

2.3 阿蘇カルデラ噴出物の岩石学的検討

【実施内容】

阿蘇カルデラでは、カルデラ形成噴火噴出物の岩石学的検討から、昨年度までに深部で水に不飽和だった珪長質マグマが、結晶化により揮発成分を濃縮した後に大規模噴火した可能性を明らかにしてきた。今年度はこれを受け、阿蘇 1 および阿蘇 4 火砕流噴火直前の層序から詳細に採取した試料と後カルデラ期の珪長質マグマを比較することにより、現在の阿蘇カルデラの珪長質マグマシステムの成因を検討した。

その結果、阿蘇カルデラで最初の大規模火砕流噴火である阿蘇 1 噴火に先行して噴出したマグマは、揮発成分に飽和しており、由来した深度は、時間とともに浅くなったこと(12→8km)がわかった。阿蘇カルデラの最大規模の火砕流噴火である阿蘇 4 噴火に先行して噴出したマグマは、揮発成分に飽和あるいは不飽和で、これに比較的カリウム濃度に乏しく揮発成分に富むマグマが混入したことがわかった。阿蘇の後カルデラ期の最新珪長質活動である ACP1 のマグマは、揮発成分に不飽和であり、噴出物が由来した深度は、噴火の進行とともに深くなった(6km→20km)ことがわかった。

【調査・研究成果】

(1) 試料

阿蘇では名前の付いたテフラユニットが 100 以上あり、場合によっては、1 つのテフラユニットが 100 以上の層から構成される。したがって、名前のついていない層序を含む阿蘇の降下火砕物の枚数は少なくとも 1000 を下らない。本報告ではこの中から、大規模火砕流噴火に先行して噴出した降下火砕物と、阿蘇の最新の珪長質マグマの降下火砕物に限定して、13 の試料を選別した(図 2.3-1, 表 2.3-1)。

Aso-1P グループは、阿蘇カルデラで最初の大規模火砕流噴火である Aso-1A の直前に噴出した一連の降下軽石層(Tajima et al, 2017)である(表 2.3-1, 図 2.3-1)。試料 14a-B は、厚さ約 40 cm の最下層からのもので、1~2 cm (最大 10~15 cm)の白~淡桃色の軽石でできており、基質支持で、基盤のローム覆う。この軽石層は厚さ 20cm の火山灰層に覆われる。阿蘇カルデラの最大規模の火砕流噴火である阿蘇 4 噴火に先行して噴出したマグマには、比較的カリウム濃度に乏しく揮発成分に富むものが混入したこと、14a-C は、14a-B の火山灰層を覆う、層厚約 10cm の黒色降下火山灰層である。14a-D は、白から茶色の軽石に富む層と暗灰色の火山灰の互層の、底部から約 20cm で採取された。この層の総厚は約 70cm である。14a-E は、厚さ約 5 cm の灰色降下火山灰層で、上記の黒色降下火山灰層を覆う。本層には、最大直径約 2cm のピソライトが含まれる。

Aso-1A は、阿蘇カルデラで最初の大規模火砕流噴火である(表 2.3-1, 図 2.3-1)。試料 14a-A は、Aso-1A の溶接火砕流堆積物の底部の、非熔結部から採取された。本試料の位置は溶接部から約 2 メートル離れているが、堆積後の徐冷による影響を受けた可能性があり、この試料の分析値には注意が必要である。

阿蘇 Aso-1B, -2, および -3 は、本研究では取り扱わなかった。これらの層準の試料については、噴火後の冷却速度が遅いことが予想され、拡散による水素の損失が起きている可能性が高

い。具体的には、Aso-1B (スコリア流)、Aso-2A (軽石流)、Aso-2B (スコリア流)、Aso-3A (軽石流)、Aso-3B (スコリア流)、Aso-3C (スコリア流)である。

表 2.3-1 : 阿蘇火山の主要なカルデラ噴火と本研究で使用した試料。pfa : 降下軽石, pfl : 軽石流, sfa : 降下スコリア, sfl : スコリア流, ol : かんらん石, px : 輝石, hb : 角閃石, bi : 黒雲母。試料採取地点の緯度経度は(WGS84 表記), 1 (32.8805, 131.0844); 2 (32.9076, 131.0291); 3 (32.8890, 131.2045); 4 (32.8393, 131.2464); 5 (32.9355, 131.1498)である。参考文献は以下のとおり。a (Saito et al, 2018); b (Miyabuchi, 2017); c (Miyabuchi, 2009); d (Hoshizumi et al., 2002); e (Ono et al, 1977); f (Tajima et al, 2017); g (Kaneko et al, 2007); h (Kaneko et al, 2015); i (Hunter, 1998); j (Ushioda et al, 2020)。

