–447.
- Humphreys, M. C. S., Blundy, J. D. and Sparks, R. S. J. (2006) Magma evolution and open-system processes at Shiveluch Volcano: insights from phenocryst zoning. *J. Petrol.*, 47, 2303–2334.
- 井村隆介 (2003) 霧島火山の噴火史とハザードマップ. 月刊地球, 25, 834–839.
- Ishizaki, Y., Masubuchi, Y. and Aono, Y. (2009) Two types of dacitic pumices from the caldera-forming eruption of Numazawa Volcano, NE Japan. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 104, 356–373
- 石塚吉浩・中川光弘 (1999) 北海道北部, 利尻火山噴出物の岩石学的進化. 岩鉱, 94, 279–294.
- Johannes, W. and Holtz, F. (1996) Formation of granitic magmas by dehydration melting. *Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks*. Springer, Berlin. 335 pp.
- 鍵山恒臣 (2010) カルデラ生成噴火の準備過程解明に向けた研究の展望. 地質学雑誌, 116, 463–472.
- 金子克哉・小屋口剛博・高橋俊郎 (2008) 大規模珪長質マグマ活動における地殻内マグマ過程—これまでの研究のレビューと阿蘇火山における新しい知見 (総特集 カルデラ生成噴火—準備過程の理解にむけて)—(カルデラ生成噴火のマグマシステム). 号外地球, 60, 187–197.
- Kaneko, K., Kamata, H., Koyaguchi, T., Yoshikawa, M. and Furukawa, K. (2007) Repeated large-scale eruptions from a single compositionally stratified magma chamber: an example from Aso volcano, southwest Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 167, 160–180.
- 小林哲夫・奥野 充・成尾英仁 (2006) 鬼界カルデラ 7.3cal kyr BP 噴火—カルデラ噴火における玄武岩質マグマと地殻応力の役割. 月刊地球, 28, 75–80.
- 小山真人, 2003, 現代社会は破局災害とどう向き合えばよいのか. 月刊地球, 25, 821–824.
- Kuritani, T. (1998) Boundary layer crystallization in a basaltic magma chamber: evidence from Rishiri Volcano, northern Japan. *J. Petrol.*, 39, 1619–1640.
- Lange, R. A., Frey, H. M. and Hector, J. (2009) A thermodynamic model for the plagioclase-liquid hygrometer/thermometer. *Am. Mineral.*, 94, 494–506.
- Lipman, P. W. (2000) Calderas. In Sigurdsson, H., ed., *Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press, San Diego, 643–662.
- Mann, A. C. (1983) Trace element geochemistry of high alumina basalt-andesite-dacite-rhyodacite lavas of the main volcanic series of Santorini volcano, Greece. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 84, 43–57.
- Marsh, B. D. (1988) Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization 1: Theory. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 99, 277–291.

- Marsh, B. D. (1998) On the interpretation of crystal size distributions in magmatic systems. *J. Petrol.*, 39, 553–599.
- Marsh, B. D. (2015) Magmatism, magma, and magma chambers. In Schubert, G. ed., *Treatise on Geophysics (Second Edition)*, Elsevier, 273–323.
- 増渕佳子・石崎泰男 (2011) 噴出物の構成物組成と本質物質の全岩および鉱物組成から見た沼沢火山の BC3400 カルデラ形成噴火 (沼沢湖噴火) のマグマ供給系. *地質学雑誌*, 117, 357–376.
- 増渕佳子・石崎泰男・白井智仁・松本亜希子・宮坂瑞穂・中川光弘 (2016) 岩石学的にみた沼沢火山におけるマグマ溜りの長期的進化とカルデラ形成噴火の準備過程, *地質学雑誌*, 122, 533–550.
- 松本哲一・宇井忠英 (1997) 阿多火砕流堆積物の K-Ar 年代. *火山*, 42, 223–225.
- Matsumoto, A., Uto, K. and Shibata, K. (1989) K-Ar dating by peak comparison method: New technique applicable to rocks younger than 0.5 Ma. *Bull. Geol. Surv. Japan.*, 40, 565–579.
- McBirney, A. R., Baker, B. H. and Nilson, R. H. (1985) Liquid fractionation. Part 1: Basic principles and experimental simulations. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 24, 1–24.
- McCormick, M. P., Thomason, L. W. and Trepte, C. R. (1995) Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption. *Nature*, 373, 399–404.
- 三浦大助・和田穰隆 (2007) 西南日本弧前縁の圧縮テクトニクスと中期中新世カルデラ火山. *地質学雑誌*, 113, 283–295.
- Miyashiro, A. (1974) Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Am. J. Sci.*, 274, 321–355.
- Nagaoka, S. (1988) Late Quaternary tephra layers from the caldera volcanoes in and around Kagoshima Bay, southern Kyushu, Japan. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, 23, 49–122.
- 中田節也 (2014) 日本の火山噴火の現状と低頻度大規模噴火に備えた研究のあり方. *学術の動向*, 19, 19–22.
- Newhall, C. G. and Self, S. (1982) The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *J. Geophys. Res.*, 87, 1231–1238.
- Ohki, J., Watanabe, N., Shuto, K. and Itaya, T. (1993) Shifting of the volcanic fronts during early to late Miocene in the northeast Japan arc. *Island Arc*, 2, 87–93.
- Oppenheimer, A. (2003) Climatic, environmental and human consequences of the largest known historic eruption: Tambora volcano (Indonesia) 1815. *Prog. Phys. Geogr.*, 27, 230–259.
- Orihashi, Y., Maeda, J., Tanaka, R., Zeniya, R. and Niida, K. (1998) Sr and Nd isotopic data for the seven GSJ rock reference samples; JA-1, JB-1a, JB-2, JB-3, JG-1a, JGb-1 and JR-1. *Geochem. J.*, 32, 205–211.
- Pallister, J. S., Hoblitt, R. P. and Reyes, A. G. (1992) A basalt trigger for the 1991 eruptions of Pinatubo

- volcano? *Nature*, 356, 426–428.
- Peccerillo, A. and Taylor, S. R. (1976) Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58, 63–81.
- Pietranik, A., Holtz, F., Koepke, J. and Puziewicz, J. (2009) Crystallization of quartz dioritic magmas at 2 and 1 kbar: experimental results. *Mineral. Petrol.*, 97, 1–21.
- Pollitz, F. F. (1986) Pliocene change in Pacific-plate motion. *Nature*, 320, 738–741.
- Pupier, E., Barbey, P., Toplis, M. J. and Bussy, F. (2008) Igneous layering, fractional crystallization and growth of granitic plutons; the Dolbel Batholith in SW Niger. *J. Petrol.*, 49, 1043–1068.
- Ridolfi, F., Renzulli, A. and Puerini, M. (2010) Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 160, 45–66.
- Robock, A. (2002) The climatic aftermath. *Science*, 295, 1242–1244.
- Ruprecht, P., Bergantz, G. W. and Dufek, J. (2008) Modeling of gas-driven magmatic overturn: Tracking of phenocryst dispersal and gathering during magma mixing. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q07017, doi: 10.1029/2008GC002022
- Rutherford, M. J. and Devine, J. D. (1996) Preeruption pressure–temperature conditions and volatiles in the 1991 dacitic magma of Mount Pinatubo. C.G. Newhall, R.S. Punongbayan (Eds.), *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Phillipines*. University of Washington Press, 751–766.
- Sakuyama, M. (1979) Evidence of magma mixing: petrological study of Shirouma-Oike calc-alkaline and andesite volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 5, 179–208.
- Scailliet, B. and Evans, B. W. (1999) The 15 June 1991 eruption of Mount Pinatubo. I. Phase equilibria and pre-eruption P-T- $f_{\text{O}_2}$ - $f_{\text{H}_2\text{O}}$  conditions of the dacite magma. *J. Petrol.*, 40, 381–411.
- Shaw, H. R. (1972) Viscosities of magmatic silicate liquids: an empirical method of prediction. *Am. J. Sci.*, 272, 870–893.
- 新東晃一 (1994) 縄文文化と鬼界アカホヤ火山灰. 町田 洋・森脇 広編, 火山噴火と環境・文明, 文明と環境 III, 思文閣出版, 163–180.
- Shukuno, H. (2003) Quantitative analysis of rock-forming minerals and volcanic glasses by electron probe microanalyzer. *Front. Res. Earth Evol.*, 1, 129–136.
- Shukuno, H., Tamura, Y., Tani, K., Chang, Q., Suzuki, T. and Fiske, R. S. (2006) Origin of silicic magmas and the compositional gap at Sumisu submarine caldera, Izu-Bonin arc, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 156, 187–216.
- Siebert, L., Simkin, T. and Kimberly P. (2010) *Volcanoes of the World*, 3rd ed., University of California Press, Los Angeles, CA., pp. 1–551.
- de Silva, S. L. (1989) The origin and significance of crystal rich inclusions in pumices from two Chilean

- ignimbrites. *Geol. Mag.*, 126, 159–175.
- Simikin, T. (1993) Terrestrial volcanism in space and time. *A. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1, 427–452.
- Sparks, R. S. J., Sigurdsson, H. and Wilson, L. (1977) Magma mixing: a mechanism for triggering acid explosive eruptions. *Nature*, 267, 315–318.
- Sun, S.-s. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. A.D. Saunders, M.J. Norry (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*, Geological Society, London, 313–345.
- 鈴木毅彦 (1999) 福島県太平洋岸, 塚原海岸における最終間氷期最盛期の海進海退過程とその時期降下したテフラについて. *地学雑誌*, 108, 216–230.
- 鈴木毅彦・藤原 治・檀原 徹 (1998) 関東北部から東北南部に分布する第四紀テフラのフィション・トラック年代. *第四紀研究*, 37, 95–106.
- Suzuki, Y., Yasuda, A., Hokanishi, N., Kaneko, T., Nakada, S. and Fujii, T. (2013) Syneruptive deep magma transfer and shallow magma remobilization during the 2011 eruption of Shimoe-dake, Japan —Constraints from melt inclusions and phase equilibria experiments—. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 257, 184–204.
- 高橋栄一・東宮昭彦・宮城磯治 (1997) 島弧火山の深部構造とマグマ変遷の仕組み. *火山*, 42, 209–218.
- 高橋正樹 (1995) 大規模珪長質火山活動と地殻歪速度. *火山*, 40, 33–42.
- 高橋正樹 (2003) 大規模カルデラ噴火のリスクと予測可能性. *月刊地球*, 25, 857–860.
- 高橋正樹 (2008) 超巨大カルデラ噴火のマグマ・システム. *号外地球*, 60, 134–140.
- Takahashi, E. (1986) Genesis of calc-alkali andesite magma in a hydrous mantle-crust boundary; petrology of lherzolite xenoliths from the Ichinomegata crater. Oga peninsula, northeast Japan, part II. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 29, 355–395.
- Takeuchi, S. and Nakamura, M. (2001) Role of precursory less-viscous mixed magma in the eruption of phenocryst-rich magma: evidence from the Hokkaido-Komagatake 1929 eruption. *Bull. Volcanol.*, 63, 365–376.
- Tatsumi, Y. and Suzuki-Kamata, K. (2014) Cause and risk of catastrophic eruptions in the Japanese Archipelago. *Proc. Japan Acad. Ser. B. Phys. Biol. Sci.*, 90, 347–352.
- Terashima, S. (1977) X-ray fluorescence determination of chromium, gallium, niobium, lead, rubidium, strontium, yttrium, zinc and zirconium in rocks. *Bull. Geol. Surv. Japan*, 28, 393–399.
- Tomiya, A. and Takahashi, E. (1995) Reconstruction of an evolving magma chamber beneath Usu Volcano since the 1663 eruption. *J. Petrol.*, 36, 617–636.
- Tomiya, A., Miyagi, I., Saito, G. and Geshi, N. (2013) Short time scales of magma-mixing processes prior to the 2011 eruption of Shinmoedake volcano, Kirishima volcanic group, Japan. *Bull. Volcanol.*, 75, 750.

- 東宮昭彦 (2016) マグマ溜まり：噴火準備過程と噴火開始条件. 火山, 61, 281–294.
- Trial, A. F. and Spera, F. J. (1990) Mechanisms for the generation of compositional heterogeneities in magma chambers. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 102, 353–367.
- Tsuchiyama, A. (1985) Dissolution kinetics of plagioclase in the melt of the system diopside- albite-anorthite, and origin of dusty plagioclase in andesites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 89, 1–16.
- Whitney, J. A. and Stormer, J. C. (1985) Mineralogy, petrology, and magmatic conditions from the Fish Canyon Tuff, central San Juan volcanic field, Colorado. *J. Petrol.*, 26, 726–762.
- 矢島一仁・小野 勝・藤巻宏和 (2001) XRF による 1 : 5 希釈ガラスビードを用いた全岩主要成分・微量成分の分析精確度および精密密度. 岩石鉱物科学, 30, 28–32.
- 山元孝広 (1992) 会津地域の後期中新世—更新世カルデラ火山群. 地質学雑誌, 98, 21–38.
- 山元孝広 (1995) 沼沢火山における火砕流噴火の多様性: 沼沢湖および水沼火砕堆積物の層序. 火山, 40, 67–81.
- 山元孝広 (1999) 福島—栃木地域に分布する 30–10 万年前のプリニー式降下火砕堆積物: 沼沢・燧ヶ岳・鬼怒沼・砂子原火山を給源とするテフラ群の層序. 地調月報, 50, 743–767.
- 山元孝広 (2003) 東北日本, 沼沢火山の形成史: 噴出物層序, 噴出年代及びマグマ噴出量の再検討. 地調研報, 54, 323–340.
- 山元孝広・長谷部忠夫 (2014) 福島県只見町叶津の埋没化石林の放射性炭素年代: 沼沢火山水沼噴火年代の再検討. 地質学雑誌, 120, 1–9.
- 山元孝広・駒澤正夫 (2004) 宮下地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査総合センター, 71p.
- 山元孝広・阪口圭一 (2000) テフラ層序からみた安達太良火山, 最近約 25 万年間の噴火活動. 地質学雑誌, 106, 865–882.
- 山元孝広・須藤 茂 (1996) テフラ層序からみた磐梯火山の噴火活動史. 地調月報, 47, 335–359.
- Yamamoto, T. (2007) A rhyolite to dacite sequence of volcanism directly from the heated lower crust: Late Pleistocene to Holocene Numazawa volcano, NE Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 167, 119–133.



