

甲G第 64 号証

甲B第662号証

平成 26 年度火山影響評価に係る知見の整備

成果報告書

平成 27 年 3 月

独立行政法人 産業技術総合研究所

2. 2 阿蘇カルデラの大規模噴火準備過程の詳細化

【実施内容】

阿蘇カルデラ約 27 万年前の活動開始以来、数万年の間隔をおいて 4 回の大規模火砕流噴火を起こしている。本研究では、大規模噴火の前兆を検出するために必要と思われる基礎的な知見を充実させるため、阿蘇カルデラ噴出物を対象とした地質調査を行ない、阿蘇火山で過去に発生した 4 回の大規模火砕流噴火直前の火山活動の実態を明らかにする。また、大規模火砕流噴火前の阿蘇のマグマ溜りの状態(化学組成、温度、圧力、大きさ)を、岩石学的な手法と地質学的手法の組み合わせによって、明らかにする。今年度は、特に最初の火砕流噴火である阿蘇 1 に先行した降下火砕物対象に火山ガラス・斑晶鉱物や包有物の化学組成分析を実施し、マグマ形成条件の検討を行った。

大規模噴火準備過程の詳細化を行うためには、以下の観点を明らかにする必要がある。

- (1) 大規模火砕流噴火の前兆噴火の詳細な層序と噴火様式・マグマ組成の変遷
- (2) 大規模噴火に移行した小規模噴火と、移行しなかった小規模噴火の比較検討
- (3) 大規模噴火自体の噴火推移
- (4) マグマ供給系の物理化学条件(組成・形状・物性・位置、等)の時間変化を考慮したモデル(図 2. 2-1)

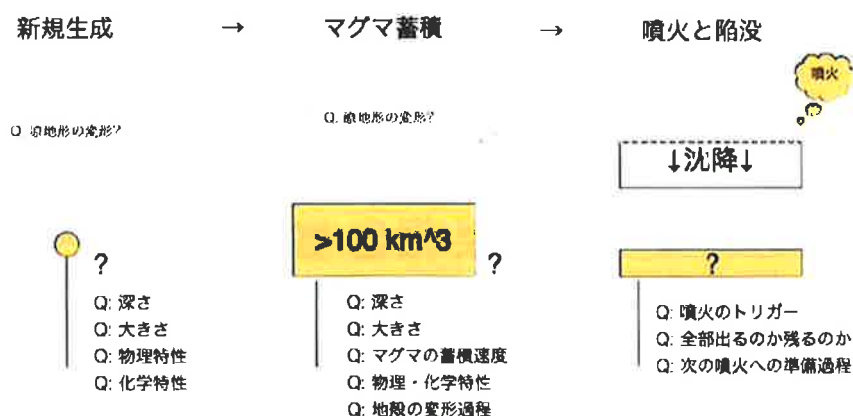


図 2. 2-1：大規模火砕流噴火に至るマグマ供給系の物理化学条件と表面現象の時間変化

このうち(4)のマグマ供給系の物理化学条件を明らかにする観点から、阿蘇-1 火砕流堆積物と、火砕流噴火の直前に放出された降下火砕物は、一連のカルデラ形成の初期条件の知見を得るうえで重要な位置付けにある。今年度は、阿蘇-1 噴火の準備過程をターゲットに、噴火前のマグマの温度・圧力・含水量環境を推定する目的で、全岩化学組成、鉱物・ガラス化学組成と微細組織の観察を行なった。

【研究成果】

試料

産総研(2014)による先カルデラ噴出物の地表踏査により、阿蘇カルデラ東壁の阿蘇-1 火砕流堆積物基底の模式的な層序が得られた。調査の結果、阿蘇-1 火砕流堆積物の噴出以前には 10 層以上の降下軽石層があり、黒色～暗灰色の火山灰層が挟まれていることが明らかになった。本報告で扱う先カルデラ噴出物の基底部は(試料番号 Aso2014a-B: 図 2. 2 の「B」)、産総研(2014)が報告した阿蘇-1 火砕流基底の降下火砕物層序のうち褐色土壌の直上を覆うとされる降下軽石層の底部から採取された。同様に Aso2014a-C は基底から約 40cm で Aso2014a-B を覆う暗色火山灰層より(図 2. 2 の「C」)、Aso2014a-D はそれを覆う降下軽石層より(図 2. 2 の「D」)、Aso2014a-E は基底から約 1 メートルにあって降下軽石と暗色火山灰の互層の最上部の火山灰層より(図 2. 2

の「E」), Aso2014a-A は阿蘇-1 火砕流堆積物基底部の非熔結部から採取された(図 2.2 の「A」).

産総研(2014)による大分県竹田市入田(阿蘇カルデラの東方)の地表調査により, 小野・他(1977)の模式層序に対応する, 阿蘇-3/2 間の降下軽石・降下火山灰試料が採取された. 本報告で全岩化学組成を検討する試料(試料番号 Aso2014d-A, Aso2014d-B, Aso2014d-C, Aso2014d-E, Aso2014d-G, Aso2014d-H, Aso2014d-J, Aso2014d-K, Aso2014d-L, Aso2014d-M, Aso2014d-N)のうち 2014d-K は Aso2T の火山灰層(同層最上部)である. 以下同様に, 2014d-M は Aso2T 火山灰層(但し同層下部の上部), 2014d-L は Aso2T 火山灰層(但し同層の上部の下部), 2014d-N は Aso2TL の白色軽石層, 2014d-H は Aso3R の軽石層, 2014d-G は Aso3P 下部の基質支持細粒軽石層, 2014d-C は Aso3U の下位にある黄色火山灰質土壌(スコリアを含む), 2014d-E は Aso3P の粒子支持軽石層(但し同層の下から 20cm), 2014d-J は Aso3S 軽石層(但し同層の下から 5~20cm), 2014d-B は Aso3U 火山灰および降下軽石層, 2014d-A は Aso3W 降下軽石層の軽石である. 本報告ではこれらを一括して阿蘇-2/3 間降下火砕物として扱う.

これらに加え, 産総研が保管していた阿蘇-4 以降の降下火砕物(試料番号 Aso A-C, Aso N4 Lower, Aso N4 Upper, Aso N6 Lower, Aso N6 Upper, Aso P2-A, Aso P2-dark, Aso P2-white, Aso P4, Aso P6, Aso S4, Aso S4 Lower, Aso S7, Aso S9, Aso S11, Aso S14, Aso S17B, Aso S18, Aso S29, Aso S41, Aso S43)についても, 全岩化学組成を検討する. これらは阿蘇カルデラ東方の大分県竹田市萩町桑木山崎周辺の林道工事現場の露頭で採取されたものであり, 層序の詳細は Miyabuchi (2009)に記載されているが, 本報告ではこれらを一括して後阿蘇-4 降下火砕物として扱う.

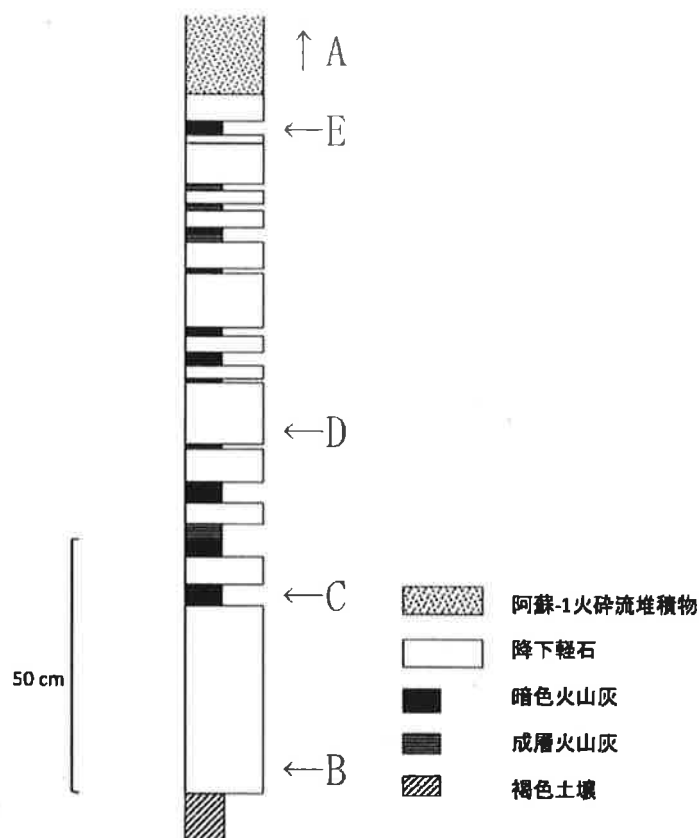


図 2.2: 阿蘇カルデラ東壁の阿蘇-1 火砕流堆積物基底部の模式的な層序(産総研, 2014). 図中の A~E はそれぞれ試料番号 Aso2014a-A~Aso2014a-E が採取された層準を示す.

試料の調整

噴出物の化学分析の前処理は以下のとおりである。試料約 500 グラムを 90℃の恒温乾燥機で一晩かけて乾燥後に重量を測定した。次に水が濁らなくなるまで純水を交換しながら 30～120 分間超音波洗浄したのち 90℃の恒温乾燥機で一晩かけて乾燥させて重量を測定し、250 μm 、500 μm 、1mm、2mm、4mm、8mm、16mm のふるいで粒径を分けた。このうち、より粗粒な軽石粒子を実体顕微鏡で観察しながらピンセットで数グラム以上選り分けて、全岩化学組成分析を行なった。全岩化学組成分析はカナダ Actlabs 社に外注し、ICP(Inductively Coupled Plasma)発光分析装置で主成分元素濃度を得た。

500～1000 μm 区間の粒子については、実体顕微鏡で観察を行なうとともに、デジタル顕微鏡による光学像の撮影を行ない、表面に新鮮なガラスが付着している粒子をピンセットで選り分けて、直径 1 インチ厚み 6mm のガラス円盤上にエポキシ樹脂(ペトロバキシ 154)で固定し、ガラス原面から研磨仕上げ面までの距離が約 370 μm (平均粒径のおよそ半分)となるように、マイクロメータで厚みを確認しながら、400 番～15000 番の固定砥粒研磨フィルムを用いて削剥研磨した。地質調査総合センターの EPMA(JEOL JXA-8900)を用いて、研磨片全体の走査電子顕微鏡像を撮影した。EPMA の撮影条件は、電子プローブの加速電圧が 15kV、試料電流は 12nA、試料面上におけるプローブ径は 0 μm (focused beam)、コントラストはざらつきが生じない範囲で最大とした。1 ピクセルの大きさが 1x1 μm で 1000x1000 ピクセルからなるデジタル反射電子像を、1000 μm 間隔で基盤の目状に撮影した。さらに同一の撮影位置について、輝度を輝石用と斜長石の観察用に最適化した二枚の画像を取得し、それらをハイパーテキストで連結させることにより、分析位置の把握と、ガラス、斜長石、そして輝石の組成累帯構造の観察と、輝石と鉄チタン酸化物鉱物の識別を迅速に行なえるようにした。EPMA の元素(Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, S, Cl, F)分析の条件は、加速電圧が 15kV、試料電流が 12nA、試料面上におけるプローブ径が 4 μm 、補正計算が ZAF 法である。電子ビームの直径を広げることと、ビーム照射直後の 4 秒間に Na に信号を検出することにより、Na 計量の時間変化の影響を軽減した。分析および観察方法は基本的に Miyagi et al. (2012)と同じである。

光学顕微鏡による阿蘇-1 火砕流基底の降下火砕物の観察

阿蘇-1 火砕流基底の降下火砕物から採取された試料(下位から順に Aso2014a-B, Aso2014a-C, Aso2014a-D, Aso2014a-E)および阿蘇-1 火砕流堆積物下部の非熔結部(Aso2014a-A)については、ふるい分けた径 500～1000 μm の粒子について光学顕微鏡による観察を行なった(図 2.2-3～図 2.2-7)。

基底部の Aso2014a-B の構成粒子は、多い順に斜長石斑晶、斜方輝石斑晶、火山ガラス片、単斜輝石斑晶であり、斑晶の表面や内部に鉄チタン酸化物鉱物を伴う(図 2.2-3)。火山ガラス片の外形は角礫状で破断面に囲まれている。

Aso2014a-B を覆う暗色火山灰屑である Aso2014a-C の構成粒子は、主に暗色火山ガラス片であり、淡色火山ガラス片、斜長石斑晶、斜方輝石斑晶を伴う。これらの表面や内部に鉄チタン酸化物鉱物が観察される(図 2.2-4)。火山ガラス片の外形は角礫状で破断面に囲まれている。

Aso2014a-C を覆う降下軽石層である Aso2014a-D の構成粒子は、多い順に斜長石斑晶、斜方輝石斑晶、気泡痕のある火山ガラス片である。これらの表面や内部には鉄チタン酸化物鉱物が伴われる(図 2.2-5)。

降下軽石と暗色火山灰の互層の最上部の火山灰屑である Aso2014a-E の構成粒子は、多い順に斜長石斑晶、斜方輝石斑晶、発泡跡のある火山ガラス片、暗色火山ガラス片である。これらの表面や内部に鉄チタン酸化物鉱物を伴う(図 2.2-6)。火山ガラス片の外形は角礫状で破断面に囲まれている。大きな粒子は変質が進んでいる。

阿蘇-1 火砕流堆積物基底部の非熔結部から採取された Aso2014a-A の構成粒子は、多い順に斜長石斑晶、斜方輝石斑晶、発泡跡のある火山ガラス片、そして少量の暗色火山ガラス片と変質岩片である。斑晶の表面や内部に鉄チタン酸化物鉱物を伴う(図 2.2-7)。



図 2. 2-3 : Aso2014a-B の顕微鏡写真. 500~1000 μm に篩分けた粒子.



図 2. 2-4 : Aso2014a-C の顕微鏡写真. 500~1000 μm に篩分けた粒子.

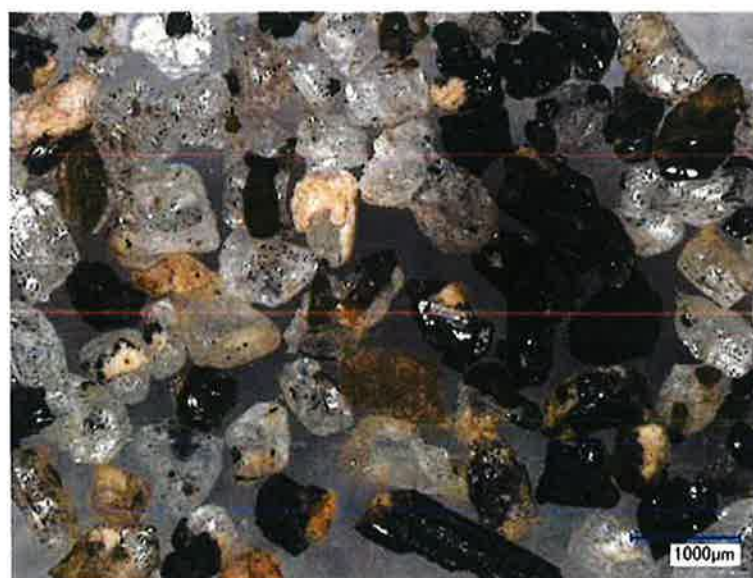


図 2. 2-5 : Aso2014a-D の顕微鏡写真. 500~1000 μm に篩分けた粒子.