Cycle	sub-unit	age	VEI	product	mafic mineral	SiO ₂ wt%	Sample	Loc.	Ref.
AsoCC	2014sc	2014	-	sfa	px,ol	54	2014sc	1	a
	ACP1	4.1 ka	-	sfa-pfa	px,bi,ol	56-70	16g-E, ACP1-H/-M/-L	2	b
	YmS11	18-21 ka	3	sfa	px,ol	48	98S11	3	c
	Kpfa	30 ka	5	pfa	px	65	98P2F	3	c
Aso-4	4KS			sfl	hb,px,ol	50-52	-	-	
	4A	88 ka	8	pfl	hb,px,ol	67-70, 52	15q-A	4	c, d, e, g, i, j
	4X			pfa,pfl	bi,px,hb	68-69	15q-C/-D/-E/-F	4	
Aso-3	3C			sfl	px	55-56	-	-	
	3B	133ka	7	sfl	px	57-67	-	-	e, h, i
	3A			pfl	px	63-69	-	-	
Aso-2	2B			sfl	px	56-60	-	-	
	2A	140 ka	6-7	pfl	px	66	-	-	e, i
Aso-1	1B			sfl	px	50	-	-	
	1A	270 ka	7	pfl	px	65-68	14a-A	5	e, f
	1P			pfa	px	55	14a-E/-D/-C/-B	5	

Aso-4X グループは、一連の降下軽石と、Aso-4A 軽石流に先行する、薄い軽石流の層である (Hoshizumi et al, 2022, 図 2.3-1)。本層の重要な特徴は、阿蘇では珍しい黒雲母斑晶が含まれることである。試料 15q-F は、Aso-4X 降下軽石堆積物の基底部から採取された。この部分は基質支持の軽石(直径 1~2cm)から構成され、弱い正級化を示す。試料 15q-E は、Aso-4X 降下軽石堆積物の中央部から採取された。層厚は 12cm で、黒曜石の破片を比較的多く含み、粒子支持で、軽石の直径は 0.5~1cm である。試料 15q-D は Aso-4X 降下軽石堆積物の上部から採取された。層厚は約 35 cm, 粒子支持で、軽石の直径は 0.5~1 cm で、上述の中間層に比べて黒曜石の破片の含有量が比較的少ない。試料 15q-C は、Aso-4X 軽石流堆積物の基底部から採取されたものである。本層は Aso-4A の非溶結な軽石流堆積物に覆われる。本層は約 160cm の厚さで、3回繰り返される逆級化構造を示し、2cm 未満の黒曜石破片を含む。試料採取位置は 15q-A と 15q-D の間の、層厚約 50cm で粒子支持の軽石層(直径 0.5-1cm)である。

Aso-4A は阿蘇カルデラの最大規模の火砕流噴火である(表 2.3-1)。試料 15q-A は、Aso-4A の非溶結軽石流堆積物の底部から採取された。この層準に含まれる軽石は直径 2-10cm で、縞模様(灰色と白)を示すものもある。Aso-4 マグマのに含まれる斑晶は、斜長石、単斜輝石、斜方輝石、普通角閃石、およびチタノマグネタイトである(Hunter, 1998)が、試料 15q-A にはかんらん石も含まれた。火砕流堆積物から得られた試料は、噴火後に徐冷されたため、含水量の分析には適さないと考えられる。この火砕流堆積物の最下部には、高温酸化の形跡は認められない

め、堆積直後に水素拡散の閉鎖温度を下回っていると推測されるが、この試料の分析値は慎重に扱う必要がある。

AsoCC は後カルデラの活動である(表 2.3-1)。試料 98P2F は草千里ヶ浜軽石 (Kpfa; 30 ka) であり、後カルデラ期のなかで規模の大きな 2 つの主要な珪質噴火の 1 つである(もう片方は 84ka の野尻軽石である)(宮淵, 2009)。試料 98S11 は、約 18 ka に噴出した YmS11(Miyabuchi, 2009) であり、後カルデラに噴出した降下スコリアの中では最も苦鉄質な組成を示す。試料 16g-E は、基質支持の軽石・スコリアよりなる降下火山灰(ACP1) である。ACP1 は、阿蘇の後カルデラにおける中央火口丘の活動の中で、最新の珪長質マグマ活動である(4.1 ka Miyabuchi, 2017)。本報告で分析した ACP1 の試料は、試料 16g-F と、層厚約 1m の ACP1 降下火砕物より採取した、ACP1-L (下部)、ACP1-M (中央部)、ACP1-H (上部) の 3 段階である。ACP1 には、Aso-4X 同様に、白色～暗灰色の縞状軽石が含まれる。また、Aso-4X 同様に、黒雲母斑晶が含まれる(Miyabuchi, 2017)。