## 謝辞

本論文の執筆にあたり、富山大学大学院理工学研究部の石崎泰男准教授には、長きに渡りご指導いただいた。また同研究部の清水正明教授、大藤茂教授、楠本成寿准教授には、貴重なご助言を頂いた。同位体組成分析において、北海道大学北海道大学大学院理学研究院の中川光弘教授、松本亜希子博士、宮坂瑞穂博士、栗谷豪准教授にご指導いただくとともに、研究に対するご助言・激励を頂いた。富山大学自然科学研究支援センターの山田聖氏には、XRF および EPMA 分析においてお世話になった。産業総合技術研究所の山元孝広博士には、貴重なご助言と露頭に関する情報を頂くとともに、学会等では何度も議論をしていただいた。富山大学大学院理工学研究部の川崎一雄助教には、Fe-Ti 酸化鉱物の同定と分析においてお世話になった。国立科学博物館の門馬鋼一博士には、Fe-Ti 酸化鉱物の XRD 分析においてお世話になった。磐梯山噴火記念館の佐藤公氏には、現地調査においてお世話になった。著者の所属先である富山市科学博物館の関係者には、研究をすすめる上での便宜を図っていただくとともに、激励を頂いた。本研究をすすめるにあたり、深田地質研究所の「平成 24 年度深田研究助成」（代表：増渕佳子）、(財)日本科学協会の「平成 26 年度笹川研究助成」（代表：増渕佳子）、JSPS 科研費 JP23510220（代表：石崎泰男）の援助を受けた。また個々の名前を記すことはしないが、学会等では多くの方に議論していただき、ご助言を頂いた。

以上の方々に心より感謝申し上げます。



---

## 付録

Appendix 1 露頭位置

Appendix 2 斑晶モード組成

Appendix 3 全岩化学組成

A3-1 主成分および微量成分組成

A3-2 微量成分および Sr・Nd 同位体組成

A3-3 石基ガラス組成

Appendix 4 鉱物化学組成

A4-1 斜長石

A4-2 ホルンブレンド

A4-3 斜方輝石

A4-4 Fe-Ti 酸化鉱物

Appendix 5 本論文に関する発表・研究助成

A5-1 公表論文

A5-2 学会発表

A5-3 研究助成

## Appendix 1 露頭位置

## Appendix 1 本研究で使用した代表的なサンプルの採取地点

Eruption age	Eruption name	Symbol	Place name	Latitude	Longitude	Geodetic system
5.4 ka	Nk	Nk-A	金山町水沼上大牧	37.484201	139.561468	WGS84
5.4 ka	Nk	Nk-B	金山町水沼	37.483097	139.567924	WGS84
5.4 ka	Nk	Nk-C	金山町水沼	37.476712	139.561178	WGS84
5.4 ka	Nk	Nk-D	金山町大栗山	37.477551	139.549333	WGS84
5.4 ka	Nk	Nk-E	三島町大谷	37.446161	139.656660	WGS84
5.4 ka	Nk	Nk-F	三島町間方	37.409647	139.620648	WGS84
5.4 ka	Nk	Nk-G	三島町大登	37.462588	139.646962	WGS84
5.4 ka	Nk	Nk-H	三島町大石田下居平	37.486158	139.640333	WGS84
24 ka	Me	Me-A	金山町川口	37.450406	139.567547	WGS84
43 ka	Sz	Sz-A	金山町大栗山	37.463383	139.555553	WGS84
53 ka	Mz	Mz-A	三島町早戸	37.457728	139.604208	WGS84
53 ka	Mz	Mz-B	金山町大栗山	37.456878	139.597803	WGS84
71 ka	Mk	Mk-W	金山町大栗山	37.465339	139.547783	WGS84
110 ka	Sr	Sr-A	金山町川口	37.453683	139.537836	WGS84

## Appendix 2 斑晶モード組成

Appendix 2 沼沢湖火砕堆積物の本質物（スコリアと軽石）のモード組成. WP= 白色軽石, PpP= 斑晶に乏しい軽石, PrP= 微斑晶に富む軽石, BS= 黒色スコリア, GS= 灰色スコリア

Eruption age	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka		
Eruption name	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk		
Unit	I	I	I	II	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I		
Location	Nk-A	Nk-A	Nk-G	Nk-A	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-F	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-H		
Sample name	1	DIWP	2	3	3	4	5	6	7	7	11	12-13	12-14	6	10	12-01	12-02	12-03	12-04	12-05		
Rock type	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PrP		
(vol.%)																						
Plagioclase (micro-Ph.)	25.7	26.9	28.9	37.2	24.0	32.8	27.5	26.7	29.9	28.9	32.1	27.0	16.2	18.4	20.0	17.5	14.6	24.2	18.3	19.9	15.5	0.0
Quartz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45.7
Hornblende (micro-Ph.)	5.3	3.6	2.4	2.7	1.6	2.5	2.3	2.5	1.3	3.0	1.9	0.5	2.6	10.1	0.0	0.0	7.0	0.0	1.3	0.7	0.0	0.0
Orthopyroxene	3.9	7.3	7.6	6.4	10.5	12.5	8.1	7.9	6.1	5.2	4.7	6.6	8.3	4.6	5.1	2.2	6.3	2.9	4.2	2.6	4.5	0.0
Opaque minerals	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24.9
Groundmass	1.2	2.6	2.5	3.3	1.8	1.8	1.5	1.1	1.8	3.0	0.9	1.5	1.8	1.4	1.0	2.2	1.4	0.8	2.6	0.8	1.7	0.3
Total	1.8	1.0	1.1	1.9	1.8	1.4	0.8	1.1	1.6	1.6	1.1	1.0	1.4	1.1	0.2	0.0	1.6	1.0	0.7	0.5	0.4	0.3
Phenocryst	62.2	58.6	57.5	48.5	60.3	49.0	59.8	60.8	59.4	58.2	59.3	63.4	69.6	64.4	73.7	78.0	69.1	71.1	72.9	75.6	77.9	28.8
Vesicle	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	37.8	41.4	42.5	51.5	39.7	51.0	40.2	39.2	40.6	41.8	40.7	36.6	30.4	35.6	26.3	22.0	30.9	28.9	27.1	24.4	22.1	71.2
	66.7	61.1	72.5	52.0	72.3	64.3	62.9	61.5	60.0	42.4	60.4	60.0	75.3	68.4	70.5	72.9	72.0	75.8	72.7	69.3	74.2	66.2
Eruption age	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka
Eruption name	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk
Unit	I	I	I	I	I	I	I	I	I	II	IV	I	I	II	II	IV	IV	IV	IV	IV	IV	Nk
Location	Nk-F	Nk-F	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-B	Nk-C	Nk-D	Nk-E	Nk-E	Nk-C	Nk-G	Nk-D	Nk-D	Nk-E	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H
Sample name	12-06	12-07	12-08	12-09	12-10	12-11	12-12	9	10	11	13	17	18	20	21	BS9	22	23	24	GS-2	16	25
Rock type	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	GS	GS
(vol.%)																						
Plagioclase (micro-Ph.)	15.7	17.0	15.5	28.3	19.2	28.4	31.0	6.9	8.3	5.2	8.1	6.8	5.2	5.7	3.3	2.5	9.7	5.1	11.5	11.1	11.1	4.8
Quartz	12.8	18.2	25.1	8.4	10.2	1.2	5.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hornblende (micro-Ph.)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.1	0.3	0.3	0.3	0.5	1.5	0.3	0.0	1.6	1.2	1.7	0.1	0.1	1.4
Orthopyroxene	1.6	3.5	2.7	12.0	8.2	18.8	4.6	1.4	6.3	1.0	1.8	2.2	0.5	0.3	1.2	0.8	2.7	2.3	0.3	2.4	2.4	1.4
Opaque minerals	16.9	21.1	20.3	11.5	7.8	0.0	4.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Groundmass	0.0	0.0	0.3	1.5	0.3	0.2	2.0	0.3	0.9	0.1	0.5	0.4	0.9	0.3	0.0	0.2	0.7	0.3	0.7	0.8	0.8	1.7
Total	0.6	0.1	1.6	1.2	0.9	1.2	1.1	0.0	0.7	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.4	0.3	0.6	0.7	0.1	0.5	0.5	0.7
	52.4	40.1	34.5	37.2	53.4	50.3	51.1	91.5	83.8	93.2	88.9	90.0	92.6	92.0	94.7	96.1	84.8	90.3	85.7	85.1	85.1	89.9
	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Phenocryst	47.6	59.9	65.5	62.8	46.6	49.7	48.9	8.5	16.2	6.8	11.1	10.0	7.4	8.0	5.3	3.9	15.2	9.7	14.3	14.9	14.9	10.1
Vesicle	74.6	64.2	63.5	69.6	66.6	69.7	71.8	61.4	59.2	65.4	37.1	43.5	51.9	62.4	51.6	54.6	46.3	55.0	62.7	56.6	56.6	64.9

Appendix 2 (続き) 沼沢湖火砕堆積物の本質物 (スコリアと軽石) のモード組成. BS= 黒色スコリア, GS= 灰色スコリア

Eruption age	5.4 ka		5.4 ka		5.4 ka	
	Nk	IV	Nk-H	IV	Nk	IV
Eruption name	Nk	IV	Nk-H	IV	Nk	IV
Unit	IV	IV	Nk-H	IV	IV	IV
Location	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H
Sample name	26	28	29	30		
Rock type	GS	GS	GS	GS	GS	GS
(vol.%)						
Plagioclase	8.0	7.6	13.1	23.2		
(micro-Ph.)	-	-	-	-		
Quartz	1.2	0.5	0.2	1.8		
Hornblende	1.6	0.6	2.0	2.8		
(micro-Ph.)	-	-	-	-		
Orthopyroxene	0.1	0.0	0.6	1.4		
Opaque minerals	0.6	0.6	0.2	0.3		
Groundmass	88.5	90.6	83.9	70.4		
Total	100.0	100.0	100.0	100.0		
Phenocryst	11.5	9.4	16.1	29.6		
Vesicle	61.3	68.6	73.0	39.8		



### Appendix 3 全岩化学組成

A3-1 主成分・微量成分組成

A3-2 微量成分および Sr・Nd 同位体組成

A3-3 石基ガラス組成

## A3-1-1 沼沢火山先カルテラ期の本質物・溶岩の全岩化学組成

Eruption name	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mz	Mz	Mz	Mz	Mz	Mz
Eruption age	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	53 ka	53 ka	53 ka	53 ka	53 ka	53 ka
Location	MK-W	MK-W	MK-W	MK-W	MK-W	MK-W	MK-W	MK-W	MK-W	MK-W	MK-W	MK-W	MK-W	MK-W	Mz-A	Mz-A	Mz-A	Mz-A	Mz-A	Mz-B
Sample name	Mk06-1	Mk06-2	Mk06-3	Mk06-4	Mk06-5	Mk12-1	Mk12-2	Mk12-3	Mk12-4	Mk12-5	Mz02-1	Mz02-2	Mz02-3	Mz02-4	Mz02-5	Mz02-5	Mz02-5	Mz02-5	Mz02-5	Mz12-1
Rock type	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice
Analyst	Ishizaki	Ishizaki	Ishizaki	Ishizaki	Aono	Shirai	Shirai	Shirai	Shirai	Shirai	Shirai	Shirai	Shirai	Shirai	Ishizaki	Ishizaki	Ishizaki	Ishizaki	Ishizaki	Ishizaki
(wt.%)																				
SiO <sub>2</sub>	72.19	70.82	71.49	70.42	70.57	70.79	68.80	69.38	68.32	68.22	69.17	68.85	68.49	67.84	67.48	67.81				
TiO <sub>2</sub>	0.34	0.37	0.35	0.39	0.36	0.33	0.38	0.37	0.38	0.39	0.44	0.47	0.47	0.44	0.44	0.43				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.60	16.43	16.01	17.15	16.52	15.23	16.64	16.14	16.32	16.78	15.80	15.80	16.06	15.77	15.57	15.45				
FeO*	2.45	2.74	2.55	2.97	2.71	2.60	2.92	3.00	2.80	3.10	3.74	3.87	3.95	3.91	3.84	3.76				
MnO	0.13	0.16	0.15	0.14	0.15	0.14	0.16	0.15	0.16	0.16	0.15	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15				
MgO	0.77	0.95	0.89	0.96	0.95	0.86	1.02	0.99	0.98	0.99	1.37	1.45	1.45	1.36	1.35	1.30				
CaO	2.66	2.87	2.83	2.74	2.92	2.57	2.95	2.69	2.88	2.84	3.89	3.96	3.91	3.85	3.73	3.74				
Na <sub>2</sub> O	4.09	4.18	4.16	3.91	4.18	4.15	4.26	4.04	4.16	4.20	3.90	3.85	3.95	3.85	3.84	4.03				
K <sub>2</sub> O	2.36	2.16	2.20	2.10	2.09	2.18	2.05	2.03	2.12	2.00	1.93	1.90	2.00	1.98	2.01	1.96				
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.08	0.11	0.04	0.08	0.09	0.10	0.03	0.08	0.07	0.13	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13				
Total	100.97	101.08	101.03	101.16	100.83	99.21	99.61	99.15	98.49	99.10	100.94	100.89	101.03	99.72	98.97	99.18				
FeO*/MgO	3.17	2.88	2.85	3.09	2.86	3.04	2.86	3.04	2.86	3.14	2.72	2.68	2.72	2.87	2.85	2.89				
LOI (%)	1.54	1.85	1.67	2.65	1.86	0.82	2.33	2.56	2.44	2.24	1.35	1.28	1.49	0.76	1.50	1.38				
(ppm)																				
Rb	53	48	49	47	45	42	48	50	49	45	45	43	43	41	44	46				
Sr	239	251	245	252	251	233	260	237	249	250	289	284	283	274	279	287				
Nb	5	5	5	5	5	5	6	4	5	6	4	4	4	5	3	5				
Y	29	29	31	27	30	30	30	26	31	26	30	31	31	27	29	26				
Zr	99	99	94	107	100	105	108	103	107	112	98	97	102	92	97	96				
V	31	32	31	35	34	33	35	41	38	40	56	55	54	51	38	59				
Ba	720	695	748	784	748	679	714	678	698	858	645	611	648	557	601	571				