図 2. 2-6 : Aso2014a-E の顕微鏡写真. 500～1000 μ m に篩分けた粒子.

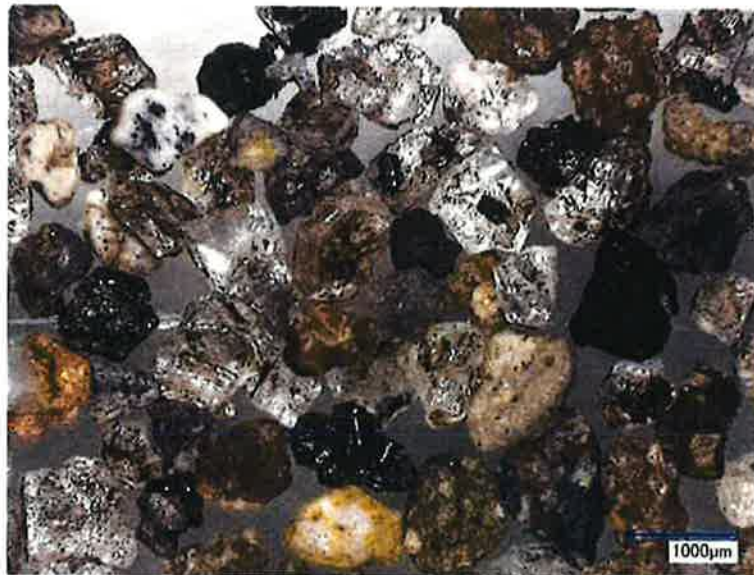


図 2. 2-7 : Aso2014a-A の顕微鏡写真. 500～1000 μ m に篩分けた粒子.

反射電子像による阿蘇-1 火砕流基底の降下火砕物の観察

上述の、阿蘇-1 火砕流基底の降下火砕物から採取された試料、および阿蘇-1 火砕流堆積物下部の非熔結部については、ふるい分けされた径 500~1000 μm の粒子の断面の研磨面について E PMA の走査型電子顕微鏡を用いた観察を行なった(図 2. 2-8~図 2. 2-17)。

2014a-B の斜長石斑晶は波状累帯構造を持ち、顕著な正累帯／逆累帯構造を持たないものが大半を占めるが、中心付近に融食形で An 組成に富む部位を持つものも少量存在する。斜長石斑晶の周縁には斜方輝石および鉄チタン酸化物鉱物が伴なわれることがある。斜方輝石斑晶は均質または比較的弱い正累帯構造をもち、鉄チタン酸化物鉱物と集斑晶を形成している。火山ガラス片には発泡跡があり気泡の体積分率が数~数十体積%程度のブロック状のものと、気泡分率が 90% 程度のものが共存する(図 2. 2-8 および図 2. 2-9)。

Aso2014a-B を覆う暗色火山灰層である 2014a-C の斜長石も波状累帯構造を呈するものが大半を占める。輝石は弱い正累帯構造のものが大半であるが、強い正累帯構造のものも少量存在する。火山ガラスのうち光学顕微鏡で暗色を呈したものは淡色のものに比べて微結晶量が多く、淡色火山ガラス片、斜長石斑晶、斜方輝石斑晶を伴なう。これらの表面や内部には鉄チタン酸化物鉱物が観察される(図 2. 2-10 および図 2. 2-11)。

Aso2014a-C を覆う降下軽石層である Aso2014a-D の斜長石も波状累帯構造を呈するものが大半を占めるが、少数、やや強い正累帯構造を呈するものが存在する。斜方輝石斑晶はやや強い正累帯構造を示すものが大半を占め、累帯構造の弱いものは少数である。火山ガラスは比較的気泡率の高い発泡跡を示すものも観察される(図 2. 2-12 および図 2. 2-13)。

降下軽石と暗色火山灰の互層の最上部の火山灰層である Aso2014a-E の斜長石は、波状累帯構造を示すものが大半を占める。斜方輝石はやや強い正累帯構造を示すもの、均一なもの、そしてマグネシウムに富むものが共存している。火山ガラス片は発泡度の高いものと低いものが混在している(図 2. 2-14 および図 2. 2-15)。

阿蘇-1 火砕流堆積物基底部の非熔結部から採取された Aso2014a-A の斜長石も、波状累帯構造を示すものが大半を占め、カルシウムに富む内部を有するものが少数存在する。斜方輝石は弱い正累帯構造を示すもの、逆累帯構造のもの、マグネシウムに富むもの、均質なものが混在している。マグネシウムに富む斜方輝石には砂時計状の構造も観察された(図 2. 2-16 および図 2. 2-17)。

以上のように、阿蘇-1 の大規模火砕流噴火に先行する噴出物に含まれる斜方輝石の累帯構造には時間変化がみられた。大規模噴火が近くなるにつれ、正累帯構造が顕著な斜方輝石やマグネシウムに富む斜方輝石が出現した。これとは対照的に斜長石の累帯構造に時間変化がほとんどみられなかった。

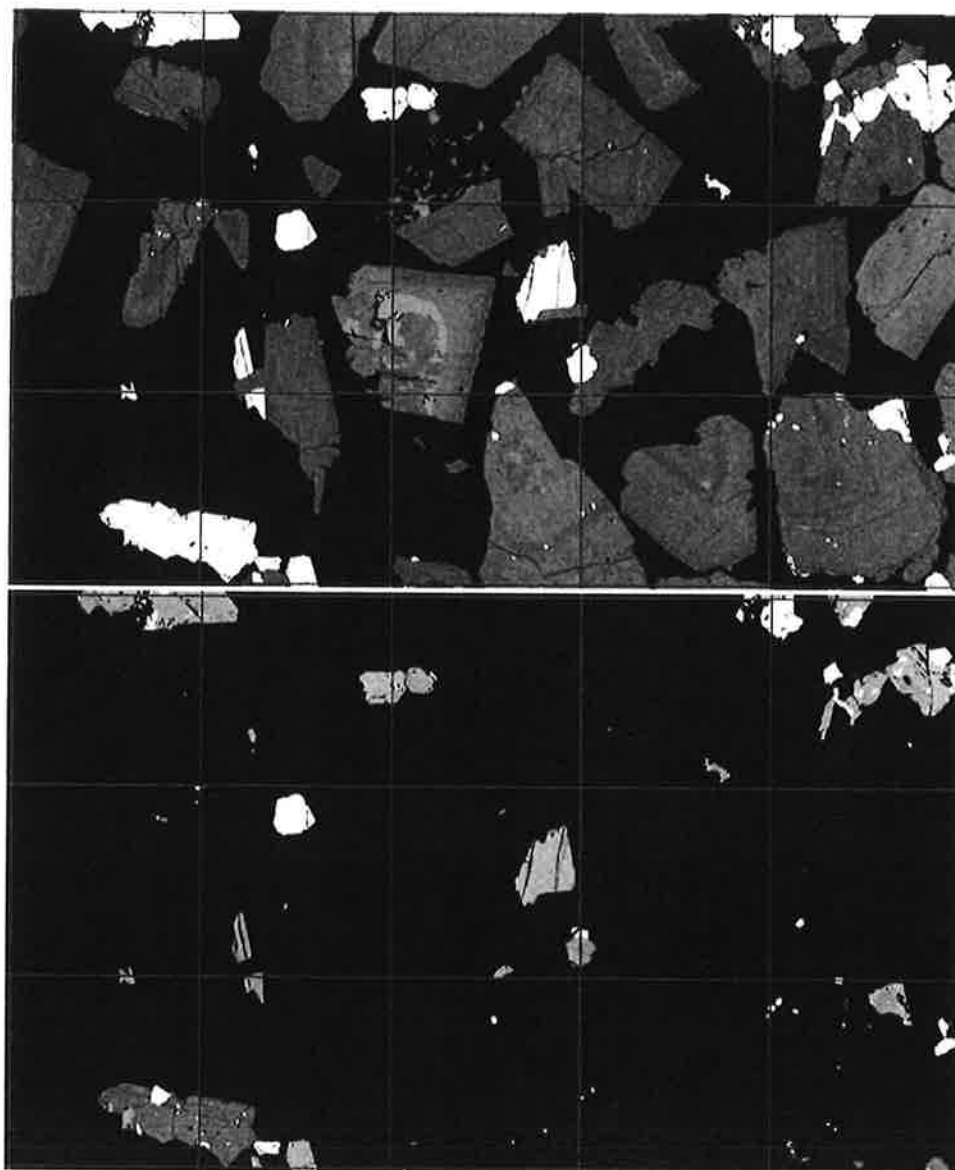


図 2.2-8(上)および図 2.2-9(下) : Aso2014a-B の反射電子像. 上は斜長石とガラスに輝度・コントラストを最適化させた. 下は同一区画を輝石・斜長石用に最適化させたもの. 格子は 1mm である.



図 2.2-10(上) および図 2.2-11(下) : Aso2014a-C の反射電子像. 上は斜長石とガラスに輝度・コントラストを最適化させた. 下は同一区画を輝石・斜長石用に最適化させたもの. 格子は 1mm である.

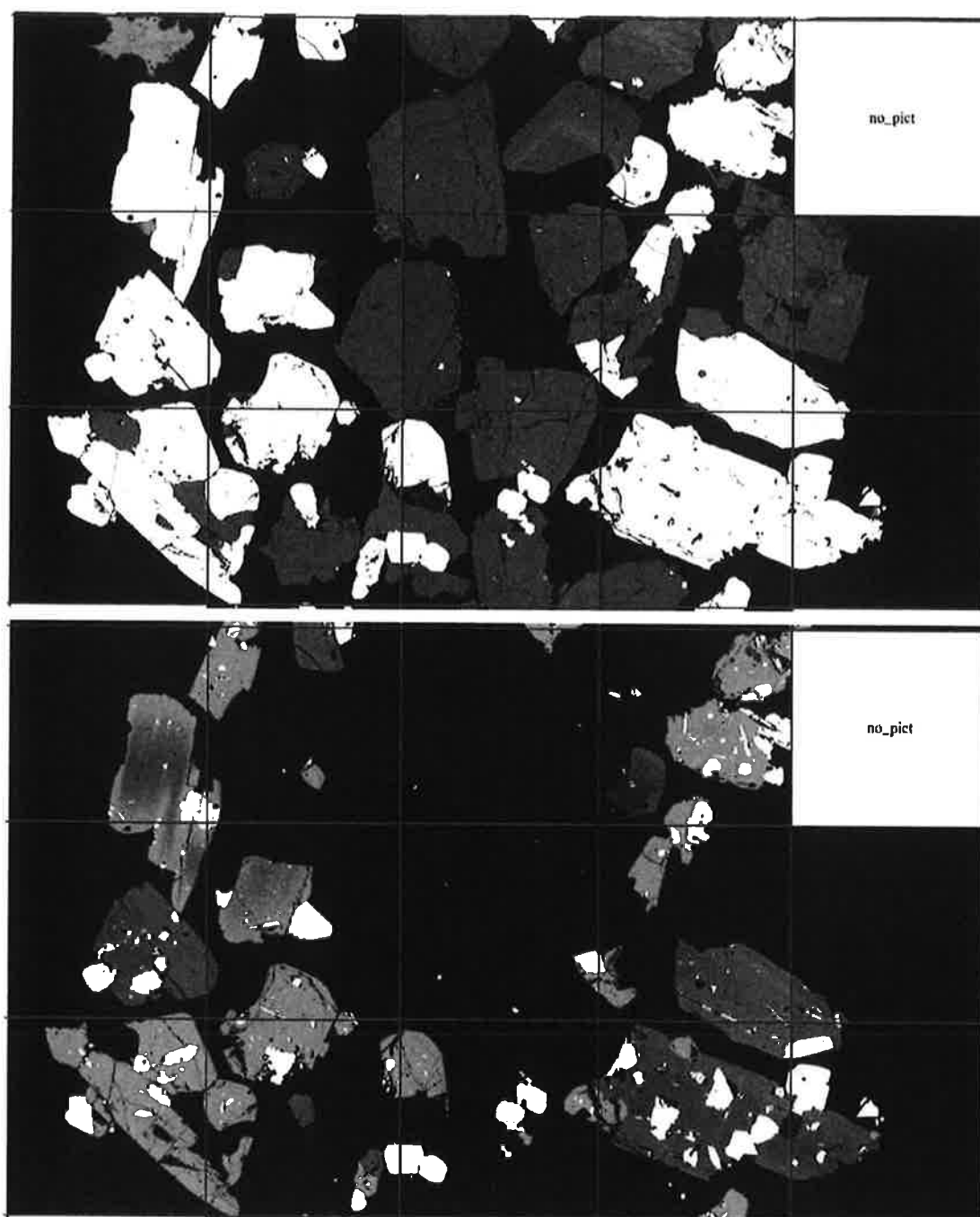


図 2.2-12(上)および図 2.2-13(下) : Aso2014a-D の反射電子像。上は斜長石とガラスに輝度・コントラストを最適化させた。下は同一区画を輝石・斜長石用に最適化させたもの。格子は1mmである。