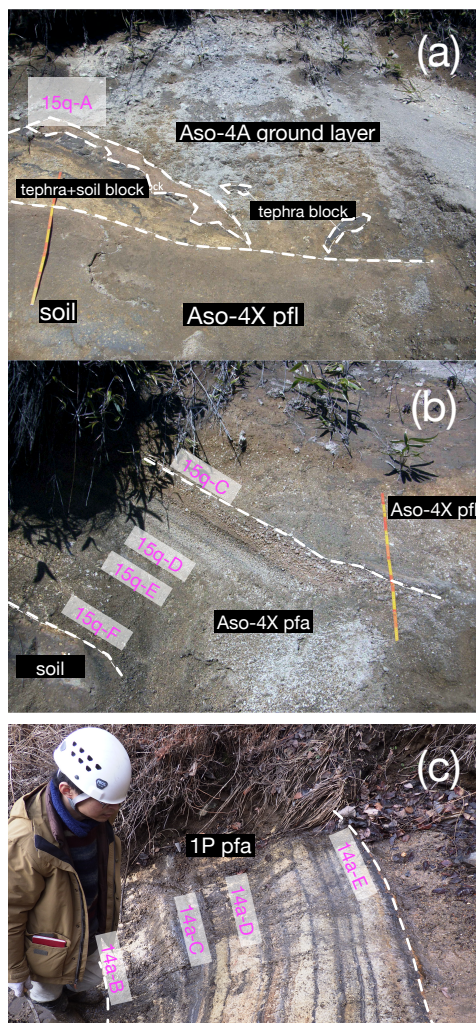


図 2.3-1 : 試料を採取した露頭の写真. Aso-4A : (a), Aso-4X : (b), Aso-1P : (c). 試料の概要は表 2.3-1 にある。

(2) 結果(斑晶ガラス包有物の産状)

本報告で対象とした斑晶ガラス包有物のホスト鉱物は、EPMA 分析数の降順で、斜長石 (519)、斜方輝石 (174)、単斜黒雲母 (173)、かんらん石 (23)、磁鉄鉱 (10)、普通角閃石 (10)、および黒雲母 (2)である。なお比較的サイズの大きな斑晶ガラス包有物に対しては、EPMA 分析を複数行っており、それらのホストと重複分析数は、単斜輝石 (7)、普通角閃石 (3)、かんらん石 (5)、斜方輝石 (2)、および斜長石 (25)となる。ホスト鉱物の化学組成の頻度分布を図 2.3-3 に示す。斑晶ガラス包有物および石基ガラスの化学組成のシリカ濃度の頻度分布を図 2.3-4 に示す。

斜長石中の斑晶ガラス包有物は、ほとんどが透明、淡色で、気泡を含まない(図 2.3-2)。斜方輝石および単斜輝石中の斑晶ガラス包有物については、気泡の目視観察は困難だが、研磨面においてはほとんど気泡も微結晶も含まれず、いくつかの稀な例では、斑晶ガラス包有物は比較的小さな泡 (<1 vol. %)や、包有物中に微細な二次鉱物が観察された。これに対し、かんらん石をホストとする斑晶ガラス包有物は、ほとんどの場合、研磨面で気泡 (~数 vol%)が観察され、斑晶ガラス包有物の内壁付近にはデンドライトが観察されることもある。ホスト鉱物によらず、いくつかの斑晶ガラス包有物は直径の半分以上の気泡を含むものも存在するものや、明らかに割れ目が外部と通じており泡立つものも存在した。そのような斑晶ガラス包有物を NanoSIMS で分析すると、安定した深度プロファイルが得られないため、データから除外した。斑晶ガラス包有物の均質性は、NanoSIMS の二次イオン像で容易に確認することができる。一部の斑晶ガラス包有物については、NanoSIMS 分析に先行して EPMA 分析を行ったため、電子ビームによる損傷領域が観察された。包有物のサイズ大きい場合はこの部分を避けて SIMS 分析を行なった。包有物が小さく、電子ビームによる損傷を回避できない場合や、不均一である場合、そして、炭素バックグラウンドの原因となる「傷」が付近にある場合は、NanoSIMS 分析を断念した。その結果、NanoSIMS による斑晶ガラス包有物の分析数は、斜長石で 303、斜方輝石で 124、単斜輝石で 111、かんらん石で 18、磁鉄鉱で 3、普通角閃石で 3、黒雲母で 1 になった。