A3-1-1 (続き) 沼沢火山先カルラ期の本質物・溶岩の全岩化学組成

Eruption name	Mz	Mz	Mz	Mz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz		
Eruption age	53 ka	53 ka	53 ka	53 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka		
Location	Mz-B	Mz-B	Mz-B	Mz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A		
Sample name	Mz12-2	Mz12-3	Mz12-4	Mz12-5	Mz02-6 1(H)	Sz 0 2 - Sz 0 2 1(H)	Sz 0 2 - Sz 0 2 2(H)	Sz 0 6 - Sz12-1 3(H)	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Sz12-5b 2(E)	
Rock type	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Enclave	Enclave	
Analyst	Shirai	Shirai	Shirai	Shirai	Ishizaki	Aono	Ishizaki	Ishizaki	Ishizaki	Shirai	Shirai	Shirai	Shirai	Shirai	Shirai	Shirai	Ishizaki	Shirai	
(wt.%)																			
SiO <sub>2</sub>	67.55	67.52	67.95	68.50	66.60	67.81	67.01	65.68	67.65	66.92	66.01	66.64	66.94	54.90	57.24	57.44			
TiO <sub>2</sub>	0.45	0.43	0.46	0.44	0.49	0.50	0.50	0.51	0.51	0.49	0.50	0.50	0.50	0.99	0.88	0.89			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.22	15.48	15.45	15.43	15.58	16.10	16.16	15.53	15.78	15.72	15.85	15.68	15.40	17.20	17.54	17.60			
FeO*	3.90	3.69	3.94	3.64	4.33	4.52	4.46	4.69	4.65	4.56	4.64	4.50	4.56	10.15	9.02	9.06			
MnO	0.15	0.15	0.16	0.14	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.32	0.19	0.19			
MgO	1.37	1.33	1.48	1.26	1.51	1.47	1.56	1.73	1.64	1.60	1.69	1.60	1.62	3.94	3.24	3.26			
CaO	3.72	3.75	3.80	3.69	3.98	3.95	3.96	4.13	3.99	4.03	4.11	4.18	3.99	7.15	5.91	5.97			
Na <sub>2</sub> O	3.95	4.04	4.00	4.05	3.78	3.64	3.79	3.64	3.67	3.79	3.81	3.86	3.77	3.38	2.90	2.91			
K <sub>2</sub> O	1.94	1.99	1.96	2.00	1.90	1.86	1.89	1.81	1.84	1.79	1.76	1.79	1.80	0.78	1.23	1.25			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.13	0.13	0.14	0.13	0.12	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12	0.13	0.14	0.14	0.18	0.19	0.19			
Total	98.83	98.91	99.78	99.68	98.91	100.64	100.11	98.53	100.54	99.67	99.17	99.54	99.37	100.13	99.33	99.78			
FeO*/MgO	2.84	2.78	2.66	2.90	2.88	3.06	2.87	2.72	2.83	2.85	2.74	2.82	2.81	2.57	2.78	2.78			
LOI (%)	1.42	0.40	1.40	1.32	0.18	0.53	0.53	0.44	0.52	0.62	0.80	0.42	0.46	0.56	2.22	2.22			
(ppm)																			
Rb	44	46	46	46	46	42	42	39	42	42	41	42	39	15	31	25			
Sr	281	282	279	283	292	285	285	288	290	289	286	287	278	335	295	296			
Nb	5	5	5	3	4	4	4	3	4	4	5	4	4	5	4	1			
Y	27	26	28	25	27	28	28	28	25	22	24	24	24	49	25	24			
Zr	95	100	99	103	92	99	99	99	101	100	95	102	99	48	78	77			
V	55	53	53	54	75	72	72	64	59	80	81	68	66	135	187	177			
Ba	554	580	568	565	585	583	583	528	594	519	517	518	519	273	336	337			

## A3-1-1 (続き) 沼沢火山先カルテラ期の本質物・溶岩の全岩化学組成

Eruption name	Sz	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	Me	
Eruption age	43 ka	24 ka	24 ka	24 ka	24 ka	24 ka	24 ka	24 ka	24 ka	24 ka	24 ka	24 ka	24 ka	24 ka	
Location	Sz-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	
Sample name	Sz12-6	Me06-1(H)	Me06-2(H)	Me12-1	Me12-2	Me12-3	Me06-3(E)	Me06-4(E)	Me06-5(E)	Me06-6	Me12-4(E)	Me12-5	Me12-6(E)	Me12-7(E)	Me12-8(H)
Rock type	Gabbroic Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Enclave	Enclave	Enclave	Enclave	Enclave	Lava	Enclave	Enclave	Lava
Analyst	Shirai	Ishizaki	Ishizaki	Ishizaki	Shirai	Shirai	Ishizaki	Ishizaki	Ishizaki	Shirai	Shirai	Shirai	Shirai	Shirai	Shirai
(wt.%)															
SiO <sub>2</sub>	56.40	64.80	64.48	64.63	65.01	63.91	61.88	54.97	55.82	54.82	54.73	64.73	54.36	53.97	64.35
TiO <sub>2</sub>	0.84	0.64	0.62	0.63	0.57	0.62	0.71	1.05	1.00	1.05	0.60	0.60	0.99	1.03	0.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.27	15.90	15.91	16.05	15.60	15.85	16.26	17.40	17.34	17.30	15.69	17.21	17.21	17.26	15.52
FeO*	8.43	5.71	5.57	5.80	5.23	5.58	6.49	9.17	9.00	9.30	5.43	9.44	9.26	9.26	5.54
MnO	0.27	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.16	0.22	0.22	0.20	0.15	0.23	0.19	0.19	0.16
MgO	3.21	2.18	2.30	2.08	1.95	2.00	2.45	3.52	3.55	3.69	2.03	3.83	3.60	3.60	2.06
CaO	6.17	5.10	4.79	5.10	4.77	4.98	5.66	7.71	7.64	7.79	4.89	7.82	7.79	7.79	4.87
Na <sub>2</sub> O	3.83	3.47	3.40	3.51	3.65	3.69	3.60	3.05	2.97	3.07	3.66	3.62	3.05	3.05	3.63
K <sub>2</sub> O	1.20	1.60	1.63	1.56	1.73	1.66	1.36	1.03	0.97	1.05	1.70	0.98	1.00	1.00	1.64
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.27	0.16	0.14	0.15	0.14	0.15	0.16	0.23	0.20	0.20	0.15	0.15	0.15	0.20	0.15
Total	98.83	100.36	99.62	100.30	99.39	99.21	99.46	99.38	99.71	99.51	99.64	99.68	98.38	98.38	99.12
FeO*/MgO	2.62	2.62	2.42	2.78	2.69	2.79	2.65	2.60	2.54	2.52	2.67	2.47	2.57	2.70	2.70
LOI (%)	0.74	0.10	0.40	0.06	0.14	0.02	0.18	0.38	0.17	0.12	0.16	0.22	0.22	0.22	0.14
(ppm)															
Rb	26	36	37	36	38	35	29	24	20	27	37	22	21	21	37
Sr	360	337	326	341	316	326	362	445	450	429	321	382	420	420	320
Nb	4	3	4	2	3	3	4	2	2	3	6	4	4	4	3
Y	45	25	25	23	23	23	25	23	25	22	23	37	23	23	24
Zr	115	96	94	91	89	97	90	75	77	66	93	58	67	67	100
V	99	75	128	56	70	95	72	102	101	104	72	144	111	111	81
Ba	400	524	519	507	489	490	407	253	268	321	487	319	318	318	471

## A3-1-2 沼沢火山カルデラ形成期（沼沢湖火砕噴火）の本質物の全岩化学組成

Eruption name	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk
Eruption age	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka
Location	Nk-A	Nk-A	Nk-G	Nk-H	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-D	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-H
Unit	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Sample name	07-01	07-02	07-03	07-04	07-05	07-06	07-07	07-08	07-09	07-10	08-02	08-03	08-05	08-07	12-13	12-14	
Rock Type	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP
Analyst	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi
(wt.%)																	
SiO <sub>2</sub>	67.72	67.78	67.30	67.53	67.80	66.48	67.25	66.27	66.01	67.69	65.78	65.69	65.89	65.82	65.92	66.15	
TiO <sub>2</sub>	0.62	0.60	0.59	0.60	0.60	0.60	0.57	0.61	0.60	0.61	0.57	0.60	0.56	0.62	0.57	0.59	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.82	15.49	15.95	16.08	15.77	15.92	16.10	16.13	16.28	16.31	16.41	16.26	16.13	15.89	16.14	15.97	
FeO*	5.14	5.00	4.64	4.45	4.44	5.24	5.15	5.26	5.22	4.44	5.30	5.51	5.39	5.65	4.04	4.32	
MnO	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.15	0.16	0.15	0.16	0.13	0.14	
MgO	1.99	2.00	2.02	1.96	2.05	2.02	1.90	2.06	1.98	2.05	1.88	2.07	2.01	2.23	1.95	2.02	
CaO	4.56	4.48	4.84	4.82	4.60	4.90	4.82	4.95	4.91	4.72	4.97	4.99	4.80	4.95	4.67	4.57	
Na <sub>2</sub> O	3.43	3.40	3.49	3.49	3.50	3.47	3.53	3.47	3.49	3.51	3.48	3.45	3.41	3.42	3.54	3.47	
K <sub>2</sub> O	2.01	2.05	1.94	1.93	1.96	1.84	1.85	1.81	1.80	1.82	1.80	1.75	1.79	1.76	1.89	1.99	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.05	0.12	0.11	0.04	0.15	0.14	0.14	0.14	0.05	0.16	0.14	0.14	0.14	0.05	0.07	
Total	101.48	100.99	101.04	101.11	100.88	100.75	101.46	100.85	100.58	101.35	100.50	100.61	100.28	100.64	98.88	99.29	
FeO*/MgO	2.58	2.50	2.30	2.26	2.17	2.60	2.72	2.56	2.63	2.16	2.81	2.66	2.68	2.54	2.07	2.13	
LOI (%)	1.55	1.50	1.26	1.30	1.28	1.22	1.24	1.25	1.29	1.29	5.26	-	-	-	1.56	1.47	
(ppm)																	
Rb	42	43	40	41	41	40	43	40	39	40	38	37	34	40	45	45	
Sr	302	306	313	319	305	325	333	332	322	330	335	329	360	321	319	313	
Nb	3	3	4	3	4	4	3	4	4	3	3	4	4	4	3	4	
Y	22	22	23	24	23	24	24	24	22	23	23	34	26	23	24	22	
Zr	105	109	104	107	105	111	114	106	104	112	105	107	109	105	108	109	
V	82	82	90	84	77	84	84	92	85	84	74	72	81	83	74	69	
Ba	580	653	580	580	556	604	599	578	569	563	573	568	496	543	503	489	

## A3-1-2 (続き) 沼沢火山カルデラ形成期 (沼沢湖火砕噴火) の本質物の全岩化学組成

Eruption name	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk
Eruption age	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka
Location	Nk-D	Nk-D	Nk-D	Nk-D	Nk-E	AlGrPm	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F
Unit	II	II	II	III	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Sample name	07-22	07-23	07-24	07-25	07-26	07-27	07-31	08-09	08-10	08-11	08-14	12-01	12-02	12-03	12-04	12-05	12-05
Rock Type	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP
Analyst	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi
(wt.%)																	
SiO <sub>2</sub>	65.73	66.71	66.25	65.91	66.69	65.35	66.20	66.12	65.46	66.08	65.67	63.74	63.69	65.28	62.70	64.27	64.27
TiO <sub>2</sub>	0.62	0.62	0.61	0.62	0.56	0.66	0.63	0.65	0.60	0.59	0.68	0.61	0.65	0.57	0.66	0.60	0.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.86	15.69	16.22	16.18	16.38	16.33	15.76	17.99	16.11	15.74	17.06	16.04	16.21	15.94	16.48	16.08	16.08
FeO*	5.52	5.50	5.34	5.45	5.01	5.79	5.46	3.05	5.53	5.34	4.12	5.47	5.52	4.90	5.74	5.16	5.16
MnO	0.16	0.15	0.15	0.15	0.14	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15	0.17	0.16	0.17	0.14	0.18	0.16	0.16
MgO	2.19	2.02	1.98	2.06	1.83	2.26	2.39	2.23	2.07	1.97	2.38	2.09	2.25	1.93	2.27	2.13	2.13
CaO	4.70	4.63	4.87	4.85	4.78	5.01	4.99	5.64	5.07	4.73	5.18	5.00	5.28	4.76	5.53	5.10	5.10
Na <sub>2</sub> O	3.39	3.37	3.50	3.41	3.50	3.38	3.52	3.55	3.62	3.41	3.51	3.48	3.50	3.53	3.52	3.51	3.51
K <sub>2</sub> O	1.82	1.84	1.80	1.79	1.86	1.72	1.81	1.46	1.78	1.92	1.61	1.70	1.59	1.88	1.42	1.73	1.73
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.16	0.12	0.13	0.11	0.10	0.05	0.21	0.15	0.15	0.14	0.16	0.19	0.12	0.20	0.18	0.18
Total	100.08	100.68	100.84	100.55	100.85	100.76	100.97	101.07	100.55	100.08	100.50	98.44	99.03	99.07	98.70	98.92	98.92
FeO*/MgO	2.52	2.73	2.70	2.64	2.74	2.56	2.28	1.36	2.67	2.71	1.73	2.62	2.46	2.55	2.52	2.42	2.42
LOI (%)	1.30	1.50	1.26	1.59	1.44	1.11	0.59	-	-	-	-	1.34	1.43	1.45	1.38	1.51	1.51
(ppm)																	
Rb	39	42	39	38	41	38	40	30	37	40	30	41	36	43	34	39	39
Sr	310	318	328	320	326	333	328	411	349	315	354	341	370	324	389	347	347
Nb	3	4	4	3	3	4	4	4	4	3	4	3	4	4	3	4	4
Y	23	24	22	23	21	24	26	28	25	24	35	24	26	26	29	26	26
Zr	112	117	109	106	107	104	109	109	100	106	82	101	100	109	105	106	106
V	91	97	91	91	84	108	92	77	73	80	123	85	81	79	80	75	75
Ba	557	614	596	537	568	533	524	483	586	573	441	450	408	472	394	450	450

## A3-1-2 沼沢火山カルデラ形成期（沼沢湖火砕噴火）の本質物の全岩化学組成

Eruption name	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk
Eruption age	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka
Location	Nk-F	Nk-H	Nk-D	Nk-F	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-C	Nk-C	Nk-C
Unit	I	I	II	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Sample name	08-12	08-13	08-15	12-06	12-07	12-08	12-09	12-10	12-11	12-12	07-11	07-12	07-13	07-14	07-15	08-04	
Rock Type	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	GP	GP	GP	GP	GP	GP	GP
Analyst	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi
(wt.%)																	
SiO <sub>2</sub>	59.55	61.83	62.04	60.51	55.31	57.92	59.14	59.25	59.74	59.06	66.11	66.35	66.06	67.25	67.02	59.47	
TiO <sub>2</sub>	0.88	0.90	0.93	0.76	0.98	0.95	0.93	0.87	0.89	1.01	0.62	0.64	0.58	0.61	0.61	0.82	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.91	17.79	16.37	16.83	17.07	17.20	16.81	17.21	17.04	16.53	15.87	15.90	16.11	15.74	15.71	17.69	
FeO*	7.75	5.58	7.67	6.54	8.73	7.09	7.11	6.41	6.47	7.17	5.60	5.83	5.08	5.52	5.42	7.66	
MnO	0.18	0.17	0.42	0.17	0.19	0.18	0.19	0.18	0.16	0.19	0.16	0.16	0.14	0.15	0.15	0.22	
MgO	3.24	3.43	2.80	2.64	3.77	3.58	3.37	3.23	3.27	3.59	2.15	2.16	1.91	2.06	2.03	3.05	
CaO	7.02	7.13	5.16	6.22	7.67	6.94	6.48	6.59	6.62	6.51	5.12	5.06	4.89	4.96	4.86	7.25	
Na <sub>2</sub> O	3.30	3.42	3.57	3.20	3.16	3.58	3.28	3.33	3.22	3.28	3.52	3.48	3.55	3.53	3.48	3.37	
K <sub>2</sub> O	1.45	1.47	1.37	1.71	1.17	1.23	1.47	1.45	1.54	1.42	1.72	1.70	1.83	1.79	1.83	0.83	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.19	0.03	0.08	0.23	0.19	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04	0.15	0.15	0.12	0.15	0.14	0.32	
Total	100.45	101.74	100.41	98.80	98.24	98.72	98.81	98.56	99.00	98.80	101.02	101.43	100.27	101.76	101.23	100.67	
FeO*/MgO	2.39	1.63	2.74	2.48	2.32	1.98	2.11	1.98	1.98	2.00	2.60	2.71	2.66	2.68	2.67	2.51	
LOI (%)				1.41	0.68	0.80	1.00	1.03	1.12	1.00	0.57	0.62	0.75	0.25	0.55	-	
(ppm)																	
Rb	30	32	38	42	29	30	35	35	39	35	38	37	40	39	40	41	
Sr	392	381	279	393	363	372	351	365	345	341	339	333	324	322	319	318	
Nb	4	3	5	3	5	3	4	5	5	3	3	3	3	3	3	4	
Y	32	27	24	30	41	35	32	29	34	33	24	23	23	25	23	25	
Zr	96	108	112	102	65	81	78	92	79	73	107	106	104	105	103	109	
V	90	59	135	75	181	129	127	99	121	140	89	89	84	89	83	78	
Ba	454	531	324	429	320	346	398	404	407	395	503	498	539	516	534	547	