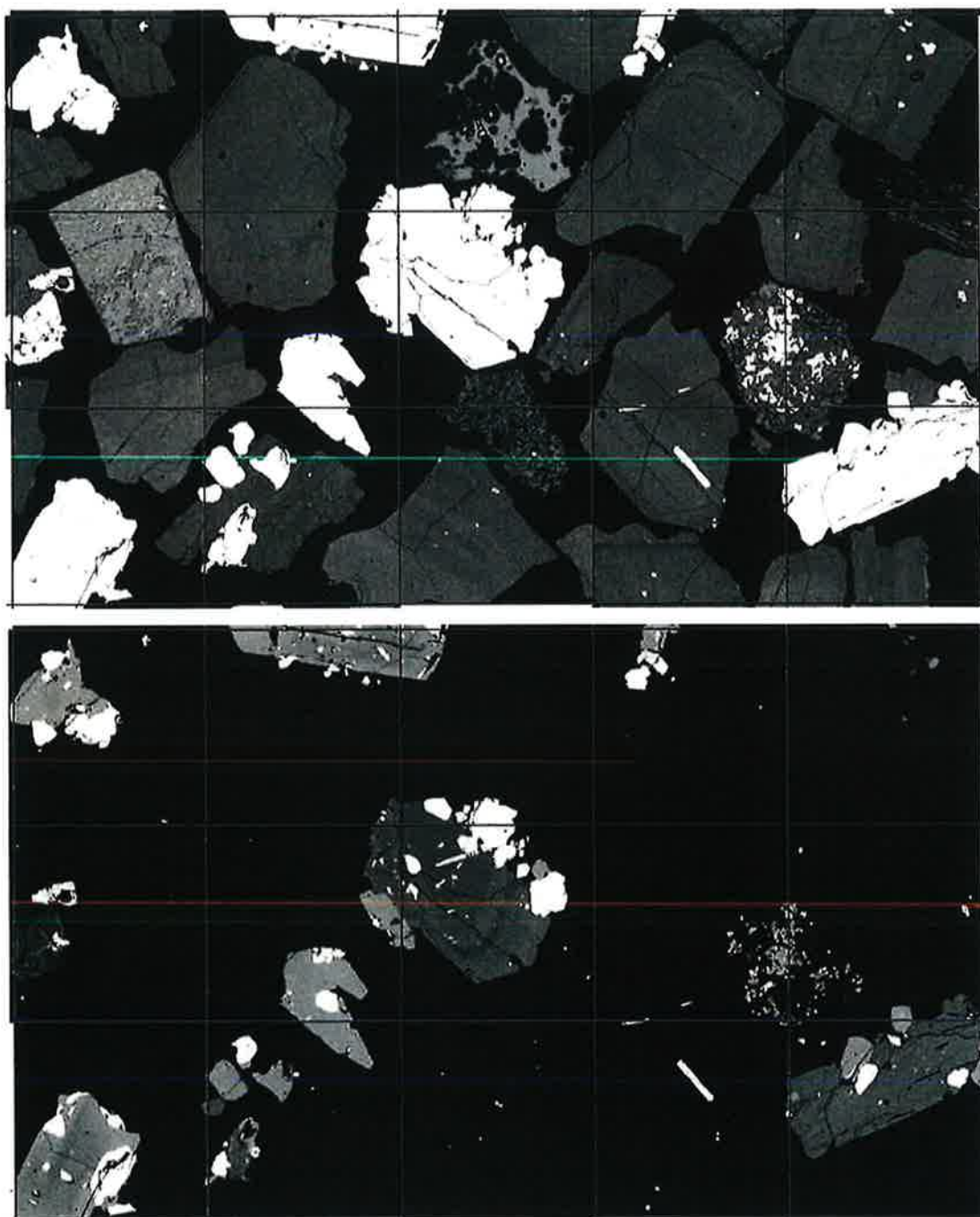


図 2.2-14(上)および図 2.2-15(下) : Aso2014a-E の反射電子像。上は斜長石とガラスに輝度・コントラストを最適化させた。下は同一区画を輝石・斜長石用に最適化させたもの。格子は 1mm である。

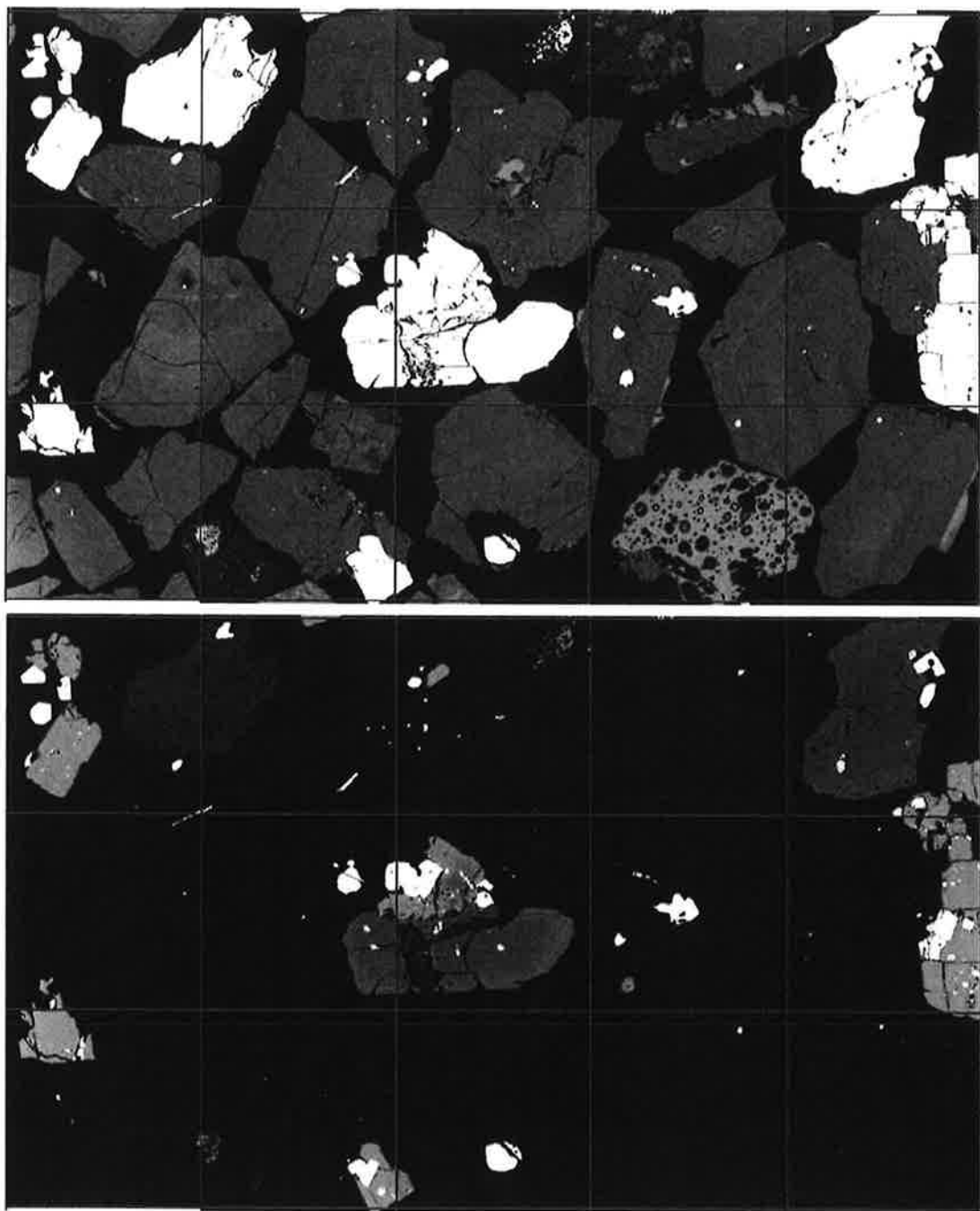


図 2.2-16(上)および図 2.2-17(下) : Aso2014a-A の反射電子像. 上は斜長石とガラスに輝度・コントラストを最適化させた. 下は同一区画を輝石・斜長石用に最適化させたもの. 格子は 1mm である.

全岩・鉱物・ガラスの化学組成

全岩化学組成を無水 100 重量%換算したものを表 2.2-1 に示す。表 2.2-1 中の試料のうち識別子が MHS2005 で始まる全岩化学組成は、Miyoshi et al., (2005)によった。Aso2014a-E については大きな粒子の変質が進んでいるために全岩化学組成を得られなかった。EPMA を用いた鉱物およびガラス(石基および斑晶ガラス包有物)の化学組成の分析位置は、例えば図 2.2-18 のように、反射電子像上に重ねて記録した。それらの反射電子像を 223 枚を束ね添付の電子ファイル(MG69_AsoBot_QntPos.pdf)を作成した。EPMA による分析数は、斜長石が 197 点、輝石が 146 点、鉄チタン酸化物鉱物が 76 点、アパタイトが 33 点、斑晶ガラス包有物が 163 点、石基ガラスが 111 点、合計 726 点であった。

軽石およびスコリアの全岩化学組成範囲は、阿蘇-1 火砕流堆積物およびそれに先行する降下火砕物のものがシリカ 54 から 65 重量%であった。以下同様に、阿蘇-2/3 間降下火砕物はシリカ 55 から 64 重量%、阿蘇-4 以降の降下火砕物はシリカ 47 から 72 重量%である(表 2.2-1)。チタンのハーカー図において全岩化学組成(図 2.2-19 の水色円と橙色円)はシリカ 47 重量%付近の玄武岩を始点としてシリカ 72 重量%付近の流紋岩組成を終点として、シリカ濃度とともに上昇後に減少する輪郭と、ゆるやかに減少する輪郭の中に分布している(輪郭を図 2.2-19 中に破線で示す)。先阿蘇-1 噴出物の全岩化学組成(図 2.2-19 の白抜き円)は、この輪郭の中に大方収まっている。先阿蘇-1 の噴出物の石基ガラスの組成(図 2.2-19 の緑色の点)も、この輪郭の中のシリカ 69 重量%付近に集中し、そこでの酸化チタン濃度は 0.63 重量%程度である。先阿蘇-1 噴出物中の斑晶ガラス包有物は(図 2.2-19 の赤色の点)、大半が石基ガラスとほぼ同じ組成に収斂するものの、磁鉄鉱やイルメナイトの組成にむけて扇形に散ったものも存在する。阿蘇-4 以降の噴出物の全岩化学組成は、特にシリカ濃度 47~58 重量%の範囲において、マグネシウム濃度が高い(図 2.2-20 の水色円)。先阿蘇-1 の噴出物はすべてマグネシウム濃度が低い(図 2.20 の白抜き円)。阿蘇-4 以降の噴出物のナトリウム(図 2.2-21)は、シリカ 65 重量%位まで徐々上昇後、急速に減少する。先阿蘇-1 のナトリウム全岩化学組成はシリカとともに上昇し、斑晶ガラス包有物のナトリウム組成は珪長質になるにつれ減少している(図 2.2-21 の赤色の点)。カリウムの全岩化学組成はシリカとともに上昇し、先阿蘇-1 噴出物も阿蘇-4 以降の噴出物も、Low-K から High-K の範囲(Gill, 1981)をまたいで分布している(図 2.2-22)。先阿蘇-1 の斑晶ガラス包有物および石基ガラスはどちらも High-K の範囲にあり、全岩化学組成に比べて、シリカ量が同じときのカリウムの濃度が高い(図 2.2-22 の赤色の点と緑色の点)。

先阿蘇-1 噴出物の全岩化学組成が比較的広い範囲に分布するのに対し、斑晶ガラス包有物の化学組成はシリカ 62~71 重量%とやや狭く、石基ガラスはシリカ 66~71 重量%と更に狭い範囲に分布することが特徴である。石基ガラスと斑晶ガラス包有物のシリカ濃度分析値の頻度分布(図 2.2-23)によると、石基ガラスはシリカ 69 ± 1 重量%の非常に狭いピークを持つことがわかる。斑晶ガラス包有物の組成頻度のピークは石基ガラスとほぼ一致しているが、よりシリカ量の少ないほうに広がった分布をしている。斑晶ガラス包有物のシリカ組成頻度をホスト斑晶別(斜長石と斜方輝石)にみると(図 2.2-24)、輝石中のものは比較的組成範囲が広く、ピークの位置のシリカ濃度は 69 重量%である。一方斜長石中のものは組成範囲が狭く、ピーク位置のシリカ濃度は 68.5 重量%と僅かな違いがみられた。カリウムのハーカー図を拡大してホスト斑晶別にみると(図 2.2-25)、輝石斑晶中の包有物は全岩化学組成の組成変化方向に調和的な右上がりの分布をしているのに対し、斜長石中の包有物はシリカのみ、あるいはカリウムのみが増減するような分布をしている。斑晶ガラス包有物の化学組成を噴出順にみると(図 2.2-26)、最初期の噴出物(B MI; 青色の点)、次の噴出物(C MI; 桃色の点)、そしてその次の噴出物(D MI; 赤色の点)の組成分布は類似している。阿蘇-1 火砕流堆積物(A MI; 緑色の点)とその直下から採取された降下火砕堆積物(E MG; 茶色の点)はそれらを含み、分布範囲は比較的広い。斜長石斑晶の An 組成は 51 ± 2 mol%が高頻度で、57 と 70 mol%付近のものも存在する(図 2.2-27)。磁鉄鉱の化学組成は基底部の Aso2014a-B から阿蘇-1 火砕流堆積物直前の Aso2014a-E まで組成変化が殆んどないが、阿蘇-1 火砕流堆積物では大きくばらついている(図 2.2-28)。