(3) 結果(斑晶ガラス包有物の揮発成分濃度)

阿蘇カルデラの斑晶ガラス包有物の含水量は、ほぼゼロから 7 wt%の範囲で、二酸化炭素濃度は、ほぼゼロから 0.24 wt%CO₂ の範囲(大部分は約 0.08 wt%CO₂ 未満)であった。

(4) Aso-1P と Aso-1A の斑晶ガラス包有物

Aso-1P テフラ層(試料 14a-B)の基底部の斑晶ガラス包有物は、比較的カリウムに富み、揮発成分濃度は 160~300 MPa のアイソバリックラインの間に分布する(図 2.3-5)。これらが示す圧力は、噴火の時系列とともに系統的に変化する。すなわち、試料 14a-C の斑晶ガラス包有物は、100~250 MPa の間の圧力を示し、(図 2.3-5-b)、試料 14a-D は 100~250 MPa の間(図 2.3-5-c)で、試料 14a-E の斑晶ガラス包有物は、やや低い 20~200 MPa の圧力を示し(図 2.3-5-d)、試料 14a-A の熔融介在物は、50 MPa の等圧線内にのみ分布する(図 2.3-5-e)。このように Aso-1P から Aso-1A にかけて斑晶ガラス包有物の揮発成分濃度は、K₂O 濃度に明らかな変化を示すことなく、時間とともにプロットの原点に向かって移動する傾向がある。

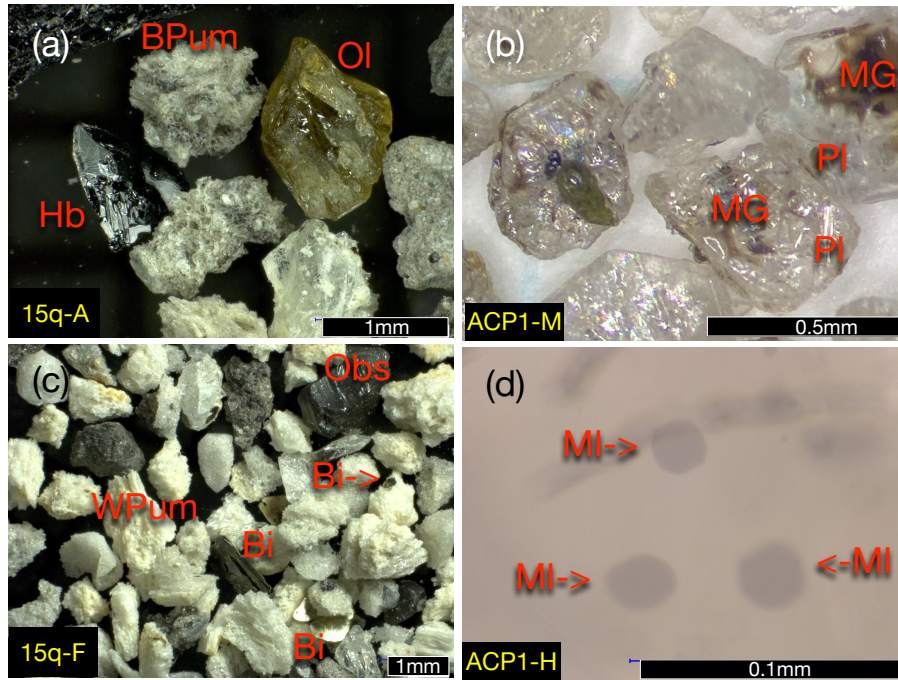


図 2.3-2 : 試料の光学像. (a) : 阿蘇 4A 軽石流の基底付近の非熔結部. 試料 15q-A は縞状軽石 (BPum) を含み, 流紋岩質メルトでコーティングされたかんらん石 (Ol, Mg# 73-78), 角閃石 (Hb) を含む. (b) : ACP1 からハンドピックした斜長石斑晶. 斑晶の表面に付着している淡色～淡茶褐色ガラス (MG) は軽石を構成するガラスと同質である. (c) : 阿蘇 4X 降下火砕物の下部. 試料 15q-F は白色軽石 (WPum), 黒曜石片 (Obs), 黒雲母斑晶 (Bi) を含む. 黒雲母斑晶は白色軽石中に含まれるものと, 単独の遊離結晶がある. (d) : ACP1 からハンドピックした斜長石に含まれる斑晶ガラス包有物の顕微鏡拡大写真. 斑晶ガラス包有物 (MI) は淡い茶褐色で透明感があり気泡を含まない.