A3-1-2 (続き) 沼沢火山カルデラ形成期 (沼沢湖火砕噴火) の本質物の全岩化学組成

Eruption name	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk
Eruption age	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka
Location	Nk-C	Nk-C	Nk-H	Nk-C	Nk-C	Nk-D	Nk-D	Nk-D	Nk-D	Nk-E	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C
Unit	I	I	I	I	II	II	II	II	II	III	I	I	I	I	I	I	I	I
Sample name	08-06	08-08	08-16	08-17	08-18	08-19	08-20	08-21	08-22	08-23	07-16	07-17	07-18	07-19	07-20	07-21		
Rock Type	GP	GP	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS
Analyst	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi
(wt.%)																		
SiO <sub>2</sub>	66.14	65.39	59.95	59.99	59.01	64.65	58.56	59.97	59.24	59.69	64.18	59.80	60.36	60.74	59.34	59.58		
TiO <sub>2</sub>	0.60	0.59	0.90	0.83	0.84	0.63	0.85	0.81	0.84	0.87	0.69	0.84	0.84	0.79	0.82	0.87		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.86	15.78	17.81	17.91	17.93	16.20	17.86	17.58	17.79	16.99	16.44	18.31	17.93	17.34	17.47	17.80		
FeO*	5.44	5.41	7.95	6.68	7.99	5.96	7.98	7.60	7.94	8.29	6.42	7.08	6.82	7.25	7.60	7.51		
MnO	0.15	0.15	0.20	0.21	0.22	0.17	0.23	0.22	0.23	0.22	0.20	0.20	0.21	0.21	0.22	0.22		
MgO	2.11	2.00	2.95	2.85	3.07	2.19	3.13	3.01	3.09	3.24	2.52	2.88	2.96	2.88	2.98	3.11		
CaO	4.82	4.85	7.00	6.91	7.37	5.35	7.26	6.96	7.06	6.72	5.52	7.08	7.07	7.02	7.13	7.13		
Na <sub>2</sub> O	3.49	3.50	2.97	3.42	3.32	3.46	3.33	3.33	3.33	3.30	3.31	3.35	3.44	3.41	3.34	3.36		
K <sub>2</sub> O	1.84	1.82	0.72	0.86	0.81	1.61	0.73	0.87	0.82	0.95	1.39	0.77	0.83	0.98	0.80	0.79		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.13	0.13	0.42	0.29	0.31	0.17	0.35	0.33	0.34	0.25	0.21	0.29	0.30	0.28	0.30	0.33		
Total	100.57	99.62	100.87	99.94	100.87	100.39	100.26	100.67	100.68	100.51	100.88	100.60	100.76	100.89	99.99	100.69		
FeO*/MgO	2.58	2.71	2.70	2.35	2.60	2.72	2.55	2.52	2.57	2.56	2.55	2.46	2.30	2.52	2.55	2.42		
LOI (%)											0.30	0.73	0.51	0.49	0.19	0.53		
(ppm)																		
Rb	38	41	13	16	14	15	12	16	14	20	31	15	14	17	15	14		
Sr	315	326	480	502	505	491	493	478	492	459	353	485	498	472	486	503		
Nb	3	5	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3		
Y	24	20	29	29	29	30	30	29	29	30	26	27	29	28	28	30		
Zr	101	106	109	108	103	101	102	105	103	111	109	106	103	101	103	109		
V	93	80	86	66	76	77	78	82	84	94	92	92	83	85	88	92		
Ba	547	546	283	271	287	262	239	282	252	296	416	304	263	312	274	261		



## A3-1-2 (続き) 沼沢火山カルデラ形成期 (沼沢湖火砕噴火) の本質物の全岩化学組成

Eruption name	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk
Eruption age	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka
Location	Nk-D	Nk-D	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E
Unit	II	II	III	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	III	III	III	IV	IV	IV
Sample name	07-28	07-29	07-30	07-33	07-43	07-44	07-45	07-46	07-47	07-48	07-49	07-50	08-24	07-32	07-34	07-35	07-35	07-35
Rock Type	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	GS	GS	GS	GS	GS	GS
Analyst	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi
(wt.%)																		
SiO <sub>2</sub>	59.42	60.70	58.05	59.85	58.41	58.64	59.77	59.08	58.28	61.57	59.89	59.63	56.51	57.16	57.51	56.48	56.48	56.48
TiO <sub>2</sub>	0.85	0.79	0.87	0.87	0.90	0.88	0.92	0.90	0.88	0.96	0.88	0.84	1.13	0.90	0.92	0.95	0.95	0.95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.74	17.39	18.12	17.49	18.00	18.01	16.45	16.76	17.74	15.72	16.84	16.93	17.81	18.73	18.53	18.64	18.64	18.64
FeO*	7.66	7.32	7.91	7.56	8.03	8.03	8.72	8.36	8.06	8.77	8.44	7.73	10.38	8.18	8.40	8.47	8.47	8.47
MnO	0.22	0.22	0.23	0.21	0.21	0.22	0.22	0.22	0.21	0.23	0.22	0.21	0.24	0.23	0.22	0.22	0.22	0.22
MgO	3.06	2.94	3.17	3.20	3.31	3.30	3.33	3.29	3.23	3.49	3.25	3.07	4.00	3.22	3.35	3.34	3.34	3.34
CaO	7.39	6.84	7.39	6.77	7.21	7.29	6.60	6.91	7.30	6.34	6.90	6.86	6.54	7.25	7.52	7.43	7.43	7.43
Na <sub>2</sub> O	3.38	3.35	3.34	3.44	3.22	3.28	3.27	3.29	3.26	3.25	3.32	3.31	2.85	3.06	3.11	3.05	3.05	3.05
K <sub>2</sub> O	0.75	0.97	0.65	0.97	0.87	0.86	0.88	0.84	0.78	0.95	0.85	0.98	0.70	0.75	0.70	0.69	0.69	0.69
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.34	0.28	0.37	0.24	0.23	0.24	0.29	0.27	0.26	0.28	0.29	0.24	0.23	0.23	0.25	0.24	0.24	0.24
Total	100.82	100.79	100.10	100.60	100.39	100.76	100.43	99.93	100.00	101.56	100.85	99.78	100.39	99.71	100.51	99.52	99.52	99.52
FeO*/MgO	2.50	2.49	2.49	2.36	2.43	2.44	2.62	2.54	2.50	2.52	2.60	2.52	2.59	2.54	2.51	2.53	2.53	2.53
LOI (%)	0.38	0.55	0.48	1.07	0.83	0.72	0.69	0.37	0.59	0.51	0.39	0.30	-	1.05	0.64	0.75	0.75	0.75
(ppm)																		
Rb	13	20	10	22	17	17	16	16	16	17	15	19	14	14	12	14	14	14
Sr	512	474	510	446	488	507	415	441	521	425	461	455	457	488	507	506	506	506
Nb	3	3	3	4	3	3	2	3	3	4	3	3	3	3	3	2	2	2
Y	29	29	29	29	29	30	29	28	30	31	30	30	31	27	30	28	28	28
Zr	102	106	102	110	105	108	104	101	111	110	103	102	125	110	107	109	109	109
V	91	94	87	109	100	103	107	100	108	99	92	99	110	104	100	106	106	106
Ba	250	317	228	329	427	406	311	293	360	302	287	310	542	469	418	470	470	470

A3-1-2 (続き) 沼沢火山カルデラ形成期 (沼沢湖火砕噴火) の本質物の全岩化学組成

Eruption name	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk
Eruption age	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka
Location	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E
Unit	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
Sample name	07-36	07-37	07-38	07-39	07-40	07-41	07-42	07-43	07-44
Rock Type	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS
Analyst	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi
(wt.%)									
SiO <sub>2</sub>	57.61	56.39	59.50	58.23	59.49	59.13	59.48		
TiO <sub>2</sub>	0.93	0.98	0.87	0.88	0.84	0.91	0.86		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.43	18.89	17.10	18.07	17.06	16.49	16.96		
FeO*	8.49	8.96	7.96	8.14	7.78	8.28	7.92		
MnO	0.22	0.22	0.21	0.22	0.21	0.22	0.21		
MgO	3.39	3.50	3.14	3.27	3.17	3.15	3.18		
CaO	7.52	7.31	7.03	7.39	7.07	6.50	7.01		
Na <sub>2</sub> O	3.09	2.93	3.29	3.21	3.30	3.22	3.23		
K <sub>2</sub> O	0.74	0.67	0.92	0.77	0.93	0.98	0.88		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.25	0.23	0.25	0.25	0.26	0.22	0.24		
Total	100.66	100.07	100.28	100.42	100.11	99.10	99.97		
FeO*/MgO	2.51	2.56	2.53	2.49	2.46	2.63	2.49		
LOI (%)	0.67	1.09	0.23	0.46	0.17	0.44	0.19		
(ppm)									
Rb	14	15	19	15	17	21	17		
Sr	504	526	469	498	473	444	457		
Nb	3	3	3	3	3	4	3		
Y	30	29	29	29	29	29	29		
Zr	111	117	102	105	104	111	105		
V	99	106	101	95	98	105	94		
Ba	421	454	295	356	310	379	314		

## A3-2-1 沼沢火山先カルテラ期の本質物・溶岩の全岩化学組成 (微量成分および Sr・Nd 同位体組成)

Eruption age (ka)	71 ka	71 ka	53 ka	53 ka	43 ka	43 ka	43 ka	24 ka	24 ka	24 ka
Eruption name	Mk	Mk	Mz	Mz	Sz	Sz	Sz	Me	Me	Me
Rock type	Lava	Lava	Pumice	Pumice	Lava	Lava	Enclave	Lava	Lava	Enclave
Sample name	Mk06-1	Mk12-5	Mz02-1	Mz12-1	Mz02-6	Sz06-2	Sz06-2	Me12-2	Me12-5	Me12-6
Location	MK-W	MK-W	Mz-A	Mz-B	Mz-A	Sz-A	Sz-A	Me-A	Me-A	Me-A
(ppm)										
Sc	9	10	12	11	13	15	35	14	14	28
Be	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
V	33	39	59	59	94	82	159	102	81	158
Cr	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Co	3	3	4	5	6	7	18	9	8	19
Ni	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Cu	20	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	10
Zn	50	50	40	40	40	50	110	50	50	100
Ga	13	15	13	14	14	14	18	14	13	16
Ge	2.2	2.5	2.4	2.2	2.2	2.1	2.5	1.9	2	2.3
As	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Rb	50	43	43	43	44	37	13	35	35	20
Sr	228	242	280	273	282	281	347	328	317	385
Y	22.3	23	23.9	23.3	24	23.6	44.2	20.6	20.1	32.5
Zr	96	99	91	83	85	83	37	87	89	49
Nb	3.5	3.8	2.7	2.7	2.8	2.5	2.7	2	1.9	2.1
Mo	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Ag	0.8	0.6	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
In	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Sn	1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Sb	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Cs	2	1.7	1.7	1.8	1.7	1.1	0.7	1.1	1.1	1.3
Ba	701	850	588	572	570	540	299	500	505	334
La	13.3	13.4	14.1	13.9	13.6	13.4	12.2	13.3	13.1	11.9
Ce	28.5	33.4	28.8	29.5	27.9	27.5	29.7	27.9	27	27.7
Pr	3.55	3.28	3.6	3.56	3.44	3.4	4.39	3.39	3.35	3.93
Nd	14.3	12.3	14.4	13.8	14	13.7	20.9	13.7	13.2	17.7
Sm	3.29	3.11	3.43	3.35	3.48	3.31	6.1	3.19	3.11	4.8
Eu	0.865	0.912	0.918	0.912	0.972	0.946	1.54	0.991	0.932	1.52
Gd	3.2	3.13	3.59	3.4	3.48	3.57	6.48	3.27	3.16	5.16
Tb	0.57	0.63	0.63	0.64	0.63	0.65	1.21	0.58	0.58	0.92
Dy	3.52	3.88	4.05	3.82	3.97	3.98	7.45	3.48	3.42	5.42
Ho	0.77	0.86	0.86	0.85	0.87	0.84	1.6	0.75	0.71	1.16
Er	2.3	2.64	2.6	2.48	2.58	2.59	4.78	2.26	2.18	3.52
Tm	0.411	0.453	0.445	0.399	0.415	0.408	0.774	0.35	0.346	0.54
Yb	2.64	3.07	2.88	2.76	2.96	2.85	5.03	2.48	2.34	3.69
Lu	0.414	0.452	0.451	0.449	0.434	0.44	0.808	0.383	0.382	0.532
Hf	2.4	2.8	2.6	2.3	2.5	2.3	1.4	2.4	2.4	1.6
Ta	0.44	0.32	0.25	0.23	0.3	0.31	0.17	0.19	0.29	0.15
W	< 0.5	2.3	0.6	2.1	< 0.5	< 0.5	0.7	< 0.5	< 0.5	0.7
Tl	0.3	0.53	0.42	0.38	0.28	0.15	0.09	0.08	< 0.05	< 0.05
Pb	12	11	9	9	9	8	< 5	7	7	7
Bi	0.2	0.1	0.2	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Th	4.86	5.56	4.46	4.76	4.43	4.15	2.89	4.19	4.02	2.32
U	1.82	2.01	1.63	1.69	1.44	1.37	1.01	1.46	1.23	0.75
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	0.703904	0.703898	0.703877	0.703884	0.703853	0.703850	0.703862	0.703960	0.703955	0.703976
2 sigma	7.0E-06	8.4E-06	9.9E-06	8.6E-06	7.7E-06	6.9E-06	8.4E-06	9.4E-06	9.5E-06	8.4E-06
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	0.512858	0.512862	0.512851	0.512860	0.512859	0.512860	0.512859	0.512863	0.512843	0.512862
2 sigma	4.3E-06	7.0E-06	4.8E-06	4.9E-06	6.1E-06	5.5E-06	6.0E-06	4.3E-06	5.7E-06	9.4E-06