表2.2-1：全岩化学组成

全岩化学组成											
#Sample ID:	Level	SiO ₂ .d	TiO ₂ .d	Al ₂ O ₃ .d	tFeO.d	MnO.d	MgO.d	CaO.d	Na ₂ O.d	K ₂ O.d	P ₂ O ₅ .d
2014a-A	2014a-A	55.89	1.03	22.35	12.11	0.19	0.79	2.04	2.84	2.75	0.21
2014a-B	2014a-B	54.08	1.44	27.32	12.20	0.21	0.91	1.99	0.82	0.85	0.19
2014a-D	2014a-D	58.12	1.34	23.35	7.94	0.18	1.13	2.88	2.34	2.49	0.23
2014a-E	2014a-E	65.02	0.80	15.73	6.94	0.13	0.80	2.42	3.49	4.49	0.19
2014d-K	aso2	55.23	1.14	24.61	10.59	0.05	0.55	4.61	1.99	1.06	0.18
2014d-M	aso2	56.50	0.90	20.47	8.01	0.11	1.79	7.27	2.84	1.88	0.23
2014d-L	aso2	56.52	0.92	20.18	9.10	0.12	1.72	6.85	2.63	1.75	0.22
2014d-N	aso2	64.96	0.86	16.34	6.00	0.18	0.80	2.41	3.69	4.53	0.22
2014d-H	aso3	57.43	0.93	19.56	11.25	0.18	1.34	3.27	3.14	2.63	0.27
2014d-G	aso3	58.57	0.76	18.07	14.90	0.19	0.68	1.95	3.26	3.44	0.18
2014d-C	aso3	59.53	0.96	18.45	9.79	0.17	1.23	3.15	3.42	3.11	0.20
2014d-E	aso3	60.26	1.11	22.18	7.98	0.21	0.72	1.90	2.67	2.80	0.17
2014d-J	aso3	63.77	0.85	17.70	6.26	0.14	1.02	3.45	3.02	3.50	0.30
2014d-B	aso3	65.67	0.89	17.95	5.19	0.14	0.97	2.89	2.67	3.33	0.29
2014d-A	aso3	67.62	0.66	15.14	5.78	0.14	0.62	1.78	3.42	4.66	0.18
1998 A-C	post4	61.64	0.83	19.74	7.66	0.18	1.16	2.76	3.07	2.71	0.26
1998 N4d	post4	49.55	1.06	21.13	11.33	0.15	4.25	9.46	2.17	0.67	0.24
1998 N4u	post4	49.97	1.12	21.03	11.66	0.16	4.32	8.71	2.11	0.67	0.24
1998 N6d	post4	52.96	0.97	18.08	10.68	0.18	4.27	8.53	2.64	1.48	0.21
1998 P2-A	post4	62.95	1.02	20.20	4.96	0.13	1.12	3.13	3.55	2.68	0.27
1998 P2-B	post4	63.74	1.00	19.60	5.00	0.13	0.99	2.91	3.57	2.77	0.29
1998 P2-F	post4	65.16	0.85	17.87	4.79	0.14	0.99	2.91	3.91	3.14	0.23
1998 P6	post4	60.48	0.89	18.19	7.54	0.18	1.56	4.36	3.74	2.70	0.37
1998 S11	post4	48.29	0.88	19.80	11.98	0.19	6.44	9.87	2.05	0.27	0.10
1998 S14	post4	54.53	0.94	17.41	9.36	0.18	5.40	8.83	2.25	0.93	0.17
1998 S17B	post4	53.39	0.97	18.12	10.02	0.18	4.69	8.84	2.41	1.14	0.24
1998 S18	post4	52.31	0.92	17.34	10.67	0.18	5.24	9.59	2.61	0.93	0.21
1998 S29	post4	50.24	1.18	25.00	12.70	0.21	4.80	4.44	1.14	0.36	0.13
1998 S41	post4	55.14	0.79	18.94	9.82	0.16	3.46	7.49	3.28	0.98	0.14
1998 S43	post4	51.68	1.31	20.78	10.41	0.18	4.14	8.51	2.27	0.50	0.22
1998 S7	post4	48.31	1.08	22.09	13.31	0.21	6.06	7.09	1.48	0.27	0.10
1998 S9	post4	49.73	1.11	21.17	12.34	0.19	5.09	8.02	1.78	0.42	0.15
2014c-C	post4	50.23	0.97	17.98	14.95	0.20	3.92	7.71	2.71	1.12	0.20
2014c-D	post4	51.48	1.17	20.81	13.01	0.16	3.27	6.45	2.41	1.03	0.21
Aso_N4D	post4	49.57	1.00	20.04	11.82	0.15	4.74	9.61	2.10	0.74	0.23
Aso_N4U	post4	52.49	1.14	21.81	6.47	0.18	5.03	9.67	2.18	0.78	0.25
Aso_N6-UPPER	post4	54.50	1.01	18.21	8.29	0.17	4.29	8.92	2.71	1.65	0.27
Aso_N6K-LOWER	post4	55.16	0.97	18.82	6.62	0.17	4.66	9.27	2.57	1.51	0.24
Aso_S11	post4	46.89	0.92	18.43	14.94	0.18	6.38	9.73	2.09	0.29	0.15
Aso_S14	post4	53.55	0.91	17.19	10.20	0.17	5.56	9.09	2.24	0.88	0.21
Aso_S17B	post4	51.77	0.95	18.14	10.97	0.18	5.11	9.19	2.35	1.00	0.34
Aso_S18	post4	54.33	0.94	18.35	6.46	0.18	5.72	10.35	2.57	0.86	0.24
Aso_S41	post4	58.49	0.81	18.59	5.48	0.15	4.48	7.90	3.04	0.91	0.18
Aso_S9	post4	53.70	0.84	18.38	8.30	0.17	5.14	9.18	2.69	1.26	0.22
MHS2005_AS034	post4	50.28	0.91	18.40	8.28	0.17	6.32	12.29	2.26	0.90	0.19
MHS2005_AS039	post4	47.72	0.93	18.42	12.22	0.17	5.72	11.64	2.19	0.75	0.22
MHS2005_AS057	post4	52.72	0.96	18.35	7.33	0.18	5.74	10.51	2.78	1.25	0.19
MHS2005_AS076	post4	70.47	0.44	14.98	2.59	0.08	0.58	1.16	4.84	4.80	0.06
MHS2005_AS078	post4	82.07	0.90	16.57	6.16	0.12	1.85	4.07	4.45	3.60	0.41
MHS2005_AS28372	post4	72.09	0.39	14.07	2.35	0.04	0.58	1.31	3.49	5.63	0.05
MHS2005_ASK1920	post4	60.68	0.92	16.29	7.54	0.15	1.91	4.40	4.25	3.40	0.46
MHS2005_ASK1971	post4	64.75	0.76	16.26	5.05	0.11	1.22	3.00	4.46	4.14	0.24
MHS2005_ASK630	post4	71.22	0.43	15.01	1.95	0.07	0.53	1.09	4.81	4.84	0.06
P2-O	post4	59.31	0.84	17.28	12.09	0.13	1.12	3.04	3.32	2.63	0.25
P4	post4	61.40	0.73	16.41	9.18	0.12	1.41	3.93	3.57	2.99	0.26
P4-B	post4	64.16	0.73	15.87	5.86	0.13	1.51	3.86	4.18	3.33	0.37

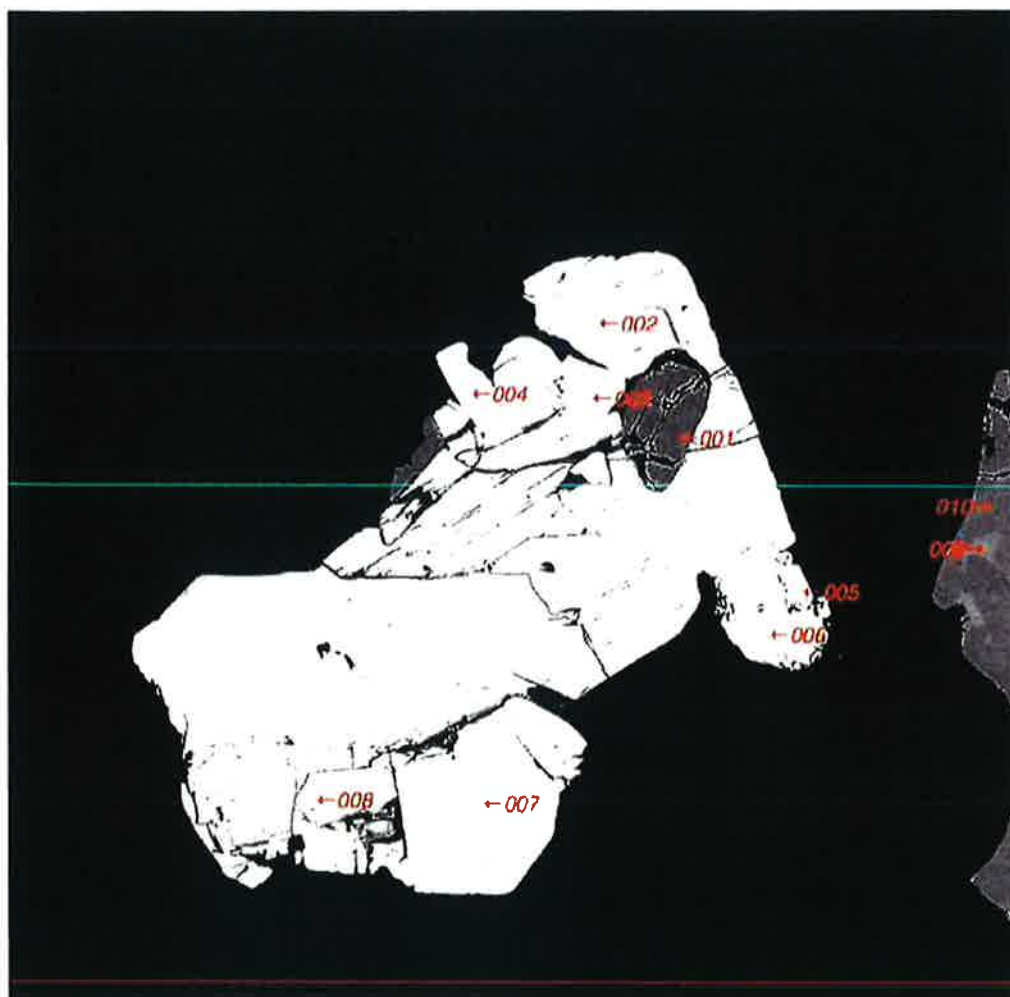


図 2.2-18: E PMA 分析位置の記録例。画像の一辺は $1000\mu\text{m}$ 。図中の矢印は分析位置を示し、番号は分析番号に対応する。

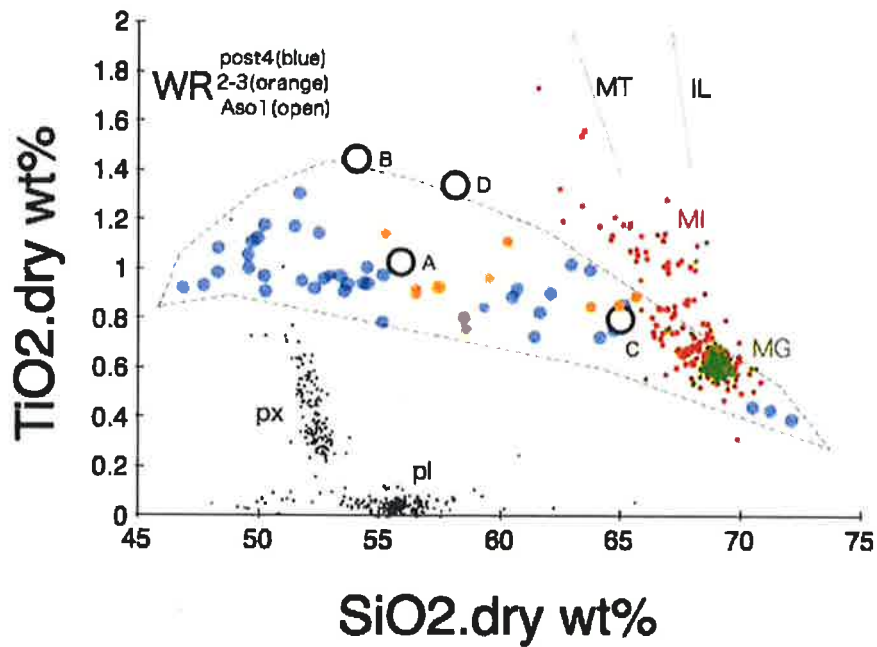


図 2.2-19: チタンのハーカー図。白抜きのは阿蘇-1 火砕流堆積物およびその下位にある降下火砕物 (Aso2014a-B, -C, -D, -A), 橙色のは阿蘇-2/3 間の降下火砕物, そして水色ののは阿蘇-4 以降の降下火砕物の全岩化学組成を示す。赤色と緑色の点はそれぞれ阿蘇-1 火砕流堆積物およびその下位にある降下火砕物中の斑晶ガラス包有物 (MI) と石基ガラス (MG) の化学組成を示す。黒い点は鉱物の化学組成を示す (px: 輝石, opx: 斜方輝石, cpx: 単斜輝石, pl: 斜長石)。

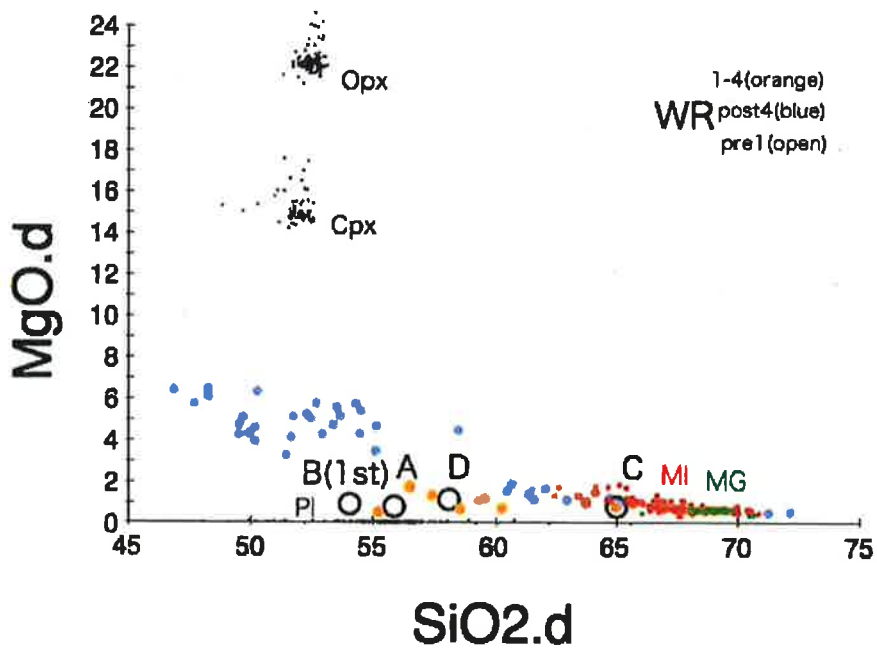


図 2.2-20: マグネシウムのハーカー図。凡例は図 2.2-19 と同じである。

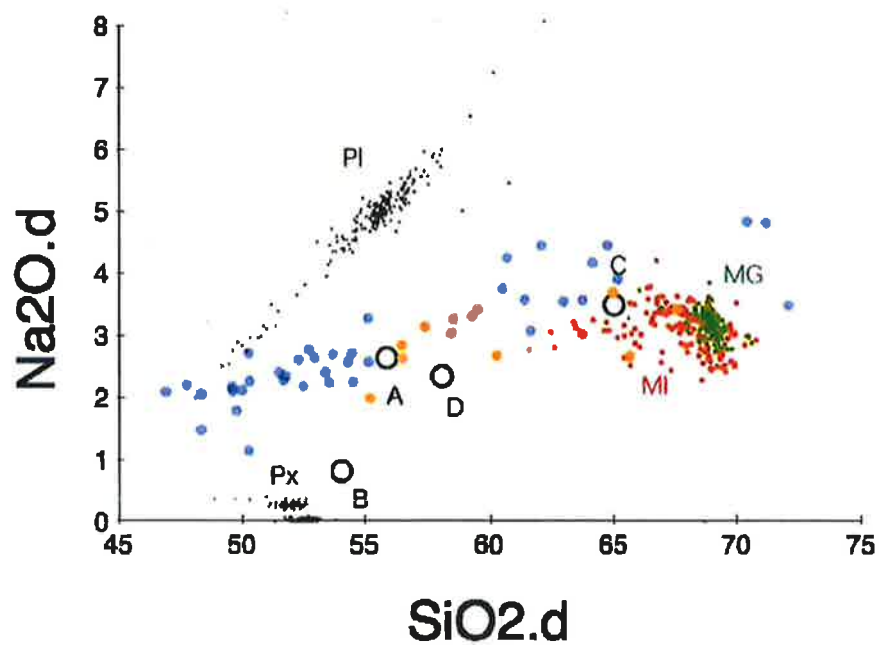


図 2.2-21 : ナトリウムのハーカー図. 凡例は図 2.2-19 と同じである.