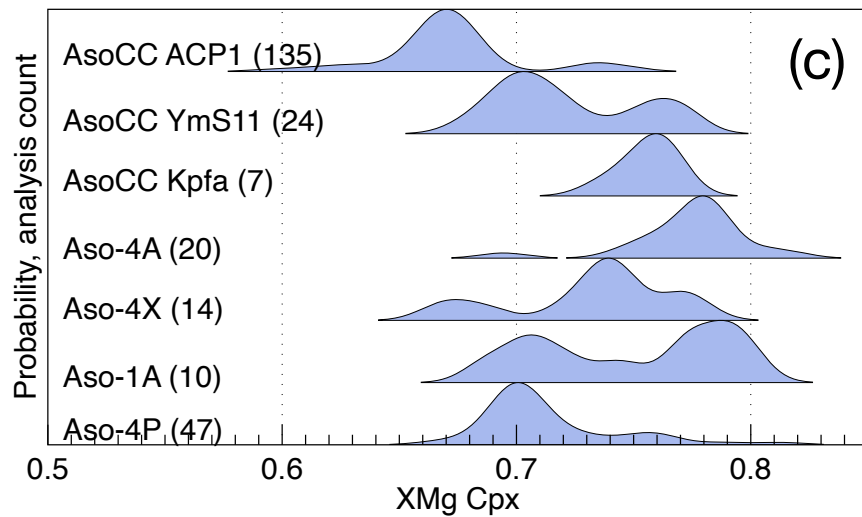
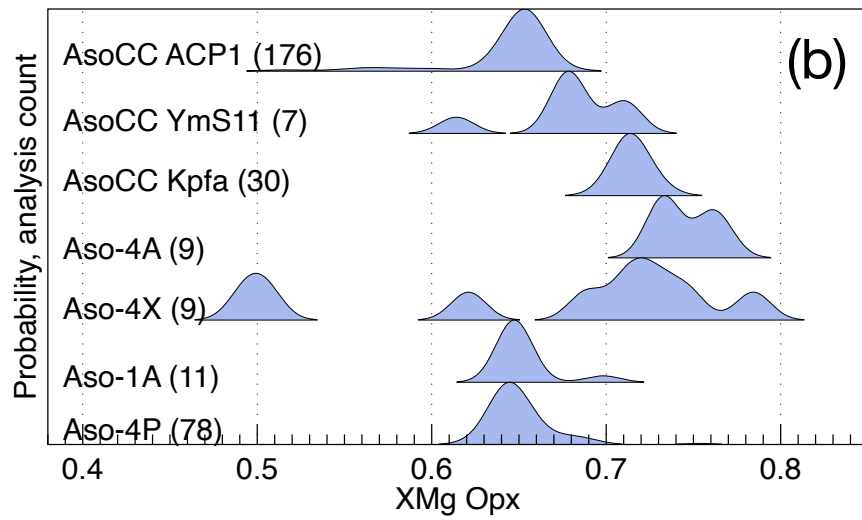
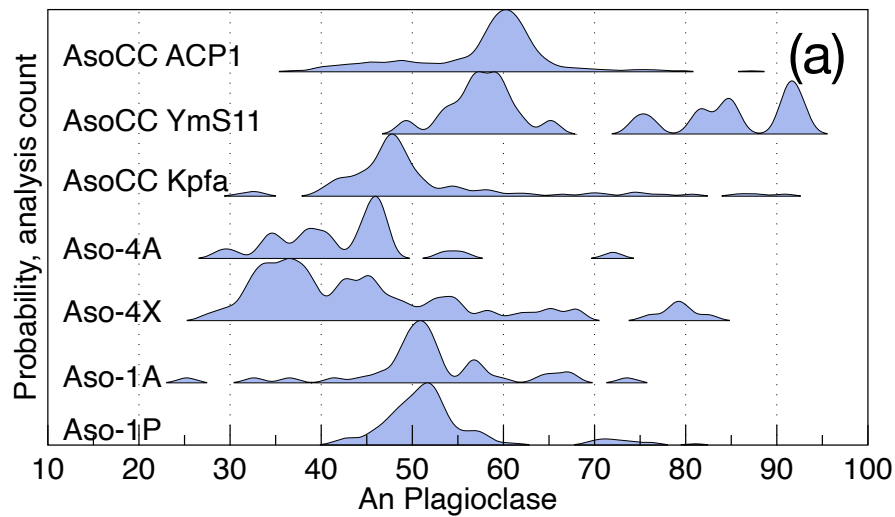


図 2.3-3 : 鉱物化学組成の頻度分布(カーネル密度関数). (a) : 斜長石の An 組成(mol%). (b)と(c)はそれぞれ斜方輝石と単斜輝石の XMg 値.