## A3-2-2 沼沢火山カルテラ形成期（沼沢湖火砕噴火）の本質物・溶岩の全岩化学組成（微量成分および Sr・Nd 同位体組成）

Eruption age (ka)	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka
Eruption name	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk
Rock type	WP	WP	PpP	PrP	PrP	PrP	BS	BS	GS	GS
Sample name	DIWP	08-01	12-02	12-11	13-01	13-02	07-28	08-20	13-03	13-04
Location	Nk-A	Nk-C	Nk-F	Nk-H	Nk-F	Nk-F	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E
(ppm)										
Sc	15	13	15	26	22	17	18	18	22	20
Be	1	1	1	1	1	1	1	< 1	< 1	< 1
V	104	97	87	137	134	163	88	89	109	107
Cr	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Co	8	8	7	10	14	15	8	8	12	12
Ni	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Cu	< 10	10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Zn	60	80	60	80	60	80	60	70	200	180
Ga	14	13	14	15	14	16	14	14	15	15
Ge	2.1	1.7	2.1	2.1	2.1	2.1	2	1.9	1.7	2
As	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Rb	35	41	31	32	32	24	11	11	10	11
Sr	304	296	372	346	335	406	495	502	519	491
Y	20.7	18.4	23.5	30.8	30.1	18	25.7	26.6	24.5	25.3
Zr	89	99	90	66	70	52	83	82	93	93
Nb	1.9	2.4	1.8	2	1.9	1.9	1.1	1.2	1.3	1.5
Mo	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Ag	< 0.5	0.8	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
In	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Sn	< 1	2	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Sb	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Cs	1.5	1.6	1.3	1.4	1.4	1	0.6	0.6	0.5	0.6
Ba	484	522	435	447	459	367	247	239	491	439
La	13.3	11.2	12.8	11.5	13.7	10.6	10.1	10.2	9.74	10.4
Ce	27.9	23.1	27.4	28.3	32.9	23.4	24.3	24.7	21.3	22.7
Pr	3.41	2.86	3.51	3.67	4.15	2.72	3.47	3.52	3.6	3.61
Nd	13.6	11.5	14.7	16.2	18	11.2	15.5	16.3	16.3	16.7
Sm	3.39	2.68	3.6	4.77	4.76	2.67	4.13	4.55	4.52	4.6
Eu	0.953	0.882	1.1	1.35	1.35	1.01	1.38	1.42	1.47	1.45
Gd	3.32	2.61	3.77	5.13	4.92	2.89	4.44	4.76	4.38	4.46
Tb	0.57	0.45	0.62	0.9	0.87	0.52	0.74	0.78	0.75	0.77
Dy	3.68	2.89	3.97	5.65	5.38	3.21	4.58	4.71	4.59	4.85
Ho	0.76	0.62	0.84	1.19	1.11	0.66	0.98	0.97	0.95	1
Er	2.29	1.81	2.5	3.48	3.28	2.04	2.89	2.89	2.74	2.86
Tm	0.358	0.294	0.384	0.526	0.505	0.302	0.427	0.436	0.395	0.423
Yb	2.57	2.09	2.69	3.46	3.29	2.17	2.77	2.9	2.66	2.78
Lu	0.392	0.344	0.42	0.51	0.522	0.334	0.416	0.444	0.406	0.424
Hf	2.5	2.5	2.4	2.1	2	1.6	2.2	2.3	2.5	2.5
Ta	0.21	0.26	0.16	0.14	0.17	0.15	0.06	0.15	0.1	0.16
W	8.2	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	1.6	< 0.5	< 0.5	7.6	< 0.5
Tl	0.16	0.21	0.15	0.12	0.13	0.12	0.09	0.09	0.09	0.1
Pb	9	12	9	11	8	8	6	6	9	9
Bi	< 0.1	0.1	< 0.1	0.1	< 0.1	< 0.1	0.1	0.3	0.1	0.1
Th	4.34	4.37	3.49	3.78	3.87	2.91	1.22	1.18	2.16	2.08
U	1.45	1.5	1.2	1.33	1.29	0.99	0.47	0.46	0.64	0.64
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	0.703922	0.703929	0.703943	0.703909	0.703940	0.703909	0.703881	0.703848	0.704033	0.704013
2 sigma	8.6E-06	8.5E-06	8.2E-06	9.4E-06	1.0E-05	9.0E-06	1.0E-05	8.6E-06	9.4E-06	9.5E-06
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	0.512843	0.512854	0.512848	0.512865	0.512873	0.512841	0.512864	0.512857	0.512863	0.512852
2 sigma	6.9E-06	6.1E-06	3.2E-06	5.7E-06	4.1E-06	6.0E-06	3.1E-06	6.1E-06	7.5E-06	5.9E-06

A3-3 沼沢火山カルデラ形成期 (沼沢湖火砕噴火) の本質軽石の石基ガラス組成

Eruption name	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk
Eruption age	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka
Location	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F
Unit	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Sample name	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP
Rock Type	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP
Analyst	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi
(wt.%)																	
SiO <sub>2</sub>	75.45	75.75	74.59	76.25	75.84	76.03	76.31	75.92	76.28	76.43	74.26	74.41	75.39	74.84	76.08	75.38	
TiO <sub>2</sub>	0.20	0.18	0.20	0.23	0.20	0.28	0.18	0.26	0.17	0.23	0.19	0.23	0.27	0.22	0.19	0.21	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.61	11.48	11.41	11.63	11.45	11.45	11.61	11.58	11.69	11.65	11.57	11.39	11.51	11.46	11.74	11.42	
FeO*	1.08	1.03	1.07	1.35	1.12	1.16	1.07	1.10	1.17	1.10	1.20	1.15	1.20	1.11	1.15	1.14	
MnO	0.06	0.06	0.05	0.07	0.08	0.09	0.06	0.04	0.08	0.06	0.07	0.08	0.08	0.05	0.08	0.05	
MgO	0.19	0.20	0.20	0.16	0.19	0.22	0.21	0.22	0.18	0.22	0.22	0.25	0.23	0.24	0.25	0.24	
CaO	1.36	1.27	1.29	1.33	1.35	1.31	1.30	1.35	1.26	1.27	1.49	1.41	1.41	1.42	1.48	1.40	
Na <sub>2</sub> O	3.39	3.38	3.44	3.37	3.47	3.32	3.29	3.32	3.39	3.30	3.37	3.54	3.34	3.37	3.40	3.23	
K <sub>2</sub> O	3.39	3.52	3.46	3.52	3.52	3.45	3.54	3.55	3.57	3.46	2.84	2.58	3.11	3.09	3.16	3.17	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.00	0.00	0.02	0.02	0.07	0.03	0.00	0.05	0.00	0.03	0.00	0.12	0.05	0.01	0.00	
Total	96.78	96.88	95.72	97.92	97.23	97.37	97.59	97.33	97.84	97.70	95.23	95.03	96.66	95.85	97.54	96.23	

A3-3 (続き) 沼沢火山カルデラ形成期 (沼沢湖火砕噴火) の本質軽石の石基ガラス組成

Eruption name	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk
Eruption age	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka
Location	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F
Unit	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Sample name	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02
Rock Type	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP
Analyst	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi	Masubuchi
(wt.%)																	
SiO <sub>2</sub>	74.88	73.69	75.71	73.97	74.45	77.11	77.23	75.54	74.85	74.49	74.43	74.91	75.10	75.28	76.08	75.38	
TiO <sub>2</sub>	0.34	0.27	0.19	0.27	0.18	0.24	0.28	0.16	0.11	0.19	0.16	0.21	0.13	0.19	0.19	0.21	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.34	11.79	12.85	11.88	11.34	11.69	11.85	11.48	11.56	12.02	11.77	11.97	11.89	11.88	11.74	11.42	
FeO*	1.70	1.46	1.48	1.66	0.97	1.11	1.11	1.12	1.13	0.98	1.05	1.08	1.07	1.07	1.15	1.14	
MnO	0.08	0.08	0.10	0.08	0.05	0.05	0.04	0.11	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	0.06	0.08	0.05	
MgO	0.31	0.36	0.38	0.39	0.20	0.20	0.19	0.20	0.21	0.19	0.20	0.17	0.20	0.19	0.25	0.24	
CaO	2.26	1.89	1.95	2.03	1.22	1.24	1.23	1.20	1.22	1.19	0.88	1.14	1.24	1.21	1.48	1.40	
Na <sub>2</sub> O	3.58	3.54	3.55	3.61	3.19	3.35	3.42	3.36	3.24	3.27	3.38	3.17	3.32	3.30	3.40	3.23	
K <sub>2</sub> O	2.83	2.76	2.73	2.56	3.62	3.73	3.63	3.52	3.55	3.16	3.22	3.12	3.14	3.21	3.16	3.17	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.08	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	
Total	98.37	95.83	98.93	96.45	95.28	98.71	98.98	96.77	95.94	95.55	95.17	95.82	96.18	96.38	97.54	96.23	

## Appendix 4 鉍物化学組成

A4-1 斜長石

A4-2 ホルンブレンド

A4-3 斜方輝石

A4-4 Fe-Ti 酸化鉍物





## A4-1-1 (続き) 沼沢火山先カルテラ期の本質物・溶岩の斜長石化学組成

Eruption name	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	Mk	
Eruption age	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	71 ka	
Location	Mk-W	Mk-W	Mk-W	Mk-W	Mk-W	Mk-W	Mk-W	Mk-W	Mk-W	Mk-W	Mk-W	Mk-W	Mk-W	Mk-W	Mk-W	Mk-W	Mk-W	Mk-W	Mk-W	
Sample name	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	Mk12- $\frac{5}{5}$	
Rock type	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	
core / rim	core	core	core	core	core	core	core	core	core	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	
(wt. %)																				
SiO <sub>2</sub>	52.68	50.13	57.86	54.92	60.56	53.17	60.20	60.89	60.53	60.47	60.61	59.64	60.15	59.70	60.12	60.22	60.16	59.99	60.11	61.25
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.03	0.06	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.04	0.01	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30.44	31.68	26.99	28.79	25.01	29.81	25.20	24.79	25.08	25.20	24.93	25.33	25.58	25.19	25.36	25.13	25.14	25.41	25.05	24.70
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.01	0.02	0.02	0.05	0.00	0.01	0.00	0.04	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.04	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	0.19	0.18	0.17	0.16	0.18	0.22	0.15	0.20	0.17	0.19	0.21	0.19	0.20	0.18	0.17	0.20	0.13	0.22	0.13	0.17
MnO	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.03	0.00	0.02	0.00	0.03	0.02	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.01	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
CaO	13.10	14.91	9.06	11.31	6.76	12.53	7.23	6.67	6.91	7.06	6.77	7.39	7.56	7.32	7.25	6.92	7.02	7.20	6.91	6.54
Na <sub>2</sub> O	3.95	2.92	6.03	4.91	7.23	4.21	7.12	7.35	7.23	7.09	7.34	6.94	6.87	7.02	7.16	7.14	7.10	6.96	7.19	7.41
K <sub>2</sub> O	0.11	0.06	0.25	0.18	0.38	0.13	0.36	0.39	0.41	0.37	0.40	0.37	0.33	0.42	0.36	0.37	0.37	0.42	0.37	0.42
Total	100.47	99.94	100.44	100.28	100.18	100.15	100.31	100.33	100.39	100.48	100.30	99.92	100.71	99.86	100.50	100.09	100.00	100.20	99.78	100.50
O basis																				
Si	2.378	2.287	2.580	2.470	2.690	2.405	2.676	2.702	2.685	2.681	2.692	2.663	2.663	2.668	2.668	2.680	2.680	2.669	2.683	2.711
Ti	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
Al	1.619	1.703	1.418	1.526	1.309	1.589	1.320	1.296	1.311	1.317	1.305	1.333	1.335	1.326	1.326	1.318	1.320	1.332	1.317	1.288
Cr	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	0.007	0.007	0.006	0.006	0.007	0.008	0.006	0.007	0.006	0.007	0.008	0.007	0.007	0.007	0.006	0.007	0.005	0.008	0.005	0.006
Mn	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.633	0.729	0.433	0.545	0.322	0.607	0.344	0.317	0.328	0.335	0.322	0.354	0.359	0.350	0.344	0.330	0.335	0.343	0.330	0.310
Na	0.345	0.258	0.521	0.428	0.623	0.369	0.614	0.632	0.622	0.609	0.631	0.600	0.590	0.608	0.616	0.616	0.613	0.600	0.622	0.636
K	0.007	0.003	0.014	0.010	0.021	0.008	0.021	0.022	0.023	0.021	0.023	0.021	0.019	0.024	0.021	0.021	0.021	0.024	0.021	0.024
W	0.992	1.000	0.977	0.990	0.975	0.994	0.986	0.980	0.982	0.976	0.985	0.985	0.975	0.990	0.990	0.977	0.977	0.976	0.979	0.976
Z	3.996	3.991	3.998	3.995	3.999	3.994	3.995	3.998	3.996	3.998	3.996	3.996	3.998	3.994	3.994	3.997	3.999	4.002	4.001	3.999
Total	4.989	4.990	4.975	4.985	4.974	4.989	4.981	4.977	4.978	4.975	4.981	4.980	4.973	4.983	4.984	4.975	4.976	4.977	4.980	4.975
An (mol. %)	64.3	73.6	44.7	55.4	33.3	61.7	35.2	32.6	33.7	34.7	33.0	36.3	37.1	35.7	35.1	34.1	34.5	35.5	33.9	32.0