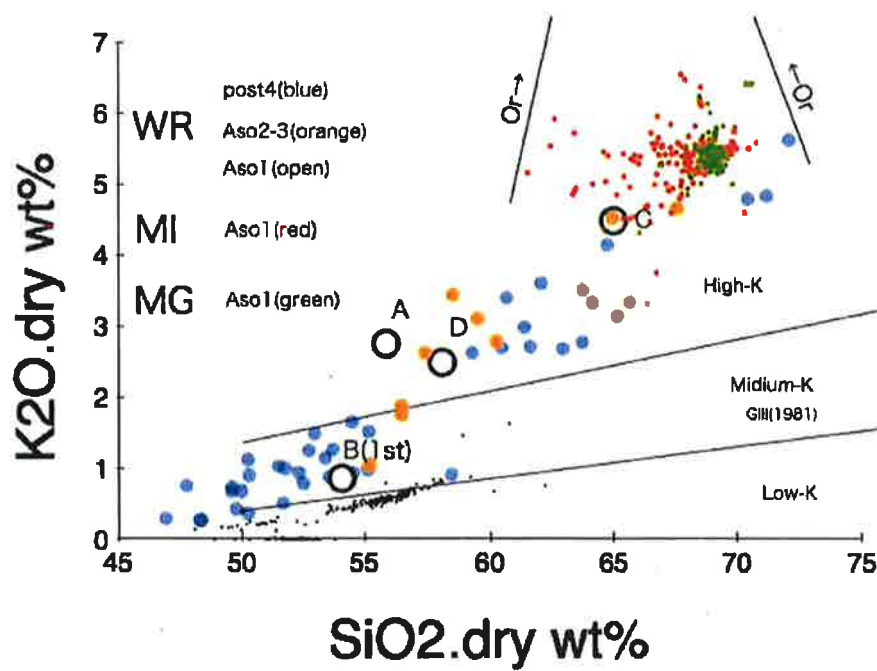


図 2.2-22 : カリウムのハーカー図. 凡例は図 2.2-19 と同じである. High-K, Medium-K, Low-K の境界線は Gill (1981) によった.

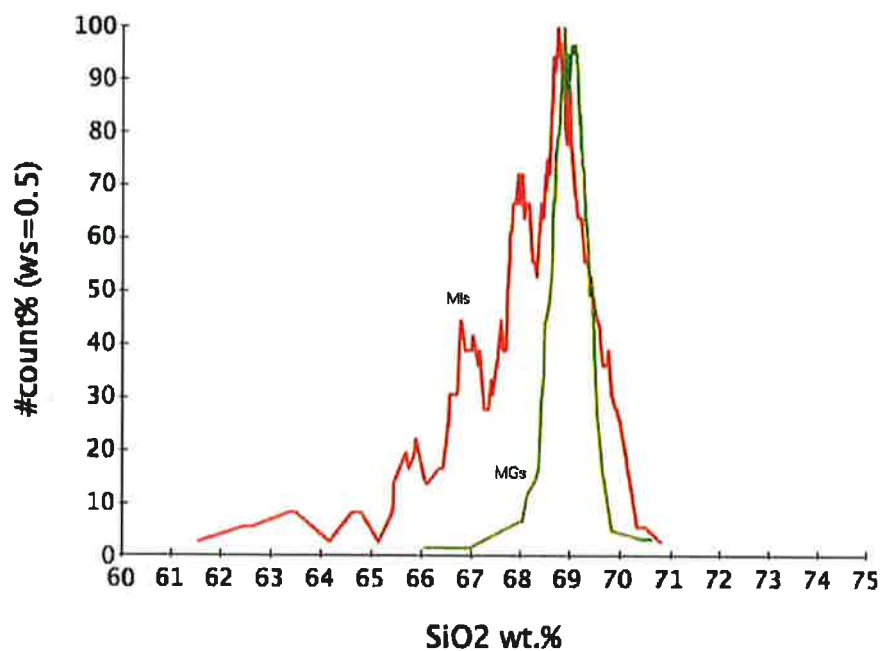


図 2.2-23：阿蘇-I 火砕流堆積物およびその下位の降下火砕物中の斑晶ガラス包有物 (Mis) および石基ガラス (MGs) の化学組成の頻度分布図。ピークが 100%になるよう規格化した。

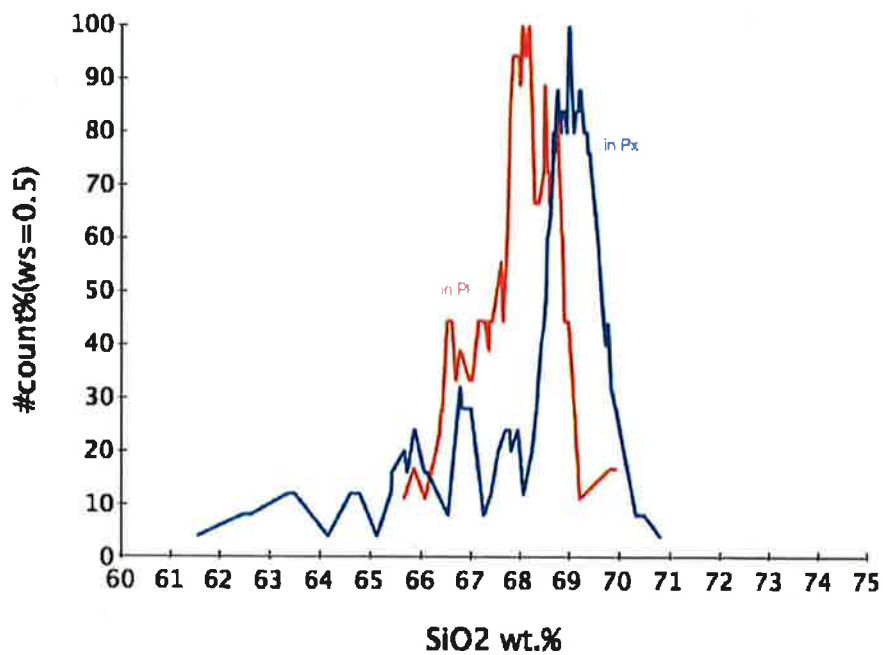


図 2.2-24：阿蘇-I 火砕流堆積物およびその下位の降下火砕物中の斑晶ガラス包有物の化学組成の頻度分布図 (図 2.23 の Mis) を、ホスト斑晶別示した (輝石中：in Px, 斜長石中：in Pl)。ピークが 100%になるよう規格化した。

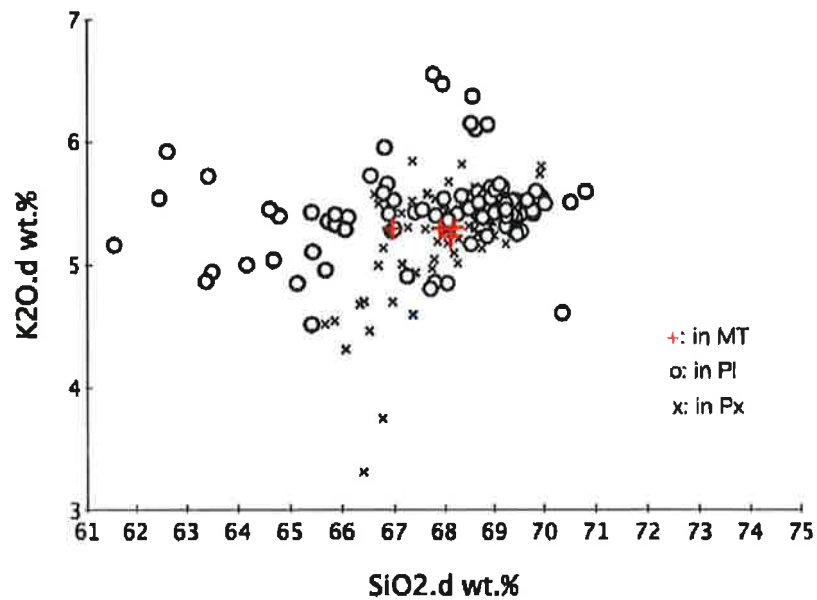


図 2. 2-25 : 阿蘇-1 火砕流堆積物およびその下位の降下火砕物中の斑晶ガラス包有物のカリウムのハーカー図を、宿主斑晶別に示したもの(磁鉄鉱中 : in MT, 斜長石中 : in Pl, 輝石中 : in Px).

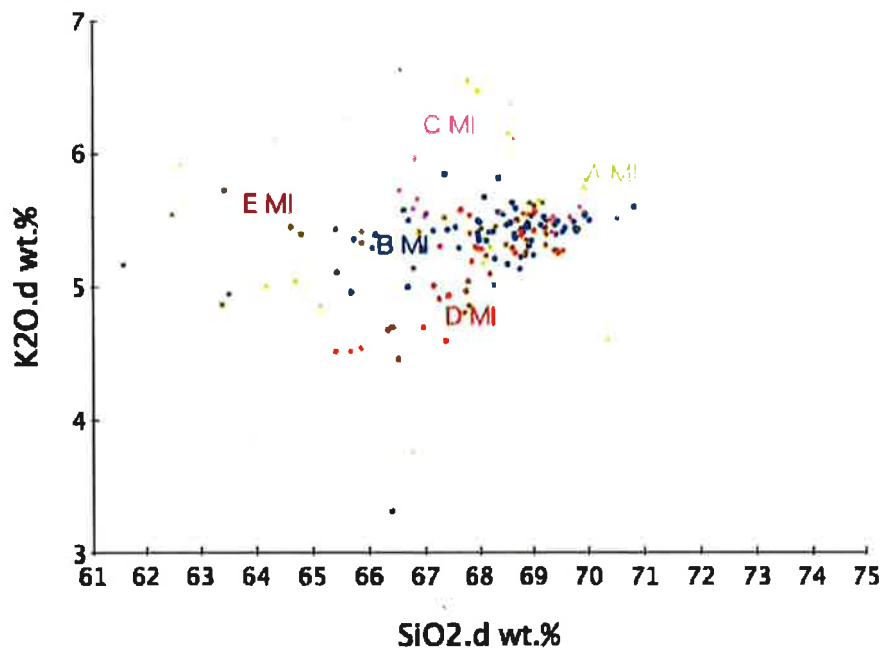


図 2. 2-26 : 阿蘇-1 火砕流堆積物およびその下位の降下火砕物中の斑晶ガラス包有物のカリウムのハーカー図を、噴出ステージ別に示したもの(B MI : Aso2014a-B 中, C MI : Aso2014a-C, D MI : Aso2014a-D, E MI : Aso2014a-E, A MI : Aso2014a-A).

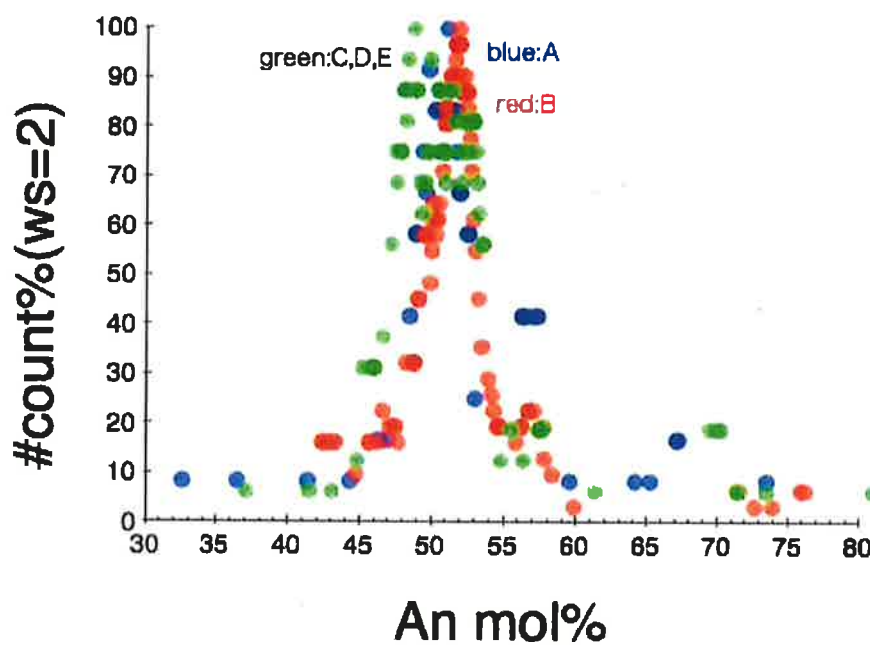


図 2.2-27：阿蘇-1 火砕流堆積物およびその下位の降下火砕物中の斜長石の An 組成の頻度分布。青色 (A ; Aso2014a-A) は阿蘇-1 火砕流堆積物の非熔結部の斜長石，赤色 (B ; Aso2014a-B) は阿蘇-1 火砕流堆積物の最下位，および緑色 (C, D, E ; Aso2014a-C, -D, -E) は B の上位の堆積物中のもの。分析結果は，古川・他 (2006)，井上・他 (2006)，Kaneko, et al. (2007) らによる報告と調和的である。

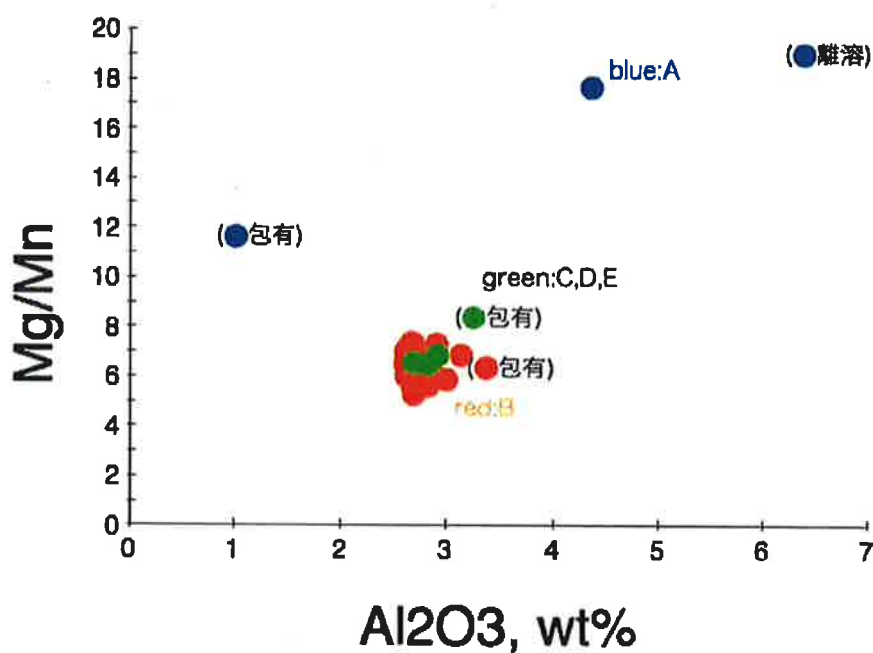


図 2.2-28：阿蘇-1 火砕流堆積物およびその下位の降下火砕物 (凡例は図 2.27 と同様) に含まれる鉄チタン酸化物鉱物のアルミナ重量% (鉄の二価三価補正済み) と，マグネシウム／マンガンのモル量比。