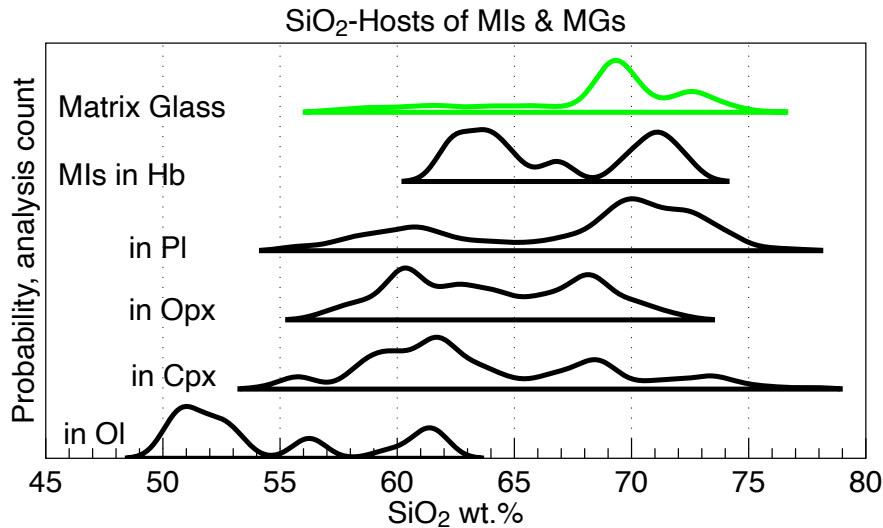


図 2.3-4 : メルトのシリカ濃度の頻度分布.

(5) Aso-4X および Aso-4A

Aso-4X テフラ (試料 15-F) の斑晶ガラス包有物の揮発成分濃度は、200 MPa の等圧線の内側に分布し (図 2.3-6 -a), それらの K₂O 組成は、Aso-1 よりもわずかに低い. 上部の層 (阿蘇カルデラの最大規模の火砕流噴火である阿蘇 4 噴火に先行して噴出したマグマには、比較的カリウム濃度に乏しく揮発成分に富むものが混入したこと, 15-D) のものは、200MPa の等圧線に沿って分布する. 斑晶ガラス包有物の組成から、2つのグループが認識できる. 1つは水に富み、K₂O が多いもの. もう1つは水に乏しく (ただし二酸化炭素は多い)、K₂O が低いもの (図 2.3-6 -c). これらの揮発成分濃度は、200MPa のアイソバリックラインの内側に分布する. Aso-4A 非溶接火砕流堆積物 (試料 15-A) の基底部から採取した斑晶ガラス包有物には、明確な特徴がある. それらは水が多く、K₂O は少なく、200MPa と 300MPa の等圧線の間分布する. 含水量が少ない斑晶ガラス包有物は、他の包有物に比較して K₂O が高いが、この K₂O 濃度は先行するテフラと比べれば低い. これらの揮発成分量が示す圧力は、100~200MPa の間にある. 以上をまとめると、阿蘇の大規模噴火 Aso-4A とそれに先行する Aso-4X においては、低 K₂O と高 K₂O の両方のメルトが噴出しました. それらの斑晶ガラス包有物の揮発成分濃度が示す圧力は、100~300 MPa (主に約 200MPa) に分布する.