## A4-1-1 (続き) 沼沢火山先カルテラ期の本質物・溶岩の斜長石化学組成

Eruption name	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz	Sz
Eruption age	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka	43 ka
Location	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A	Sz-A
Sample name	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6	Sz21-6
Rock type	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava
core / rim	core	core	core	core	core	core	core	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim
	core		rim		core		rim		core		rim		core		rim		core		rim	
(wt. %)																				
SiO <sub>2</sub>	56.10	57.65	46.40	56.06	57.31	55.00	57.27	55.33	54.67	58.00	52.57	50.22	57.69	53.13	56.78	47.58	53.37	56.97	55.19	53.62
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.01	0.00	0.01	0.04	0.11	0.04	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.02	0.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.95	26.35	34.11	27.61	26.91	28.53	26.56	28.05	28.72	26.44	29.80	30.73	26.06	29.34	26.60	32.45	28.58	26.14	27.53	27.83
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.00	0.00
FeO	0.23	0.18	0.25	0.25	0.22	0.40	0.27	0.42	0.38	0.23	0.27	0.49	0.23	0.27	0.20	0.92	0.44	0.19	0.37	0.41
MnO	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.03	0.01	0.02	0.00	0.03	0.02	0.01	0.02	0.00
MgO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.34	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.02	0.01	0.03
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
CaO	10.09	8.65	17.58	9.90	9.18	10.33	8.29	10.31	10.88	8.31	12.04	13.40	8.18	11.70	8.77	15.43	11.60	8.54	9.93	10.92
Na <sub>2</sub> O	5.50	6.40	1.40	5.44	6.00	5.05	6.18	5.17	4.90	6.25	4.12	3.20	6.33	4.39	5.92	2.22	4.44	6.15	5.25	4.94
K <sub>2</sub> O	0.25	0.38	0.04	0.28	0.32	0.31	0.45	0.32	0.19	0.38	0.16	0.32	0.34	0.15	0.33	0.07	0.21	0.42	0.43	0.33
Total	100.13	99.66	99.81	99.58	99.96	99.69	99.07	99.63	99.82	99.64	99.02	98.85	98.91	99.01	98.61	98.78	98.71	98.48	98.76	98.16
O basis																				
Si	2.520	2.594	2.139	2.530	2.572	2.486	2.590	2.503	2.470	2.604	2.401	2.316	2.609	2.426	2.580	2.211	2.446	2.592	2.517	2.471
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.001	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.001	0.002
Al	1.479	1.397	1.853	1.469	1.423	1.519	1.415	1.495	1.529	1.399	1.604	1.670	1.389	1.578	1.424	1.777	1.543	1.401	1.480	1.511
Cr	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000
Fe	0.009	0.007	0.010	0.010	0.008	0.015	0.010	0.016	0.014	0.009	0.010	0.019	0.009	0.010	0.008	0.036	0.017	0.007	0.014	0.016
Mn	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000
Mg	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.024	0.001	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Ca	0.485	0.417	0.868	0.479	0.441	0.500	0.402	0.499	0.526	0.400	0.589	0.661	0.396	0.572	0.427	0.768	0.569	0.416	0.485	0.539
Na	0.478	0.558	0.125	0.475	0.522	0.442	0.541	0.453	0.429	0.544	0.365	0.286	0.555	0.388	0.521	0.200	0.394	0.542	0.464	0.441
K	0.014	0.022	0.002	0.016	0.018	0.018	0.026	0.019	0.011	0.022	0.009	0.019	0.019	0.009	0.019	0.004	0.012	0.024	0.025	0.020
W	0.988	1.005	1.006	0.981	0.991	0.978	0.981	0.989	0.984	0.976	0.976	1.014	0.983	0.980	0.974	1.012	0.996	0.993	0.991	1.020
Z	3.999	3.991	3.992	3.999	3.996	4.005	4.005	3.997	3.998	4.003	4.006	3.985	3.998	4.004	4.004	3.988	3.989	3.994	3.997	3.982
Total	4.986	4.996	4.998	4.980	4.987	4.983	4.986	4.986	4.982	4.979	4.982	4.999	4.981	4.984	4.978	5.000	4.985	4.987	4.988	5.002
An (mol. %)	49.6	41.8	87.2	49.3	44.9	52.1	41.5	51.4	54.5	41.4	61.2	68.5	40.8	59.0	44.1	79.0	58.4	42.4	49.8	53.9

## A4-1-1 (続き) 沼沢火山先カルテラ期の本質物・溶岩の斜長石化学組成

Eruption name	Me		Me		Me		Me		Me		Me		Me		Me		Me		Me	
	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim
Eruption age	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka	23 ka
Location	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A	Me-A
Sample name	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4	Me12-4
Rock type	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava	Lava
core / rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim
(wt. %)																				
SiO <sub>2</sub>	56.49	56.84	55.49	56.50	49.58	53.82	56.83	56.88	55.18	52.23	51.01	50.70	51.67	47.47	51.73	54.61	51.44	53.37	49.30	55.51
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.03	0.02	0.04	0.03	0.05	0.02	0.00	0.13	0.06	0.00	0.01	0.03	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.37	26.25	27.43	26.54	31.56	28.33	26.47	26.29	26.68	29.01	30.09	30.27	29.79	32.38	27.66	27.57	29.37	28.81	31.32	27.16
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	0.23	0.33	0.27	0.24	0.35	0.48	0.28	0.30	0.39	0.75	0.54	0.76	0.68	0.69	1.68	0.75	0.56	0.54	0.66	0.46
MnO	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.05	0.01	0.00	0.01	0.05	0.02	0.01	0.07	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01
MgO	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.04	0.01	0.02	0.01	0.03	1.21	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
NiO	0.03	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	8.93	9.07	9.89	8.72	14.15	11.08	8.91	8.64	9.73	12.04	13.43	13.23	12.80	15.86	12.98	10.45	12.62	11.81	14.53	9.94
Na <sub>2</sub> O	5.72	5.65	5.28	5.88	2.84	4.71	5.77	5.84	5.45	4.05	3.48	3.47	3.68	1.96	3.52	5.19	3.90	4.38	2.83	5.34
K <sub>2</sub> O	0.52	0.53	0.40	0.47	0.16	0.33	0.55	0.56	0.44	0.27	0.22	0.20	0.25	0.08	0.20	0.34	0.24	0.33	0.15	0.44
Total	98.33	98.76	98.81	98.40	98.68	98.80	98.82	98.63	97.96	98.44	98.83	98.77	98.91	98.49	99.19	99.03	98.15	99.25	98.84	98.85
O basis																				
Si	2.578	2.584	2.526	2.576	2.289	2.463	2.581	2.588	2.537	2.408	2.350	2.339	2.375	2.211	2.388	2.494	2.382	2.437	2.280	2.530
Ti	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000	0.004	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000
Al	1.418	1.406	1.471	1.426	1.717	1.528	1.416	1.409	1.445	1.576	1.633	1.646	1.613	1.777	1.505	1.484	1.603	1.550	1.707	1.459
Cr	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	0.009	0.012	0.010	0.009	0.014	0.018	0.011	0.011	0.015	0.029	0.021	0.029	0.026	0.027	0.065	0.029	0.022	0.021	0.025	0.017
Mn	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.003	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
Mg	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.001	0.002	0.083	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000
Ni	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.437	0.442	0.482	0.426	0.700	0.543	0.433	0.421	0.479	0.594	0.662	0.654	0.630	0.791	0.642	0.511	0.626	0.577	0.720	0.485
Na	0.506	0.498	0.466	0.520	0.254	0.417	0.508	0.515	0.485	0.362	0.311	0.310	0.328	0.177	0.315	0.460	0.350	0.388	0.254	0.471
K	0.030	0.031	0.023	0.027	0.009	0.019	0.032	0.033	0.026	0.016	0.013	0.012	0.015	0.005	0.012	0.020	0.014	0.019	0.009	0.025
W	0.984	0.986	0.984	0.984	0.978	1.000	0.984	0.985	1.009	1.006	1.010	1.010	1.001	1.003	1.124	1.024	1.012	1.005	1.010	1.000
Z	3.996	3.990	3.998	4.001	4.005	3.991	3.997	3.997	3.982	3.984	3.984	3.985	3.988	3.988	3.893	3.978	3.985	3.986	3.987	3.989
Total	4.980	4.976	4.982	4.985	4.984	4.990	4.981	4.981	4.992	4.990	4.993	4.996	4.989	4.991	5.017	5.002	4.998	4.992	4.997	4.989
An (mol. %)	44.9	45.5	49.7	43.8	72.7	55.5	44.6	43.5	48.4	61.1	67.2	67.0	64.8	81.3	66.3	51.6	63.2	58.7	73.3	49.4



## A4-1-2 (続き) 沼沢火山カルデラ形成期 (沼沢湖火砕噴火) の本質物の斜長石化学組成

eruption name	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	
eruption age	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	
location	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	
sample name	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	12-02	
Rock type	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	
core / rim	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	
(wt. %)																				
SiO <sub>2</sub>	51.86	50.06	58.88	56.33	56.99	52.54	57.89	57.28	52.46	55.78	56.73	59.33	59.19	57.71	51.08	50.76	56.07	56.80	52.54	51.34
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.05	0.03	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.04	0.00	0.02	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30.20	31.87	26.47	27.54	27.24	30.53	26.87	27.35	30.20	28.34	28.00	26.35	26.63	27.85	30.35	32.38	28.77	27.37	30.64	31.10
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
FeO	0.36	0.36	0.32	0.33	0.29	0.38	0.33	0.31	0.35	0.28	0.36	0.29	0.31	0.34	0.50	0.41	0.33	0.30	0.51	0.48
MnO	0.01	0.04	0.00	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
MgO	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.00	0.02	0.01	0.05	0.05
NiO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.02	0.04	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03
CaO	13.53	14.99	8.59	10.47	9.74	13.51	9.13	9.65	13.18	11.13	10.43	8.78	9.00	10.30	13.56	14.82	11.22	9.97	13.84	14.42
Na <sub>2</sub> O	3.66	2.71	6.17	5.42	5.85	3.71	6.07	5.69	3.77	5.22	5.31	6.34	6.08	5.41	3.43	2.61	5.14	5.80	3.56	3.24
K <sub>2</sub> O	0.14	0.06	0.26	0.18	0.20	0.11	0.25	0.24	0.12	0.18	0.16	0.25	0.26	0.18	0.07	0.06	0.17	0.19	0.09	0.07
Total	99.85	100.12	100.74	100.33	100.34	100.82	100.58	100.54	100.15	101.00	101.12	101.40	101.54	101.85	99.07	101.11	101.75	100.43	101.30	100.75
O basis																				
Si	2.361	2.281	2.613	2.528	2.552	2.367	2.581	2.557	2.377	2.492	2.524	2.619	2.610	2.545	2.345	2.287	2.486	2.543	2.359	2.323
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000
Al	1.620	1.711	1.384	1.456	1.438	1.621	1.411	1.439	1.613	1.492	1.468	1.371	1.383	1.447	1.642	1.719	1.503	1.444	1.621	1.658
Cr	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000
Fe	0.014	0.014	0.012	0.012	0.011	0.014	0.012	0.011	0.013	0.011	0.014	0.011	0.011	0.013	0.019	0.015	0.012	0.011	0.019	0.018
Mn	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.000	0.001	0.001	0.004
Ni	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
Ca	0.660	0.732	0.408	0.503	0.467	0.652	0.436	0.462	0.640	0.533	0.497	0.415	0.425	0.486	0.667	0.715	0.533	0.478	0.665	0.699
Na	0.323	0.239	0.531	0.471	0.507	0.323	0.524	0.492	0.331	0.452	0.458	0.542	0.519	0.462	0.305	0.228	0.441	0.503	0.310	0.284
K	0.008	0.003	0.015	0.010	0.011	0.007	0.014	0.014	0.007	0.010	0.009	0.014	0.015	0.010	0.004	0.004	0.009	0.011	0.005	0.004
W	1.008	0.992	0.968	1.000	0.999	0.998	0.989	0.980	0.994	1.008	0.982	0.985	0.974	0.973	1.000	0.964	0.999	1.004	1.005	1.010
Z	3.982	3.993	3.997	3.985	3.990	3.988	3.992	3.996	3.990	3.984	3.991	3.990	3.993	3.992	3.987	4.006	3.988	3.979	3.982	3.982
Total	4.990	4.984	4.966	4.985	4.988	4.987	4.981	4.976	4.984	4.992	4.974	4.975	4.967	4.965	4.987	4.970	4.987	4.991	4.985	4.992
An (mol. %)	66.6	75.1	42.8	51.1	47.4	66.4	44.8	47.7	65.4	53.6	51.5	42.7	44.3	50.8	68.3	75.6	54.2	48.2	67.8	70.8

A4-1-2 (続き) 沼沢火山カルデラ形成期 (沼沢湖火砕噴火) の本質物の斜長石化学組成

Eruption name	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	
Eruption age	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	
Location	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	
Sample name	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	
Rock type	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	
core / rim	core	core	core	core	core	core	core	core	core	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	rim	
(wt. %)																				
SiO <sub>2</sub>	51.15	51.23	50.01	49.57	50.27	49.37	51.09	49.97	49.30	51.32	57.36	50.94	56.62	57.31	56.73	55.86	56.29	54.86	57.66	56.69
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.06	0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.05	0.00	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.40	30.89	32.23	31.85	31.53	32.53	30.78	32.28	32.44	30.72	27.31	31.24	27.72	27.45	27.40	28.04	27.88	28.48	26.25	27.56
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.07	0.00	0.02	0.00
FeO	0.42	0.41	0.37	0.38	0.43	0.43	0.41	0.44	0.36	0.39	0.41	0.36	0.33	0.30	0.30	0.32	0.41	0.34	0.35	0.31
MnO	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.03	0.01	0.00	0.02	0.03	0.01
MgO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01
NiO	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	14.38	14.28	15.11	15.20	14.88	15.77	13.74	15.30	15.46	13.76	9.72	14.28	9.84	9.73	9.82	10.73	10.49	11.18	9.36	10.01
Na <sub>2</sub> O	3.28	3.43	2.77	2.75	2.95	2.57	3.60	2.69	2.51	3.67	5.92	3.41	5.59	5.81	5.85	5.30	5.54	5.13	5.57	5.51
K <sub>2</sub> O	0.09	0.10	0.07	0.07	0.12	0.05	0.13	0.08	0.05	0.11	0.23	0.10	0.22	0.24	0.22	0.20	0.20	0.18	0.46	0.22
Total	100.76	100.41	100.62	99.89	100.23	100.81	99.80	100.78	100.21	100.06	101.01	100.38	100.37	100.89	100.36	100.49	100.90	100.21	99.74	100.31
O basis																				
Si	2.314	2.326	2.270	2.268	2.291	2.242	2.332	2.266	2.249	2.335	2.554	2.314	2.536	2.552	2.542	2.506	2.514	2.473	2.594	2.540
Ti	0.001	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Al	1.674	1.653	1.723	1.717	1.693	1.741	1.655	1.725	1.744	1.647	1.433	1.672	1.463	1.440	1.447	1.482	1.467	1.513	1.391	1.455
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000
Fe	0.016	0.015	0.014	0.014	0.016	0.016	0.016	0.017	0.014	0.015	0.015	0.014	0.012	0.011	0.011	0.012	0.015	0.013	0.013	0.012
Mn	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000
Mg	0.001	0.001	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000	0.002	0.001
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.697	0.694	0.734	0.745	0.726	0.767	0.671	0.743	0.755	0.671	0.463	0.695	0.472	0.464	0.471	0.516	0.502	0.540	0.451	0.480
Na	0.287	0.302	0.244	0.244	0.261	0.226	0.318	0.237	0.222	0.324	0.511	0.300	0.485	0.501	0.508	0.460	0.479	0.448	0.485	0.478
K	0.005	0.006	0.004	0.004	0.007	0.003	0.007	0.005	0.003	0.006	0.013	0.006	0.012	0.014	0.013	0.011	0.012	0.011	0.026	0.013
W	1.007	1.020	0.999	1.010	1.013	1.016	1.015	1.002	0.998	1.019	1.005	1.017	0.984	0.992	1.005	1.001	1.012	1.013	0.980	0.983
Z	3.987	3.979	3.993	3.986	3.984	3.983	3.987	3.990	3.993	3.982	3.987	3.986	3.998	3.992	3.989	3.988	3.981	3.986	3.985	3.995
Total	4.994	4.999	4.991	4.996	4.997	4.999	5.002	4.993	4.990	5.001	4.992	5.003	4.982	4.985	4.995	4.989	4.993	4.999	4.965	4.978
An (mol. %)	70.5	69.3	74.8	75.0	73.1	77.0	67.4	75.5	77.0	67.0	46.9	69.4	48.7	47.4	47.5	52.2	50.6	54.1	46.9	49.4