マグマの温度・圧力・含水量

阿蘇の火山噴出物の化学組成に対して熱力学解析を行なうことにより、マグマの温度・圧力・含水量を推定する。マグマの熱力学的データの取得方法は以下のとおりである。Hunter (1998) が報告した阿蘇-1 から阿蘇-4 噴出物の全岩化学組成の中でも比較的未分化なソレイト質玄武岩 4KC-03 (阿蘇-4 ステージ) を、阿蘇の苦鉄質端成分として代表させ、Rhyorite-MELTS による計算を行なった。Rhyorite-MELTS は、Mark Ghiorso らが無料で公開している、マグマの熱力学計算ソフトウェアのことであり、従来の MELTS プログラムを、石英が晶出する珪長質マグマの計算用に改良したものである (Asimow and Ghiorso, 1998; Ghiorso and Sack, 1995; Gualda et al., 2012)。本研究では Rhyorite-MELTS の起動、計算条件の読み込み、エラー処理を別途開発したスクリプト言語で制御することにより、様々な全岩含水量、酸素分圧、圧力での網羅的な計算を実行した。具体的には、1 つの全岩化学組成に対し、温度は 700–1400°C の範囲 (1°C 刻み)、圧力は 1 気圧から 1600 気圧で 100 気圧刻み、含水量は 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5, 6, 8, 10 重量%、酸素分圧は FMQ–FMQ+2 ログユニット変化させて、計算を行なう。温度・圧力・含水量・酸素分圧の組み合わせの数は 470 万通りである。得られた膨大なデータを、GMT プログラム (Wessel and Smith, 1998) と、別途開発したスクリプト言語とを用いて温度・圧力平面上に等高線として表現したほか、いくつかの有用なパラメータを直接切り出すことにより、マグマの圧縮性 (バルクモジュラス) の圧力・含水量依存性などのグラフを作成した。Rhyolite-MELTS による出力結果を、既往文献のデータや本研究の分析値と比較比較することにより、マグマの温度・圧力・含水量に対して一定の制約を与えることができる (図 2.29)。なお 4KC-03 (Hunter, 1998) の組成は以下のとおりである。SiO₂=52.82, TiO₂=1.19, Al₂O₃=20.32, FeO=8.96, MnO=0.19, MgO=3.98, CaO=6.82, Na₂O=3.40, K₂O=1.28, P₂O₅=0.97, 合計=99.93 (重量%)。

阿蘇-1 火砕流に先行する最初期の降下火砕物 (Aso2014a-B) に含まれる磁鉄鉱およびチタン鉄鉱の化学組成にもとづいて、平衡温度と酸素分圧を ILMAT (Lepage, 2003) を用いて計算した結果、温度は 885±20°C、酸素分圧は FMQ+0.2 ログユニットであることが示された (図 2.2-30)。阿蘇のマグマの温度は、阿蘇-2 から阿蘇-4 に向かって輝石温度が低下する傾向があるが (金子・他, 2006; 古川・他, 2006)、観測された温度の大半は 900–1000°C の間に集中しているから、本研究が得た 880°C は先行研究と調和的である。なお、産総研 (2014) の報告では FMQ+1.0 ログユニットをマグマの熱力学解析に用いたが、本報告では今年度新たに得られた酸素分圧 (FMQ+0 ログユニット) を使用する。

はじめに阿蘇-1 火砕流およびそれに先行する降下火砕物の石基ガラスのシリカ濃度が 69±1 重量%と非常に狭い範囲に入ること (図 2.23) を制約条件にする。温度 885°C において 4KC-03 が結晶分化液のシリカ濃度が 69 重量%になる圧力と含水量の関係を調べると、含水量が 0.5 重量%、1 重量%、1.5 重量%のときにそれぞれ 6.5 あるいは 11.5 kbar 付近、7 あるいは 15.5 kbar 付近、7.7 あるいは 16 kbar 付近となり (図 2.2-31)、含水量が 2.5 重量%以上の場合には条件が再現されない (図 2.2-32) ことがわかった。

つぎに、石基ガラスと斑晶ガラス包有物の酸化カリウム濃度が 5.5 重量%に集中していること (図 2.25) を制約条件と考え、温度 885°C において 4KC-03 が結晶分化液のカリウム濃度が 6–6 重量%程度となる圧力と含水量の関係を調べると、含水量 0.5 重量%では描画した範囲のすべての圧力で再現でき (図 2.2-35)、含水量 1 重量%では 5 kb 付近と 0.5 kb 以下の圧力で再現できる、含水量 1.5 重量% (図 2.2-36) 以上では 0.5 kb 以下の低圧条件が必要とされることがわかる。シリカとチタンとカリウムより、含水量 0.5–1 重量%、圧力 5–7 kb と考えられる。マグマの含水量が 0.5 重量%の時の、4KC-03 メルトのカリウムのハーカー図 (図 2.2-39) に示されるメルトの化学組成変化傾向は、圧力 6–8 kbar の時に観測された斑晶ガラス包有物や石基ガラスに向かうことがわかる。

同様に、石基ガラスの酸化チタン濃度が 0.63 重量%に集中していること (図 2.2-19 の緑色の点) と、斑晶ガラス包有物は 0.63 重量%に集中しつつ 1.2 重量%位まで分布が広がっていること (図 2.2-19 の赤色の点) を制約条件と考え、温度 885°C において 4KC-03 が結晶分化液の酸化チタン濃度が 0.5–0.75 重量%程度となる圧力範囲と含水量の関係を調べると、含水量 0.5 重量%、1 重量%、2.5 重量%のときそれぞれ 0.5–5 kbar, 0.5–7 kbar (図 2.2-33), 0.5–1 kbar と 12 kbar 以上 (図 2.2-34) である。シリカとチタンにより、含水量 0.5–1 重量%、圧力 6–7 kbar

の範囲が示される(示される圧力が近いがオーバーラップしない場合には圧力範囲を拡張する)。マグマの含水量が 0.5 重量%の時の、4KC-03 メルトのチタンのハーカー図(図 2.2-40)に示されるメルトの化学組成変化傾向は、圧力 5~6kbar の時に観測された斑晶ガラス包有物や石基ガラスに向かうことがわかる。

さらに、斜長石斑晶の分析値の An 組成が 40~60mol%(ピークは 51mol%)であり、57 と 70mol% にも小さなピークがある(図 2.2-27)ことを制約条件と考え、また、斜長石の累帯構造が化学拡散で鈍らないことを加味して、温度 885℃あるいはそれ以上において 4KC-03 から晶出する斜長石の An 組成を再現しうる圧力と含水量の関係を調べる。含水量 0.5 重量%の場合には、圧力 5kbar 以下温度 885℃において An 組成が 40~47mol%となり、これよりも高温低圧では An 組成は 70mol%まで上昇しうるということがわかる(図 2.2-37)。含水量 1 重量%の場合には、圧力 6.2kbar 以下温度 885℃において An 組成が 40~49mol%となり、それより高温低圧で An 組成は 72mol%まで上昇しうるということがわかった。含水量 5 重量%では圧力 1.5kbar 以下温度 885℃において An 組成が 45~55mol%となり、より高温では An 組成が 82mol%まで上昇しうる(図 2.2-38)。4KC-03 メルトのナトリウムのハーカー図に示されるメルトの化学組成変化傾向は、マグマ含水量 0.5 重量%で圧力 6~8kbar の条件では観測された斑晶ガラス包有物や石基ガラスに向わないが(図 2.2-41)、マグマ含水量を 1.5 重量%に増やすと 5~7kbar で観測されたメルト組成に向かう変化をみせる(図 2.2-42)。

以上のように鉄チタン酸化物鉱物温度計と、石基ガラスのシリカ、チタン、カリウム、そして斜長石の An 組成から、噴出前の阿蘇-1 マグマの温度は約 885℃、圧力は 5~7kbar の条件で、含水量 0.5~1 重量%程度の比較的水に乏しいマグマが分化した可能性が示された。但し斜長石斑晶の累帯構造に記録された高 An 組成の存在は、分化前のマグマが比較的高温・高含水量であったことを示唆する。すなわち阿蘇-1 の噴火には低温低含水量のマグマと、高温高含水量マグマの両方が関与したとみられる。両マグマが同源ならば、高温高含水量マグマの脱水冷却によって低温低含水量マグマが生じたのだろう(低温マグマから高温マグマを導くことは困難)。しかしながら、圧力 5~7kbar ではメルトには 10 重量%以上の水が溶解するため(Newman and Lowenstern, 2002)、地下深くの高含水量マグマを(固化以外の方法で)脱水させることは困難である。そこで低含水量マグマを大量生産するメカニズムとして、火道内マグマ対流脱ガス(Kazahaya et al., 1994)を採用する。火道内マグマ対流脱ガスにおいては、高含水量マグマが地表付近に上昇し、低圧で水に飽和・脱水後、再び地下深くに沈む。含水量 0.5, 1, 2.5, 5 重量%のマグマのバルクモジュラス(圧縮率)の深さ変化、飽和水量の深さ変化、密度の深さ変化、そして含水量 5 重量%と 0.5 重量%のマグマの密度差の深さ変化を、それぞれ図 2.2-43, 図 2.2-44, 図 2.2-45, 図 2.2-46 に示す。図 2.2-46 に示したうち常圧付近を除く全ての圧力において、含水量 0.5 重量%のマグマは 5 重量%のものよりも高密度であるため(地下 8~12km(2~3kbar)では特に密度差が大きい)、火道内マグマ対流脱ガスは長期間安定して起こり、脱ガスマグマを生産すると考えられる。単位時間あたりの脱ガスマグマの生産速度は、単位時間あたりの火山ガス(二酸化硫黄など)放出量を、マグマの火山ガス(二酸化硫黄)濃度で割った値になる。阿蘇における二酸化硫黄臭放出量は 500~1000 トン/日程度と報告されており(気象庁; 予知速報)、マグマの二酸化硫黄濃度を 0.1~0.2 重量%程度と仮定すると、脱ガスマグマの生産量は 250~750 キロトン/日であり、間をとって 0.5 メガトン/日とすると、1 年間に生産される脱ガスマグマの重量は約 180 メガトンであるから、体積は 0.09(密度 2.0)~0.07(密度 2.5)立方キロと見積られる。MELTS によると、4KC-03 の結晶化により生じる珪長質マグマの分量は、脱ガスマグマの 4~5 分の 1 程度である。もしも過去にも 0.5 メガトン/日の速度で脱ガスマグマが生産されているならば、冷却・結晶化により生じる珪長質マグマの量は、1 万年あたり 140~180 立方 km と見積られる。

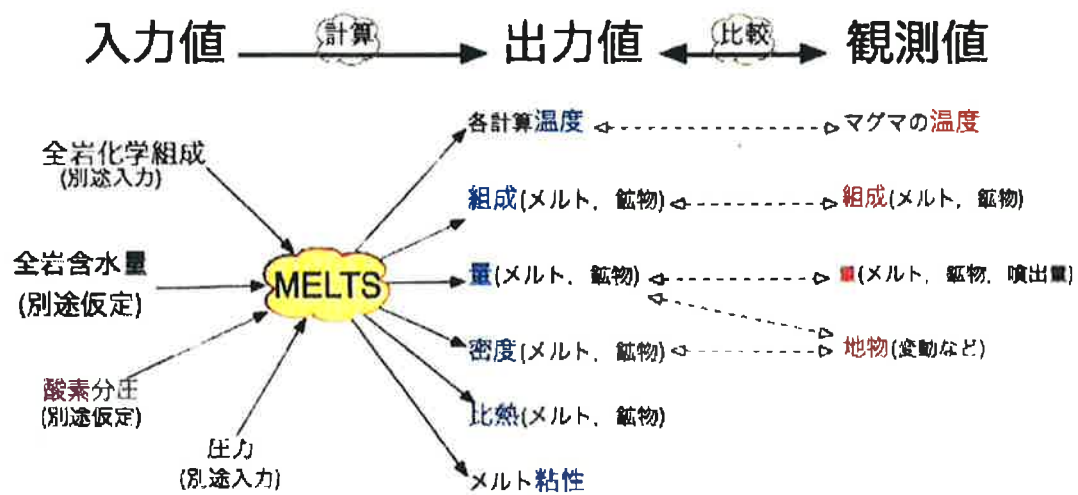


図 2.2-29 : MELTS (Ghiorso and Sack, 1995) を用いたマグマの温度・圧力・含水量推定。

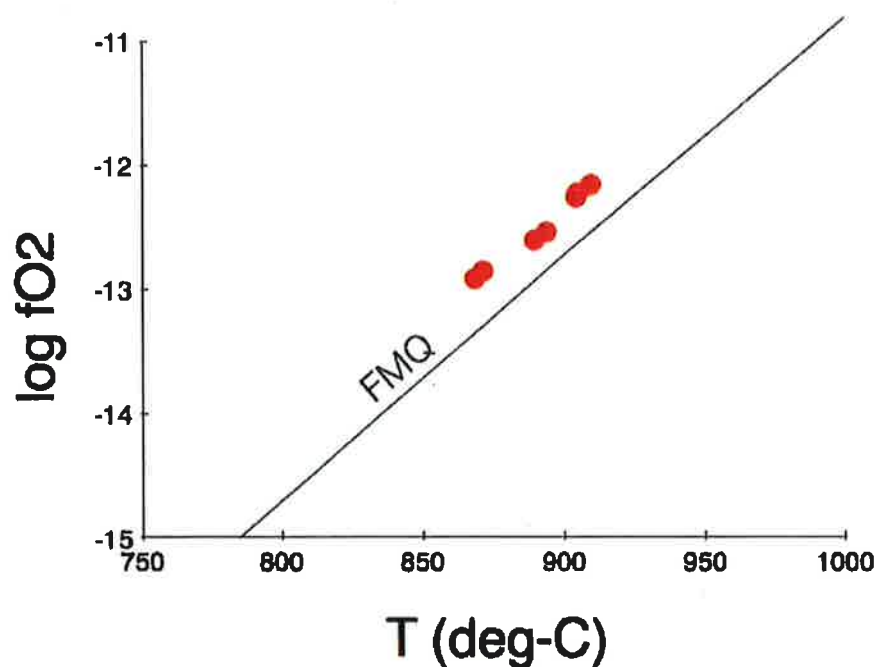


図 2.2-30 : 阿蘇-1 火砕流堆積物の最下位にある降下火砕物 (Aso2014a-B) に含まれる磁鉄鉱およびチタン鉄鉱の化学組成にもとづく平衡温度と酸素分圧。ILMAT (Lepage, 2003) を使用。熱力学モデルは Andersen and Lindsley (1985) によった。

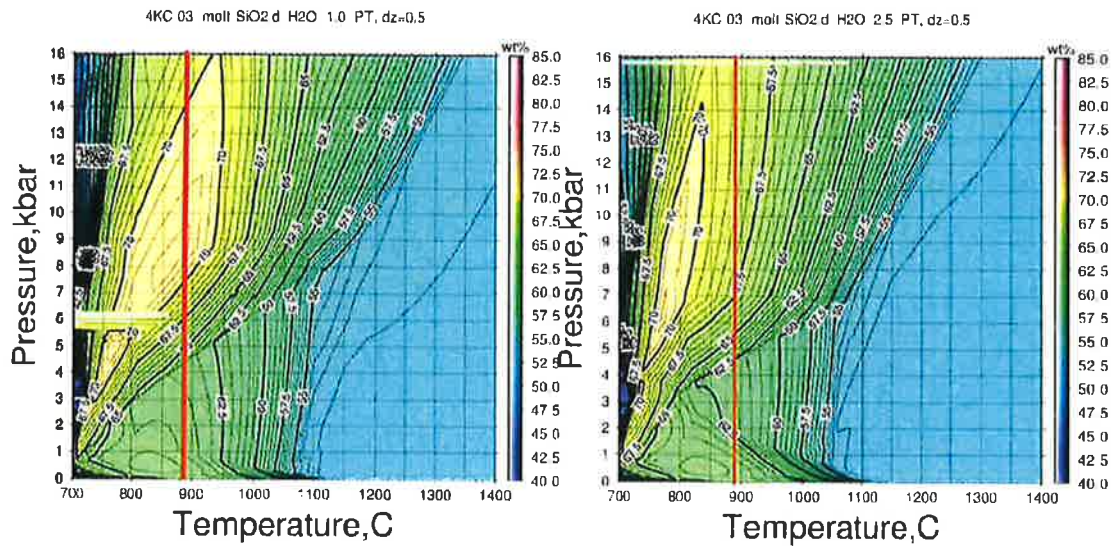


図 2.2-31(左) : 4KC-03 のメルトのシリカ濃度の温度・圧力依存性. マグマのバルク含水量 1 重量%. 温度 885°C 圧力 7.2kbar 付近の条件で, メルトのシリカ濃度が 69 重量%になる.