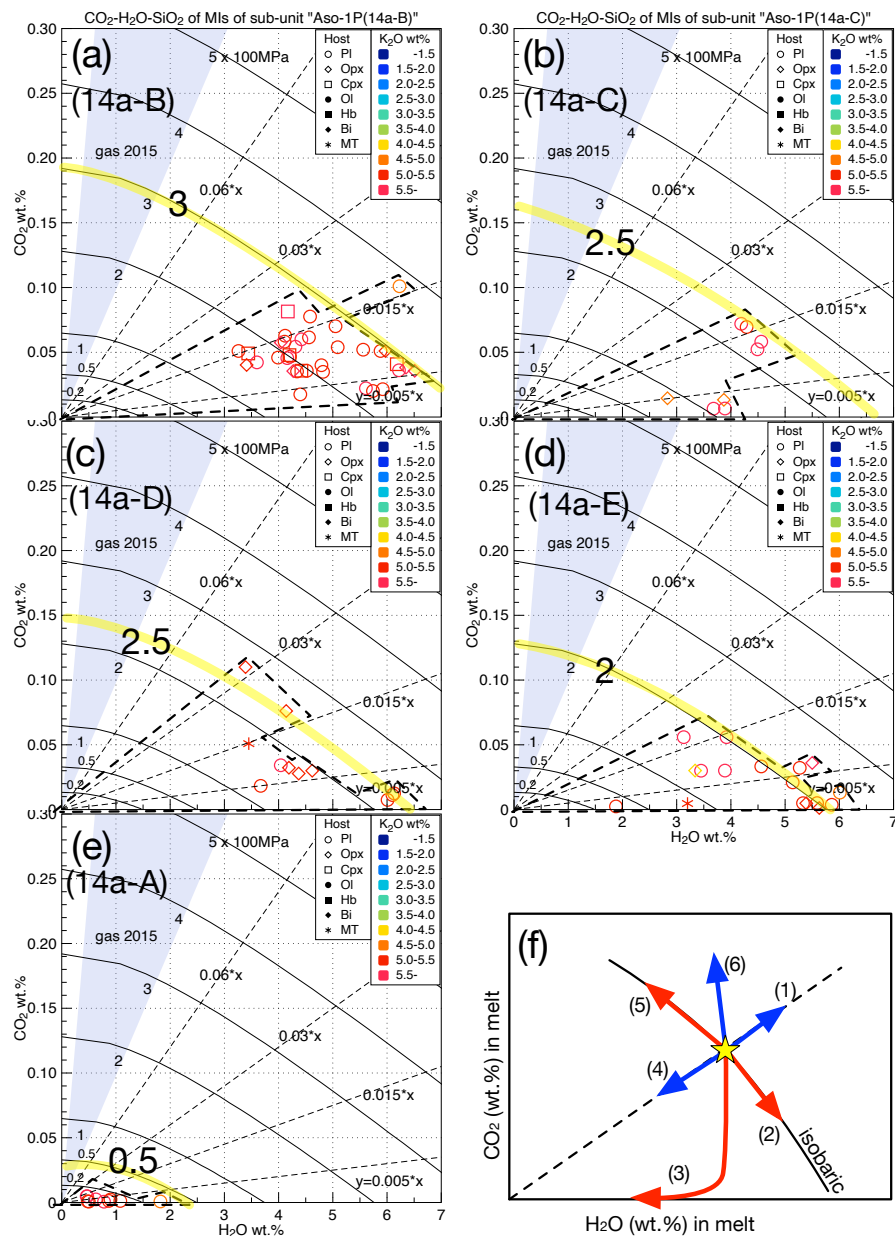


図 2.3-5 : 阿蘇 1 グループの斑晶ガラス包有物の水, 二酸化炭素, カリウム濃度. (a)-(d) : Aso-1P シリーズ(試料は 14a-B, -C, -D, -E). (e) : Aso-1A (試料は 14a-A). (f) : メルト中の揮発成分濃度の変化図. (a)-(e) に示した黄色のカーブは, 見積られる飽和圧力を示す. シンボルの色はメルトの K₂O 量を示す. シンボルの形は斑晶ガラス包有物のホスト鉱物を示す. 図中に示された 20 から 500MPa の飽和溶解度曲線は Newman and Lowenstern (2002) の VolatileCalc で求めた流紋岩質メルトのものである. 図中の破線は水と二酸化炭素濃度の比率である(0.005 から 0.06 までを示した). 淡青色で示した領域は 2015 年の中岳の火山ガス組成(Saito et al, 2018)である.