## A4-1-2 (続き) 沼沢火山カルデラ形成期 (沼沢湖火砕噴火) の本質物の斜長石化学組成

Eruption name	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	
Eruption age	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	
Location	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	
Sample name	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	
Rock type	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	
core / rim	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	rim	rim	rim	rim	rim	rim	
(wt. %)																				
SiO <sub>2</sub>	52.45	50.32	52.80	55.85	49.72	52.30	52.93	52.17	50.27	57.04	57.36	53.07	53.71	55.96	56.61	57.43	58.00	57.11	55.77	55.81
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.02	0.02	0.08	0.00	0.01	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.03	0.03	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30.36	31.57	29.84	27.69	31.84	30.38	30.09	30.21	31.76	27.44	27.18	30.11	28.62	27.55	26.74	26.51	26.32	27.14	27.53	27.98
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.07	0.00
FeO	0.36	0.38	0.35	0.32	0.48	0.37	0.24	0.40	0.39	0.38	0.39	0.39	0.98	0.35	0.35	0.39	0.28	0.36	0.40	0.38
MnO	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.03	0.00	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
MgO	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.15	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
NiO	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.04	0.00	0.02	0.00
CaO	12.46	13.48	11.90	10.00	14.20	12.40	11.98	12.10	13.75	9.06	9.08	12.18	11.73	9.62	8.97	8.42	7.93	9.03	9.59	9.99
Na <sub>2</sub> O	3.61	2.88	3.93	5.16	2.57	3.64	3.84	3.62	2.84	5.34	5.40	3.71	3.82	5.24	5.45	5.78	6.11	5.43	5.21	4.89
K <sub>2</sub> O	0.12	0.10	0.13	0.20	0.06	0.11	0.16	0.13	0.08	0.21	0.24	0.14	0.12	0.25	0.23	0.23	0.33	0.24	0.23	0.18
Total	99.42	98.78	99.00	99.30	98.91	99.24	99.31	98.66	99.15	99.61	99.67	99.63	99.16	99.01	98.39	98.85	99.04	99.33	98.84	99.26
O basis																				
Si	2.386	2.312	2.409	2.526	2.287	2.383	2.407	2.389	2.303	2.562	2.575	2.406	2.449	2.537	2.575	2.596	2.615	2.572	2.532	2.523
Ti	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000
Al	1.627	1.709	1.604	1.476	1.726	1.631	1.612	1.631	1.715	1.452	1.437	1.608	1.538	1.471	1.433	1.412	1.399	1.440	1.473	1.491
Cr	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.002	0.000
Fe	0.014	0.015	0.013	0.012	0.018	0.014	0.009	0.015	0.015	0.014	0.014	0.015	0.038	0.013	0.013	0.015	0.011	0.014	0.015	0.014
Mn	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Mg	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.010	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001
Ni	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000
Ca	0.607	0.664	0.581	0.485	0.699	0.605	0.583	0.593	0.675	0.436	0.437	0.591	0.573	0.467	0.437	0.408	0.383	0.435	0.466	0.484
Na	0.318	0.257	0.348	0.452	0.229	0.322	0.339	0.321	0.252	0.465	0.470	0.326	0.337	0.460	0.481	0.506	0.534	0.473	0.458	0.428
K	0.007	0.006	0.007	0.012	0.004	0.007	0.010	0.007	0.005	0.012	0.014	0.008	0.007	0.015	0.013	0.013	0.019	0.014	0.013	0.010
W	0.949	0.942	0.952	0.964	0.952	0.950	0.943	0.939	0.949	0.933	0.936	0.942	0.966	0.957	0.946	0.946	0.949	0.938	0.957	0.938
Z	4.013	4.022	4.013	4.002	4.013	4.015	4.019	4.020	4.018	4.014	4.012	4.014	3.987	4.008	4.008	4.007	4.014	4.013	4.005	4.013
Total	4.962	4.964	4.965	4.966	4.965	4.965	4.962	4.959	4.967	4.947	4.948	4.956	4.953	4.965	4.955	4.953	4.963	4.950	4.962	4.951
An (mol. %)	65.1	71.7	62.1	51.1	75.1	64.8	62.6	64.4	72.4	47.8	47.4	63.9	62.4	49.6	46.9	44.0	40.9	47.2	49.7	52.4





A4-2-2 沼沢火山カルデラ形成期 (沼沢湖火砕噴火) の本質物の角閃石化学組成

Eruption name	Nk		Nk		Nk		Nk		Nk		Nk		Nk		Nk		Nk		Nk		Nk		Nk			
	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka		
Location	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F		
Sample name	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP		
Rock type	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP		
core / rim	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core		
(wt. %)																										
SiO <sub>2</sub>	49.56	46.84	51.32	48.00	48.75	48.84	49.64	47.75	48.60	49.76	50.05	50.16	50.76	46.92	47.20	49.19	47.05	49.17	47.99	49.89						
TiO <sub>2</sub>	1.24	1.77	0.91	1.46	1.23	1.17	0.97	1.40	1.26	1.18	0.99	0.79	0.94	1.67	1.38	1.31	1.77	0.94	0.88	1.12						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.26	9.14	5.69	8.18	7.27	6.97	6.55	8.16	7.71	6.58	7.18	7.00	6.52	8.76	6.62	7.52	8.88	7.47	7.75	6.82						
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.06	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00					
FeO	12.05	12.68	11.42	12.55	12.06	12.71	12.11	13.02	12.83	12.04	12.37	12.65	12.12	12.96	12.13	12.57	12.96	13.21	13.26	12.30						
MnO	0.46	0.46	0.54	0.49	0.47	0.48	0.58	0.49	0.55	0.47	0.64	0.68	0.59	0.46	0.42	0.46	0.48	0.99	0.92	0.47						
MgO	15.22	14.26	16.19	14.69	15.28	15.22	15.82	14.65	14.86	15.72	15.62	15.53	16.14	14.32	13.19	15.53	14.33	15.21	13.98	15.54						
NiO	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00					
CaO	10.96	10.54	10.78	10.80	10.78	11.00	10.60	10.81	10.80	10.86	10.67	10.46	10.44	10.98	10.54	11.13	10.84	10.17	9.90	10.96						
Na <sub>2</sub> O	1.38	1.88	1.07	1.64	1.39	1.37	1.22	1.49	1.46	1.23	1.36	1.32	1.25	1.75	1.20	1.56	1.65	1.38	1.35	1.40						
K <sub>2</sub> O	0.196	0.18	0.186	0.181	0.209	0.252	0.212	0.287	0.255	0.228	0.221	0.187	0.182	0.215	0.221	0.199	0.265	0.222	0.235	0.243						
Total	98.31	97.76	98.13	98.03	97.44	98.04	97.71	98.07	98.31	98.08	99.11	98.79	99.00	98.05	92.94	99.45	98.25	98.76	96.26	98.74						
O basis																										
Si	7.117	6.819	7.334	6.953	7.074	7.074	7.172	6.934	7.021	7.161	7.134	7.174	7.219	6.829	7.191	7.017	6.829	7.072	7.086	7.144						
Ti	0.134	0.193	0.097	0.159	0.135	0.127	0.106	0.153	0.137	0.128	0.106	0.085	0.100	0.183	0.158	0.140	0.193	0.102	0.097	0.121						
Al	1.228	1.567	0.959	1.397	1.244	1.190	1.115	1.396	1.313	1.116	1.206	1.180	1.093	1.503	1.188	1.263	1.518	1.266	1.348	1.150						
Cr	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.003	0.006	0.000	0.003	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000					
Fe	1.447	1.544	1.365	1.520	1.464	1.539	1.463	1.581	1.550	1.449	1.474	1.513	1.442	1.578	1.546	1.499	1.573	1.589	1.637	1.473						
Mn	0.056	0.057	0.065	0.060	0.058	0.058	0.070	0.061	0.067	0.057	0.077	0.082	0.071	0.057	0.054	0.056	0.059	0.120	0.115	0.057						
Ni	0.000	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000					
Mg	3.257	3.094	3.450	3.172	3.305	3.286	3.406	3.171	3.200	3.372	3.320	3.311	3.421	3.108	2.995	3.302	3.101	3.262	3.076	3.316						
Ca	1.687	1.644	1.651	1.676	1.677	1.707	1.641	1.682	1.671	1.675	1.630	1.602	1.590	1.712	1.721	1.701	1.685	1.567	1.567	1.681						
Na	0.385	0.530	0.298	0.461	0.391	0.384	0.343	0.419	0.408	0.342	0.376	0.366	0.345	0.494	0.354	0.430	0.465	0.386	0.387	0.389						
K	0.036	0.033	0.034	0.033	0.039	0.047	0.039	0.053	0.047	0.042	0.040	0.034	0.033	0.040	0.043	0.036	0.049	0.041	0.044	0.044						
Mg#	69.2	66.7	71.6	67.6	69.3	68.1	69.9	66.7	67.4	69.9	69.3	68.6	70.4	66.3	66.0	68.8	66.3	67.3	65.3	69.2						

## A4-2-2 (続き) 沼沢火山カルデラ形成期 (沼沢湖火砕噴火) の本質物の角閃石化学組成

Eruption name	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	
Eruption age	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	
Location	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	Nk-C	
Sample name	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	12-11	07-19	07-19	07-19	07-19	07-19	07-19	07-19	07-19	07-19	07-19	
Rock type	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	PrP	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	
core / rim	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	
(wt. %)																				
SiO <sub>2</sub>	46.29	47.14	45.90	47.28	47.96	48.23	46.71	47.52	47.18	46.84	43.26	43.74	49.52	47.47	48.85	47.99	43.97	43.85	49.44	49.22
TiO <sub>2</sub>	2.17	1.94	2.12	1.88	1.61	1.65	1.89	1.69	1.83	2.13	2.29	2.26	1.29	1.69	1.31	1.69	2.20	2.15	1.11	1.49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.87	8.71	9.38	8.27	7.71	7.88	8.81	8.28	8.41	8.83	12.29	11.88	6.64	8.38	7.07	7.41	12.01	12.08	6.71	6.87
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02
FeO	12.87	12.03	13.27	12.78	12.36	12.12	12.41	12.18	12.80	12.34	13.34	13.14	13.08	14.16	13.79	13.34	13.09	13.10	13.38	12.69
MnO	0.53	0.32	0.45	0.45	0.40	0.41	0.38	0.42	0.44	0.39	0.29	0.26	0.58	0.55	0.51	0.45	0.26	0.24	0.64	0.51
MgO	14.49	15.26	14.28	14.82	15.50	15.49	14.61	15.01	14.93	14.88	13.98	14.27	15.56	14.63	15.11	15.03	14.24	14.30	15.82	15.81
NiO	0.00	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.06	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01
CaO	11.16	11.34	11.29	11.34	11.06	11.42	11.09	11.32	11.18	11.10	10.28	10.32	9.94	9.82	9.96	10.26	10.16	10.40	9.85	10.10
Na <sub>2</sub> O	1.72	1.76	1.87	1.67	1.51	1.56	1.75	1.62	1.62	1.69	2.23	2.23	1.27	1.57	1.24	1.43	2.21	2.19	1.24	1.20
K <sub>2</sub> O	0.306	0.263	0.326	0.239	0.231	0.236	0.288	0.272	0.275	0.29	0.186	0.193	0.281	0.213	0.282	0.251	0.182	0.179	0.237	0.191
Total	98.40	98.76	98.91	98.72	98.38	98.98	97.98	98.32	98.65	98.51	98.16	98.35	98.16	98.53	98.14	97.85	98.34	98.53	98.43	98.11
O basis																				
Si	6.732	6.789	6.661	6.835	6.927	6.918	6.794	6.873	6.823	6.772	6.328	6.377	7.145	6.883	7.078	6.981	6.399	6.376	7.123	7.094
Ti	0.238	0.211	0.231	0.204	0.175	0.178	0.207	0.183	0.199	0.232	0.252	0.248	0.140	0.184	0.143	0.184	0.241	0.235	0.120	0.162
Al	1.520	1.478	1.605	1.410	1.313	1.333	1.511	1.412	1.434	1.504	2.119	2.042	1.129	1.432	1.207	1.271	2.059	2.070	1.139	1.167
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.003	0.000	0.004	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002
Fe	1.566	1.449	1.611	1.545	1.493	1.454	1.510	1.474	1.549	1.493	1.632	1.603	1.579	1.717	1.672	1.623	1.593	1.594	1.612	1.529
Mn	0.065	0.039	0.056	0.055	0.049	0.050	0.046	0.051	0.054	0.048	0.036	0.032	0.070	0.068	0.063	0.055	0.031	0.029	0.078	0.063
Ni	0.000	0.000	0.003	0.000	0.004	0.000	0.007	0.002	0.000	0.000	0.001	0.004	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.005	0.000	0.001
Mg	3.141	3.276	3.089	3.194	3.336	3.312	3.168	3.236	3.218	3.208	3.048	3.101	3.347	3.161	3.264	3.260	3.090	3.100	3.398	3.397
Ca	1.738	1.750	1.755	1.757	1.711	1.755	1.728	1.754	1.732	1.719	1.611	1.612	1.537	1.526	1.547	1.599	1.585	1.620	1.520	1.559
Na	0.486	0.491	0.526	0.467	0.424	0.433	0.494	0.454	0.453	0.474	0.632	0.629	0.355	0.441	0.349	0.404	0.624	0.617	0.347	0.335
K	0.057	0.048	0.060	0.044	0.043	0.043	0.053	0.050	0.051	0.053	0.035	0.036	0.052	0.039	0.052	0.047	0.034	0.033	0.044	0.035
Mg#	66.7	69.3	65.7	67.4	69.1	69.5	67.7	68.7	67.5	68.2	65.1	65.9	67.9	64.8	66.1	66.8	66.0	66.1	67.8	69.0