図 2.2-32(右) : 4KC-03 のメルトのシリカ濃度の温度・圧力依存性. マグマのバルク含水量 2.5 重量%. 温度 885°C の条件では, メルトのシリカ濃度は 69 重量%にならない.

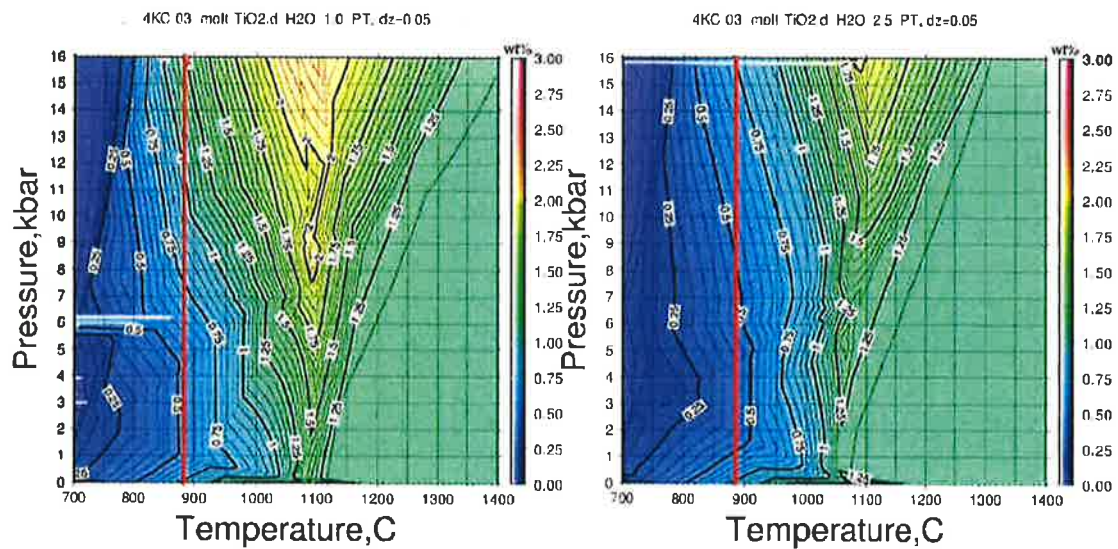


図 2.2-33(左) : 4KC-03 のメルトの酸化チタンの濃度の温度・圧力依存性. マグマのバルク含水量 1 重量%. 温度 885°C 圧力 0.5~7kbar 付近の条件で, メルトの酸化チタン濃度が 0.5~0.75 重量%になる.

図 2.2-34(右) : 4KC-03 のメルトの酸化チタンの濃度の温度・圧力依存性. マグマのバルク含水量 2.5 重量%. 温度 885°C 圧力 0.5~1kbar と 12kbar 以上付近の条件で, メルトの酸化チタン濃度が 0.5~0.75 重量%になる.

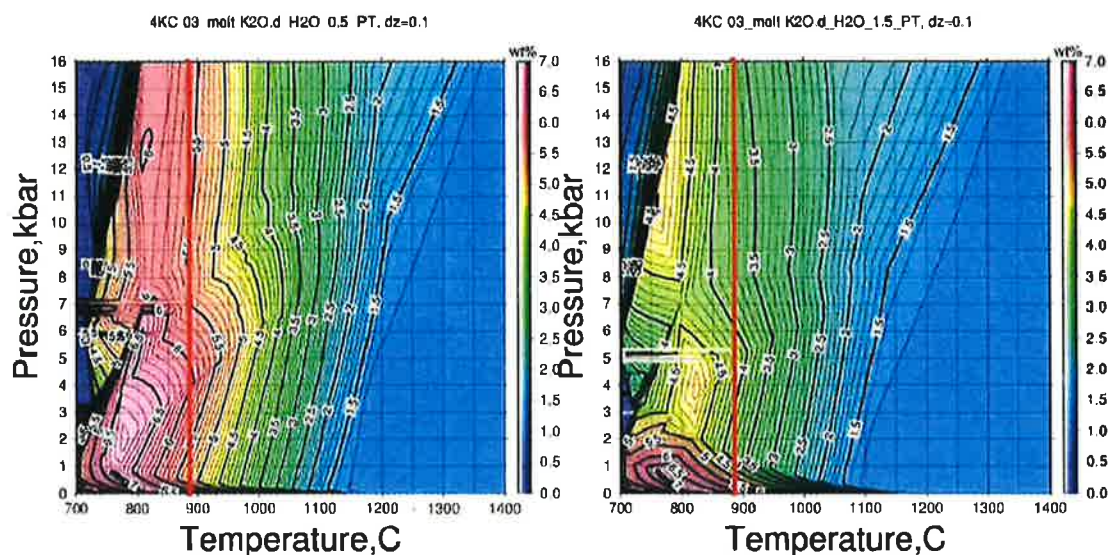


図 2.2-35(左) : 4KC-03 のメルトの酸化カリウムの濃度の温度・圧力依存性. マグマのバルク含水量 0.5 重量%, 温度 885°C の条件では, 描画した全範囲の圧力においてメルトの酸化カリウム濃度が 5~6 重量%になる.
 図 2.2-36(右) : 4KC-03 のメルトの酸化カリウムの濃度の温度・圧力依存性. マグマのバルク含水量 1.5 重量%, 温度 885°C の条件でメルトの酸化カリウム濃度が 5~6 重量%になるためには, 0.5kb 以下の低圧条件が必要になる.

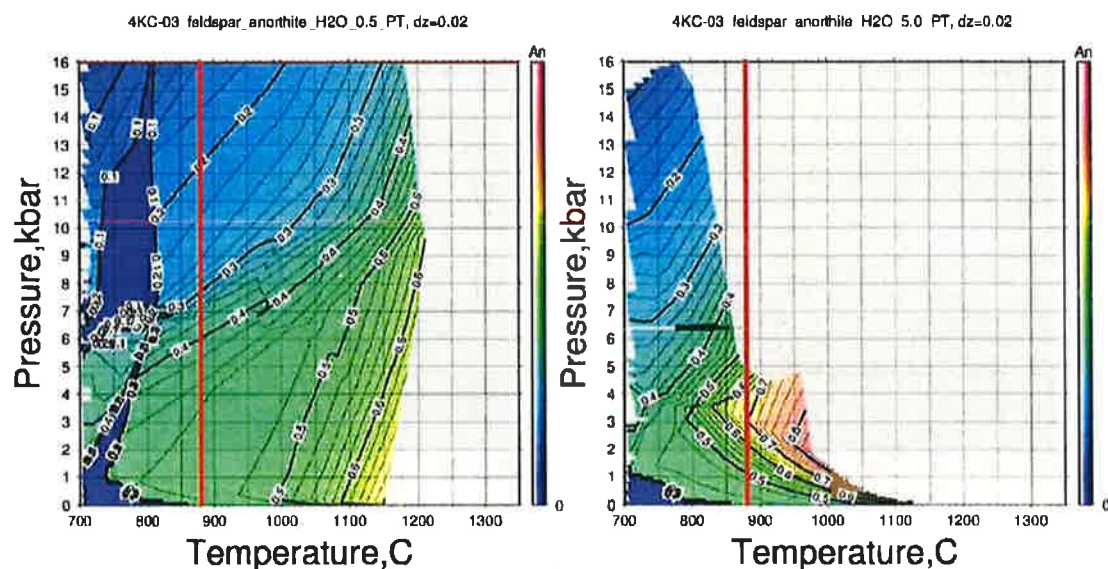


図 2.2-37(左) : 4KC-03 から晶出する斜長石の An 組成の温度・圧力依存性. マグマのバルク含水量 0.5 重量%. 圧力 5kbar 以下温度 885°C において An 組成が 40~46mol%となる. より高温低圧の領域で An 組成は最大 70mol%になる.
 図 2.2-38(右) : 4KC-03 から晶出する斜長石の An 組成の温度・圧力依存性. マグマのバルク含水量 5 重量%. 1.5kbar 以下温度 885°C において An 組成が 45~55mol%となる. より高温の領域で An 組成は最大 82mol%となる.

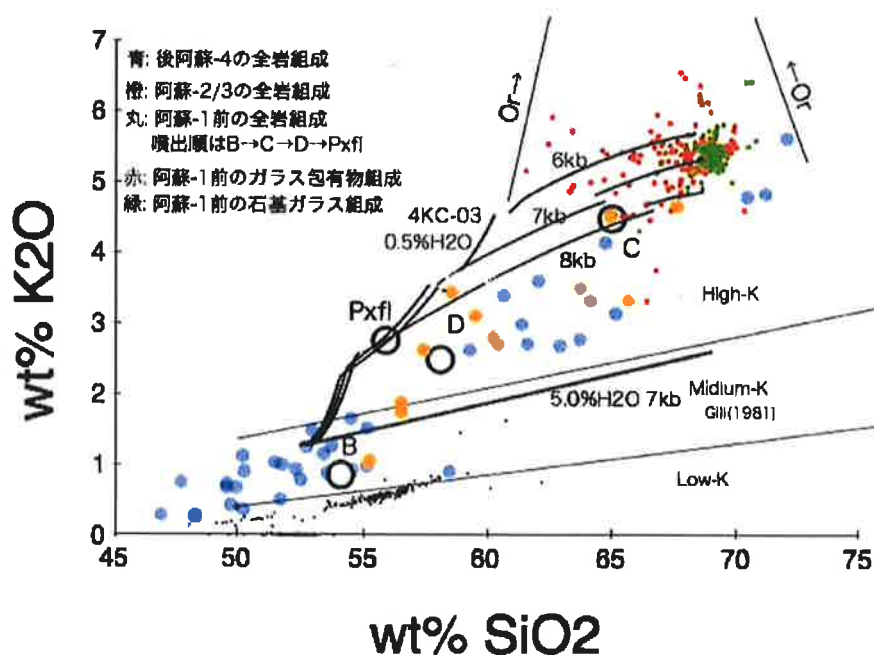


図 2.2-39 : MELTS で計算した 4KC-03 メルトのカリウムのハーカー図(図 2.22 に上書き). 温度は 885°C, 圧力は 6kbar, 7kbar, および 8kbar, マグマのバルク含水量 0.5 重量%の例. 圧力 7kbar 含水量 5 重量%の例も示した.

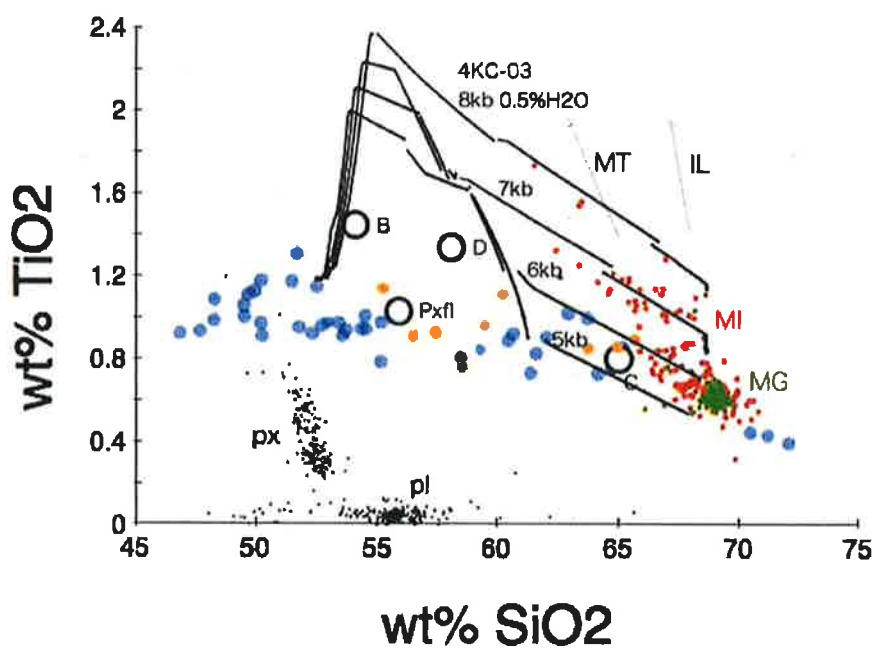


図 2.2-40 : MELTS で計算した 4KC-03 メルトのチタンのハーカー図(図 2.2-19 に上書き). 温度は 885°C, 圧力は 5kbar, 6kbar, 7kbar, および 8kbar, マグマのバルク含水量 0.5 重量%の例.

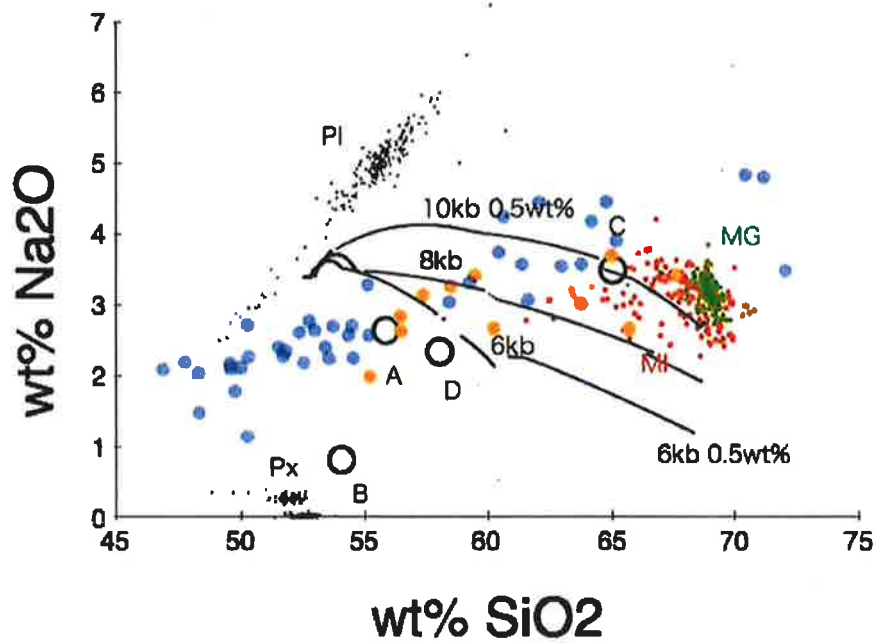


図 2.2-41 : MELTS で計算した 4KC-03 メルトのナトリウムのハーカー図(図 2.21 に上書き)。温度は 885°C, 圧力は 6kbar, 8kbar, および 10kbar, マグマのバルク含水量 0.5 重量%の例。

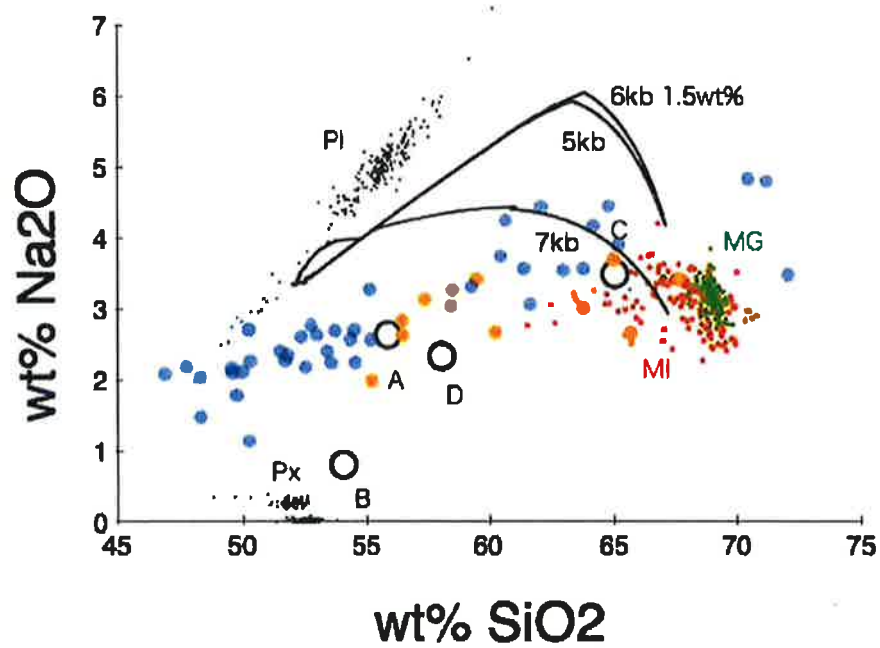


図 2.2-42 : MELTS で計算した 4KC-03 メルトのナトリウムのハーカー図(図 2.21 に上書き)。温度は 885°C, 圧力は 5kbar, 6kbar, および 7kbar, マグマのバルク含水量 1.5 重量%の例。

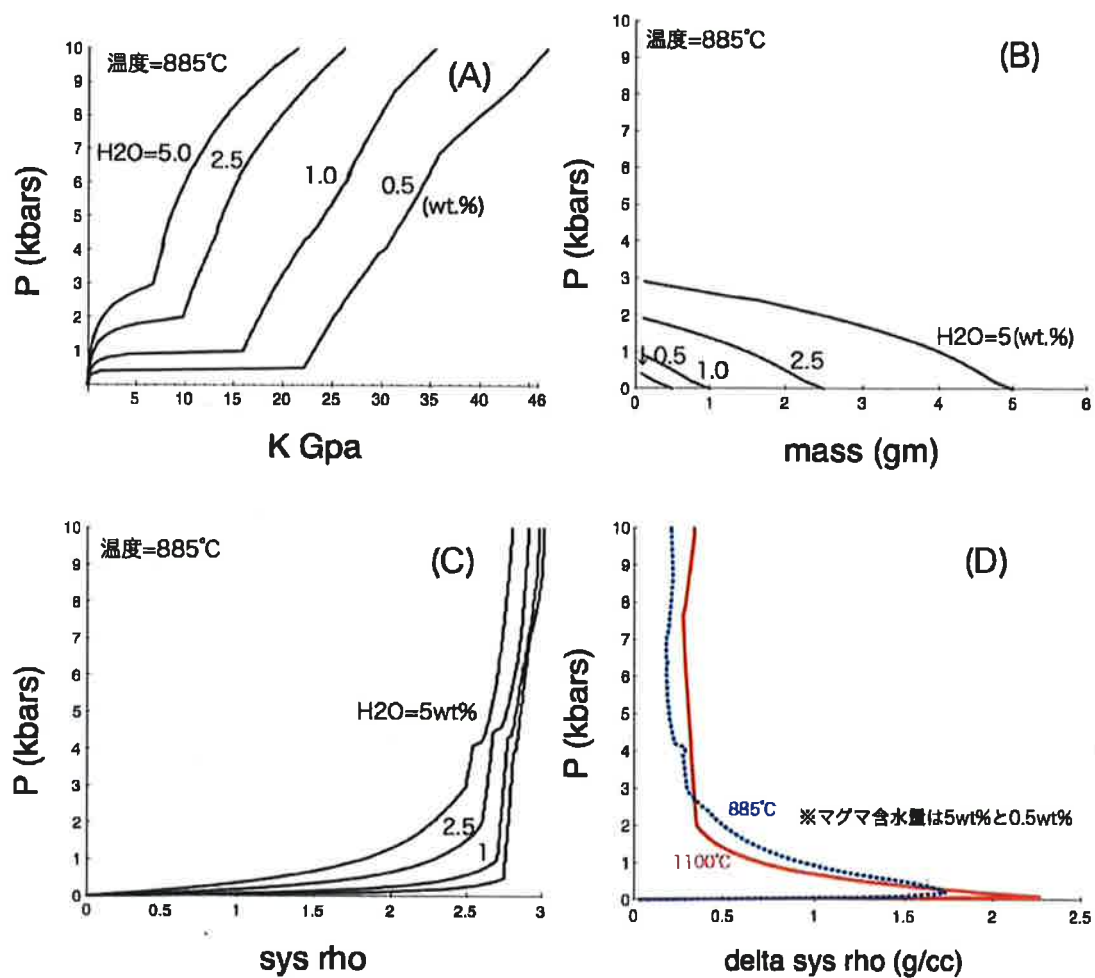


図 2.2-43 (A) : 阿蘇のマグマ (4KC-03) のバルクモジュラス (圧縮性) の圧力依存性. 温度条件は 885°C , 含水量は 5, 2.5, 1, 0.5 重量%とした.

図 2.2-44 (B) : 阿蘇のマグマ (4KC-03) の過飽和の水の量 (重量%) の圧力依存性. 温度条件は 885°C , 含水量は 5, 2.5, 1, 0.5 重量%とした.

図 2.2-45 (C) : 阿蘇のマグマ (4KC-03) の密度の圧力依存性. 温度条件は 885°C , 含水量は 5, 2.5, 1, 0.5 重量%とした.

図 2.2-46 : 含水量 5% と 0.5% の阿蘇のマグマ (4KC-03) の密度差 (g/cc) の圧力依存性. 温度条件は 885°C と 1100°C とした.

33

SO₂ 脱ガス率:
500~1000トン/日

高温無斑晶質
安山岩??

長径25km

脱ガス玄武岩:
180×10⁴トン/年

珧長質マグマ
(高含水量, 高K₂O)

【深度20~28km】
【温度890°C】

←1万年で140~180立方キロ増えうる(潜在能力)

密度中立?

珧長質マグマの5倍体積の円盤を表現
(形状は、直径10倍厚み半分の例)

脱ガスマグマ

分化前: (低含水量, 低K₂O, 苦鉄質)
分化後: (高含水量, 高K₂O, 珧長質)

深部由来の未分化マグマ
(高含水量, 低K₂O, 苦鉄質)
(SO₂ 0.2wt%?)

図 2.2-47: 阿蘇のマグマ供給系の作業モデル。低含水量マグマを効率的に大量生産するメカニズムとして、本研究では火道内マグマ対流脱ガス(Kazahaya et al., 1994)を採用する。具体的には、比較的高含水量で苦鉄質なマグマが浮力によって地表付近まで上昇し、低压で水に飽和・脱水後、比重差によって地下深くに沈んで地下 20~28km に蓄積され、冷却・結晶化によって脱ガスマグマの 4~5 分の 1 量の珧長質メルトが生産される。仮に現在の阿蘇中岳における火山ガスの放出率を適用すると、脱ガスマグマの生産率は 1 年あたり 180 メガトンと見積られ、脱ガスマグマから生じる珧長質マグマの量は、1 万年あたり 140~180 立方 km となった。

文献

- Andersen, D. and Lindsley, D. (1985). New (and final!) models for the Ti- magnetite/ilmenite geothermometer and oxygen barometer. *Eos*, 66:416.
- Asimow, P.D. and Ghiorso, M.S. (1998) Algorithmic Modifications Extending MELTS to Calculate Subsolidus Phase Relations. *Amer. Mineral.*, 83, 1127-1131.
- 古川邦之・金子克哉・小屋口剛博・鎌田浩毅 (2006) 阿蘇火山における大規模および小規模噴火活動の岩石学的特徴. 月刊地球, 28, 386-391.
- Ghiorso, M. S. and Sack, R. O. (1995). Chemical mass transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 119:197-212.
- Gill, J. (1981). *Orogenic Andesite and Plate Tectonics*. Springer-Verlag, New York.
- Gualda G.A.R., Ghiorso M.S., Lemons R.V., Carley T.L. (2012) Rhyolite-MELTS: A modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *Journal of Petrology*, 53, 875-890.
- Hunter, A. G. (1998) Intracrustal controls on the coexistence of tholeiitic and calc-alkaline magma series at Aso volcano, SW Japan. *Jour. Petrol.*, 39, 1255-1284.
- 井上和久・金子克哉・小屋口剛博・芳川雅子・柴田知之・古川邦之・鎌田浩毅 (2006) 阿蘇火山における Aso-3 大規模噴火をもたらしたマグマ溜まりの形成過程. 月刊地球, 28, 392-399.
- 金子克哉・小屋口剛博・古川邦之 (2006) 阿蘇火山におけるマグマ供給系の長期的変化. 月刊地球, 28, 67-74.
- 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.
- Kazahaya, K., Shinohara, H., and Saito, G. (1994). Excessive degassing of Izu- Oshima volcano: magma convection in a conduit. *Bull. Volcanol.*, 56:207-216.
- Lepage, L. D. (2003). ILMAT: an excel worksheet for ilmenite-magnetite geothermometry and geobarometry. *Comput. Geosci.*, 29(5):673-678.
- 町田洋・新井房夫. (1992). 火山灰アトラス: 日本列島とその周辺. 東京大学出版会. 松本哲一・宇都浩三・小野晃司・渡辺一徳 (1991) 阿蘇火山岩類の K-Ar 年代測定—火山層序との整合性と火砕流試料への適応—. 日本火山学会講演予稿集, 1991, 73.
- 宮縁育夫・星住英夫・高田英樹・渡辺一徳・徐 勝 (2003) 阿蘇火山における過去約 9 万年間の降下軽石堆積物. 火山, 48, 195-214.
- 宮縁育夫・星住英夫・渡辺一徳 (2004) 阿蘇火山における更新世末期, AT 火山灰以降のテフラ層序. 火山, 49, 51-64.
- Miyabuchi, Y. (2009). A 90,000-year tephrostratigraphic framework of Aso Volcano, Japan. *Sedimentary Geology*, 220(3-4):169-189
- Miyagi, I., Itoh, J., Hoang, N., and Morishita, Y. (2012). Magma systems of the Kutcharo and Mashu volcanoes (NE Hokkaido, Japan): Petrogenesis of the medium-K trend and the excess volatile problem. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 231-232:50-60.
- Miyoshi, M., Takenaka, T., and Sano, T. (2005). Genetic relationships of the compositionally diverse magmas from aso post-caldera volcanism. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 50:269-283 (in Japanese with English abstract).
- Newman, S. and Lowenstern, J. B. (2002). VolatileCalc: a silicate melt- H₂O-CO₂ solution model written in Visual Basic for excel. *Comput. Geosci.*, 28:597-604.
- 小野晃司・松本健夫・宮久三千年・寺岡易司・神戸信和 (1977) 竹田地域の地質. 地域地質研究報告, 5 万分の 1 図幅, 地質調査所, 145p.
- 小野晃司・渡辺一徳・星住英夫・高田英樹・池辺伸一郎 (1995) 阿蘇火山中岳の灰噴火とその噴出物. 火山, 40, 133-151.
- Ono, K., Watanabe, K., Hoshizumi, H. and Ikebe, S. (1995) Ash eruption of the Naka-dake crater, Aso volcano, southwestern Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 66, 137-148.
- 産業技術総合研究所 (2014) 平成 26 年度 火山影響評価に係る技術的知見の整備.

渡辺一徳 (2001) 阿蘇火山の生い立ち―地質が語る大地の鼓動―. 一の宮町史 自然と文化阿蘇選書 7, 一の宮町, 241p.

Wessel, P. and Smith, W. (1998). New, improved version of generic mapping tools released. EOS Trans. Amer. Geophys. U., 79(47):579.

2. 3 支笏カルデラの大規模噴火事例の検討

【実施内容】

支笏カルデラについては、平成 25 年度までの調査結果を整理するとともに、地表踏査に加えてボーリング掘削調査を実施し、支笏火砕流噴火に先行する火山噴出物の存在確認と、支笏火砕流堆積物の連続試料採取による大規模カルデラ形成噴火の推移の詳細化を行った。また、野外調査では、支笏カルデラ形成以前の長期の火山活動履歴調査のための地質調査および K-Ar 法による火山岩の年代測定を実施した。本研究については、北海道大学に再委託して実施した。

【研究成果】

成果の詳細は、添付の北海道大学平成 26 年度委託研究成果報告書に記載した。

2. 4 インドネシアにおける大規模噴火事例の検討

【実施内容】

インドネシアのカルデラ形成噴火では、これまでの調査研究によりインドネシアのカルデラ火山では成層火山体を建設するステージからカルデラ形成噴火に至る数千年間で噴出率、噴火様式、マグマの性質に変化が見られることがわかりつつある。今年度はインドネシア・ジョグジャカルタで開催された IAVCEI の Cities on Volcanoes 8 に参加して、情報収集を行うとともに、AD1257 年にカルデラ形成噴火を起こしたロンボク島のリンジャニ火山の現地調査を行った。採取したカルデラ形成噴火前後の噴出物の全岩化学組成分析については、北海道大学に再委託して実施した。

【研究成果】

成果の詳細は、添付の北海道大学平成 26 年度委託研究報告書に記載した。