## A4-2-2 (続き) 沼沢火山カルデラ形成期 (沼沢湖火砕噴火) の本質物の角閃石化学組成

Eruption name	Nk		Nk		Nk		Nk		Nk		Nk		Nk	
	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka
Eruption age														
Location	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E
Sample name	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2	GS-2
Rock type	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS	GS
core / rim	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core
(wt. %)														
SiO <sub>2</sub>	54.83	48.95	49.12	49.19	42.95	48.76	47.66	47.28	43.47	47.68				
TiO <sub>2</sub>	0.06	1.35	1.43	1.05	2.21	1.61	1.38	1.99	2.46	1.27				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.66	6.98	6.48	6.93	12.43	6.87	6.99	8.16	11.42	8.48				
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00				
FeO	21.87	13.47	13.16	13.26	13.94	12.98	13.04	13.89	15.21	13.97				
MnO	1.53	0.50	0.47	0.78	0.27	0.46	0.50	0.41	0.51	0.61				
MgO	23.40	15.32	15.46	15.65	13.64	15.37	10.94	14.66	12.98	15.14				
NiO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
CaO	0.78	10.50	10.62	9.54	10.51	10.46	9.39	10.40	10.28	9.68				
Na <sub>2</sub> O	0.01	1.26	1.24	1.32	2.27	1.22	0.98	1.57	1.99	1.38				
K <sub>2</sub> O	0	0.329	0.248	0.26	0.202	0.298	0.339	0.289	0.256	0.233				
Total	103.12	98.69	98.23	98.00	98.42	98.02	91.26	98.64	98.59	98.43				
O basis														
Si	7.587	7.059	7.104	7.117	6.292	7.061	7.373	6.854	6.391	6.903				
Ti	0.006	0.146	0.155	0.114	0.243	0.175	0.161	0.217	0.272	0.138				
Al	0.108	1.186	1.104	1.182	2.145	1.173	1.274	1.395	1.979	1.446				
Cr	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000				
Fe	2.530	1.625	1.592	1.605	1.707	1.572	1.687	1.684	1.870	1.691				
Mn	0.179	0.061	0.058	0.095	0.033	0.057	0.066	0.050	0.064	0.075				
Ni	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				
Mg	4.826	3.294	3.334	3.375	2.978	3.319	2.524	3.168	2.845	3.267				
Ca	0.115	1.621	1.645	1.479	1.650	1.622	1.557	1.616	1.619	1.501				
Na	0.002	0.352	0.349	0.370	0.644	0.343	0.295	0.440	0.567	0.386				
K	0.000	0.061	0.046	0.048	0.038	0.055	0.067	0.053	0.048	0.043				
Mg#	65.6	67.0	67.7	67.8	63.6	67.9	59.9	65.3	60.3	65.9				













## A4-4-1 沼沢火山の本質物・溶岩の磁鉄鉱・チタン鉄鉱ペアの化学組成 (コア)

Eruption name	Sr	Sr	Mz	Mz	Mz	Mz	Mz	Mz	Mz	Mz	Mz	Mz	Mz	Mz	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	
Eruption age	110 ka	110 ka	53 ka	53 ka	53 ka	53 ka	53 ka	53 ka	53 ka	53 ka	53 ka	53 ka	53 ka	53 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	
Location	Sr-A	Sr-A	Mz-B	Mz-B	Mz-B	Mz-B	Mz-B	Mz-B	Mz-B	Mz-B	Mz-B	Mz-B	Mz-B	Mz-B	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	
Sample name	Sr12-1	Sr12-1	Mz12-1	Mz12-1	Mz12-1	Mz12-1	Mz12-1	Mz12-1	Mz12-1	Mz12-1	Mz12-1	Mz12-1	Mz12-1	Mz12-1	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	
Rock type	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	WP	WP	WP	WP	WP	WP	
Mgt / Ilm	Mgt	Ilm	Mgt	Ilm	Mgt	Ilm	Mgt	Ilm	Mgt	Ilm	Mgt	Ilm	Mgt	Ilm	Mgt	Ilm	Mgt	Ilm	Mgt	Ilm	
(wt. %)																					
SiO <sub>2</sub>	0.02	0.11	0.09	0.07	0.14	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.14	0.04	0.06	0.01	0.09	0.01	0.09	0.01	0.07	0.13
TiO <sub>2</sub>	4.68	36.75	4.95	37.22	4.91	36.80	4.83	36.26	4.82	36.56	5.80	37.21	5.88	37.73	5.94	37.73	5.94	37.73	5.94	36.98	36.98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.34	0.29	1.98	0.25	1.98	0.23	1.97	0.23	1.91	0.25	1.86	0.22	1.81	0.22	1.84	0.34	1.84	0.34	1.84	0.34	0.34
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.00	0.04	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.04	0.00	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.00	0.04	0.00	0.01	0.05
FeO	87.19	58.08	87.51	57.59	86.89	57.28	87.89	56.57	86.42	58.07	86.23	55.79	85.36	55.59	85.47	55.01	85.47	55.01	85.47	55.01	55.01
MnO	1.13	1.22	0.86	1.05	0.89	1.04	0.87	1.00	0.88	1.02	0.77	0.95	0.79	0.94	0.81	0.95	0.81	0.95	0.81	0.95	0.95
MgO	1.16	1.77	1.17	1.92	1.18	1.96	1.17	1.92	1.17	1.87	1.23	2.09	1.31	2.02	1.25	2.10	1.25	2.10	1.25	2.10	2.10
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.95	0.02	0.01	0.00	0.12	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
Total	96.56	98.21	96.61	98.11	95.99	97.46	96.82	97.05	95.40	97.82	95.98	96.39	95.26	96.52	95.38	95.56	95.38	95.56	95.38	95.56	95.56
FeO*	33.7	28.8	34.2	29.1	34.0	28.7	34.2	27.1	33.7	28.6	34.7	28.6	34.4	29.4	34.6	28.7	34.6	28.7	34.6	28.7	28.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	59.5	32.5	59.2	31.7	58.8	31.8	59.7	32.8	58.6	32.8	57.3	30.2	56.6	29.1	56.6	29.2	56.6	29.1	56.6	29.2	29.2
Recalculated total	102.5	101.5	102.5	101.3	101.9	100.6	102.8	100.3	101.3	101.1	101.7	99.4	100.9	99.4	101.0	98.5	101.0	99.4	101.0	98.5	98.5
X <sub>Usp</sub> *	0.132	0.140	0.140	0.139	0.135	0.135	0.137	0.137	0.137	0.164	0.164	0.167	0.167	0.169	0.169	0.169	0.169	0.167	0.169	0.169	0.169
X <sub>Ilm</sub> *	0.678	0.678	0.687	0.687	0.683	0.683	0.668	0.668	0.675	0.675	0.675	0.695	0.695	0.707	0.707	0.701	0.707	0.707	0.707	0.707	0.701

## A4-4-2 沼沢湖火砕噴火の本質物中の磁鉄鉱のコア組成

Eruption name	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk	Nk
Eruption age	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka	5.4 ka
Location	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-A	Nk-D	Nk-D	Nk-D	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-F	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H
Sample name	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP	DIWP
Rock type	WP	WP	WP	WP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PpP	PrP	PrP	PrP	PrP
(wt. %)																		
SiO <sub>2</sub>	0.05	0.06	0.06	0.04	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	0.04	0.06	0.06	0.06	0.04	0.08	0.06	0.06
TiO <sub>2</sub>	5.61	5.92	6.12	5.97	5.73	6.33	6.98	6.68	6.34	6.22	6.33	6.51	6.10	5.97	6.14	6.09	6.09	6.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.80	1.68	1.76	1.68	1.88	1.73	2.33	1.78	1.75	2.06	1.75	1.80	1.97	1.77	1.82	1.81	1.81	1.81
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.04	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03
FeO	80.76	81.74	77.45	79.31	79.42	85.53	83.96	85.39	85.11	84.30	84.71	84.37	84.76	84.99	84.99	85.21	85.21	85.21
MnO	0.75	0.71	0.77	0.78	0.72	0.79	0.85	0.78	0.81	0.61	0.78	0.81	0.69	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
MgO	1.18	1.21	1.22	1.17	1.23	1.35	1.47	1.38	1.37	1.99	1.44	1.47	1.67	1.29	1.29	1.27	1.27	1.27
CaO	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	90.20	91.33	87.37	88.96	89.08	95.80	95.66	96.06	95.46	95.29	95.05	95.05	95.25	94.87	95.11	95.27	95.27	95.27
FeO*	32.7	33.3	32.1	32.5	32.4	34.9	35.2	35.2	34.7	33.9	34.5	34.6	34.1	34.3	34.6	34.6	34.6	34.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	53.4	53.8	50.4	52.0	52.2	56.3	54.1	55.7	56.0	56.0	55.8	55.3	56.3	56.3	56.0	56.2	56.2	56.2
Recalculated total	95.6	96.7	92.4	94.2	94.3	101.4	101.6	101.6	101.1	100.9	100.6	100.6	100.9	100.5	100.7	100.9	100.9	100.9
X <sub>LSP</sub> *	0.169	0.175	0.190	0.181	0.175	0.178	0.200	0.187	0.178	0.173	0.178	0.184	0.171	0.169	0.174	0.173	0.173	0.173

## A4-4-2 (続き) 沼沢湖火砕噴火の本質物中の磁鉄鉱のコア組成

Eruption name	Nk		Nk		Nk		Nk		Nk		Nk		Nk		Nk		Nk	
	5.4 ka	12-12	5.4 ka	12-12	5.4 ka	12-12	5.4 ka	12-12	5.4 ka	12-12	5.4 ka	12-12	5.4 ka	12-12	5.4 ka	12-12	5.4 ka	12-12
Location	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-H	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E	Nk-E
Sample name	12-11	12-12	12-12	12-12	12-12	12-12	12-12	12-12	12-12	12-12	12-12	12-12	12-12	12-12	12-12	12-12	12-12	12-12
Rock type	PrP	PrP	PrP	PrP	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BS	GS
(wt. %)																		
SiO <sub>2</sub>	0.05	0.06	0.06	0.04	0.08	0.08	0.06	0.08	0.10	0.11	0.16	0.06	0.06	0.11	0.04	0.10	0.10	0.04
TiO <sub>2</sub>	6.15	5.92	6.12	5.97	5.73	5.90	6.32	7.18	6.29	7.05	5.38	5.38	6.68	5.11	6.58	5.40	5.40	5.40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.82	1.68	1.76	1.68	1.88	1.87	5.11	5.98	5.69	4.65	2.02	2.02	5.94	2.18	6.13	2.09	2.09	2.09
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0	0	0	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	85.31	81.74	77.45	79.31	79.42	83.65	79.04	76.89	79.03	78.71	83.34	78.94	78.94	84.23	77.65	84.38	84.38	84.38
MnO	0.81	0.71	0.77	0.78	0.72	0.83	0.36	0.43	0.42	0.48	0.77	0.77	0.36	0.73	0.39	0.74	0.74	0.74
MgO	1.28	1.21	1.22	1.17	1.23	1.37	3.01	3.55	2.64	2.56	1.22	1.22	3.31	1.17	3.51	1.21	1.21	1.21
CaO	0	0.01	0	0.01	0	0.01	0.06	0.09	0.05	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
Total	95.43	91.33	87.37	88.96	89.08	93.69	94.00	94.23	94.22	93.79	92.80	92.80	95.35	93.46	94.39	93.85	93.85	93.85
FeO*	34.7	33.3	32.1	32.5	32.4	33.7	32.6	32.6	33.3	33.6	33.3	33.3	34.3	35.5	31.4	36.9	36.9	36.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	56.3	53.8	50.4	52	52.2	55.5	51.6	49.2	50.9	50.1	55.6	55.6	50.0	54.8	51.1	53.8	53.8	53.8
Recalculated total	101.1	96.7	92.4	94.2	94.3	99.2	99.2	99.2	99.3	98.8	98.4	98.4	100.7	99.6	99.2	100.2	100.2	100.2
X <sub>Usp</sub> *	0.174	0.175	0.19	0.181	0.175	0.169	0.193	0.223	0.201	0.218	1.593	1.593	9.152	1.597	9.109	1.624	1.624	1.624

## Appendix 5 本論文に関する発表・研究助成

A5-1 公表論文

A5-2 学会発表

A5-3 研究助成

## A5-1 公表論文

\* 査読有り

\* 増渕佳子・石崎泰男・白井智仁・松本亜希子・宮坂瑞穂・中川光弘（2016）岩石学的にみた沼沢火山におけるマグマ溜りの長期的進化とカルデラ形成噴火の準備過程. 地質学雑誌, 122, 533-550

\* 増渕佳子・石崎泰男（2011）噴出物の構成物組成と本質物質の全岩及び鉱物組成から見た沼沢火山の BC3400 カルデラ形成噴火（沼沢湖噴火）のマグマ供給系. 地質学雑誌, 117, 357-376 ※ 2012 年度日本地質学会研究奨励賞受賞

\*Yasuo ISHIZAKI, Yoshiko MASUBUCHI, Yasuhiro AONO (2009) Two types of dacitic pumices from the caldera-forming eruption of Numazawa Volcano, NE Japan. J. Mineral. Petrol. Sci., 104, 356-373

増渕佳子・石崎泰男（2008）沼沢火山の BC3400 年カルデラ形成噴火（沼沢湖噴火）のマグマ溜り. 月刊地球, 号外 No.60, 176-186

## A5-2 学会発表

※ファーストのみ

増渕 佳子ほか（2014）沼沢火山におけるマグマ供給系の長期的進化（2）. 日本地質学会第 121 年学術大会（鹿児島大会）ポスター発表

増渕 佳子ほか（2013）沼沢火山におけるマグマ供給系の長期的進化. 日本火山学会 2013 年度秋季大会口頭発表

増渕 佳子・石崎 泰男（2012）沼沢火山 BC3400 沼沢湖噴火で噴出した 4 種類の本質軽石：カルデラ形成噴火を起こしたデイサイト質マグマ溜り内部の不均質性. 日本地質学会第 119 年学術大会（大阪大会）ポスター発表

増渕佳子・石崎泰男（2010）沼沢火山 BC3400 年カルデラ形成噴火のマグマ供給系—岩石組織・全岩および鉱物化学組成からの考察—. 日本地質学会第 117 年学術大会（富山大会）ポスター発表

増渕 佳子・石崎 泰男（2008）沼沢火山 BC3400 年カルデラ形成噴火（沼沢湖噴火）の推移. 日本火山学会 2008 年度秋季大会ポスター発表

増渕 佳子・石崎 泰男（2008）沼沢火山の BC3400 年カルデラ形成噴火（沼沢湖噴火）のマグマ溜り（その 2）. 日本地質学会第 115 年学術大会（秋田大会）ポスター発表

\*優秀ポスター賞受賞

増渕 佳子・石崎 泰男（2008）沼沢火山の BC3400 年カルデラ形成噴火（沼沢湖噴火）のマグマ溜り. 日本地球惑星科学連合 2008 年大会ポスター発表



---

増渕 佳子・石崎 泰男（2007）構成物組成の時間変化から見た沼沢湖噴火（BC3400 年）の推移. 日本地球惑星科学連合 2007 年大会ポスター発表

### A5-3 研究助成

平成 26 年度笹川科学研究助成（代表：増渕佳子）

「大規模火砕噴火を引き起こす珪長質マグマ溜りの成因とマグマ供給系の長期的進化－福島県沼沢火山の岩石学的研究から－」

平成 24 年度深田研究助成（代表：増渕佳子）

「岩石学的手法によるカルデラ形成噴火のマグマ溜りの内部構造と噴火開始条件の解明：沼沢湖噴火（BC3400）を例に」