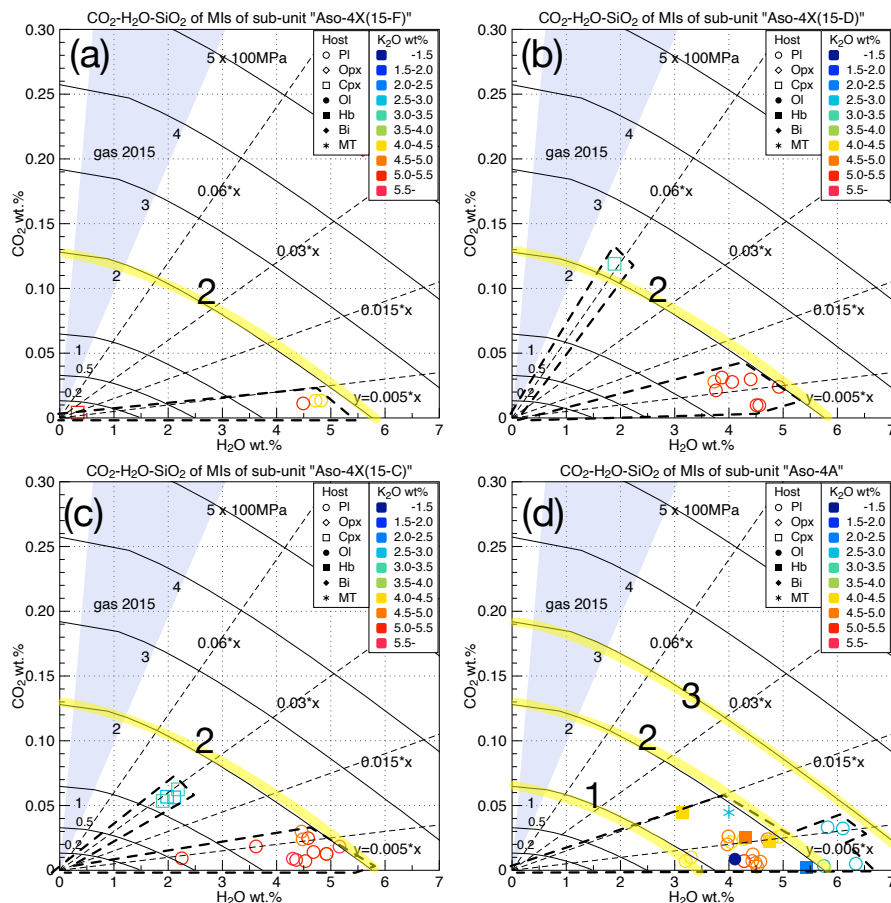


図 2.3-6 : 阿蘇 4 グループの斑晶ガラス包有物の水, 二酸化炭素, カリウム濃度. (a)-(c) : Aso-4X グループ(試料は 15q-F, -D, -C). (d) : Aso-4A (試料は 14q-A). 凡例は図 2.3-5 と同じである.

(6) AsoCC

後カルデラ期の活動のなかで最も珪長質なマグマ (試料 Kpfa) の斑晶ガラス包有物は, CO₂ が低く, K₂O が中程度で, H₂O はばらつく. これらが示す圧力は, 100~300 MPa の間に分布する (図 12-a). 後カルデラ期の活動のなかで最も苦鉄質なマグマ (試料 YmS11) の斑晶ガラス包有物は, さらに明確な特徴がある. 低 K₂O (1.5 wt. %未満) なメルトの含水量は 4~5w で, 250MPa と 100MPa 圧力と, 約 20 MPa の圧力を示す (図 12-b). これらの斑晶ガラス包有物のホストはかんらん石である. 一方, 中程度の K₂O (1.5~3 wt. %) をもつ斑晶ガラス包有物, 原点と 170MPa の等圧線に沿った外縁を持つ扇形の領域に分布する. これらの斑晶ガラス包有物の K₂O 濃度は, CO₂ および H₂O 濃度が増加が増えるにつれ増加する (図 12-b). H₂O, CO₂, および K₂O 濃度の同時に増加する傾向は, ACP1 の斑晶ガラス包有物でも明らかである (図 13-a, -b, および-c). ACP1 の斑晶ガラス包有物の斑晶ガラス包有物について特筆すべきことは, H₂O-CO₂ 分布の領域が噴火の進行とともに拡大したことである. たとえば, ACP1 テフラ層の下部, 中央, 上部の斑晶ガラス包有物の H₂O-CO₂ 分布が示す圧力は, それぞれ 250 MPa, 400 MPa, 500 MPa と, 時間とともに大きくなる (図 13-a, -b, および-c). 2014 に阿蘇中岳から噴

火したスコリア (Saito et al, 2018)のかんらん石斑晶中のメルトインクルージョンは、扇形領域 (0.7-0.8 wt. %H₂O および 0.002-0.017 wt. %CO₂)の原点付近にプロットされている。まとめると、後カルデラ期の斑晶ガラス包有物には次の特徴がある。

- (1)Aso-4A のメルトには、K₂O の低いものが存在する (図 12-b の青い円)。
- (2)Aso-4A 以降のメルトでは、K₂O、H₂O、CO₂ が同時に増加することがある。この現象は、後カルデラ期のほとんどの苦鉄質マグマ (YmS11)～珪長質マグマ (ACP1)の両方で観察される。

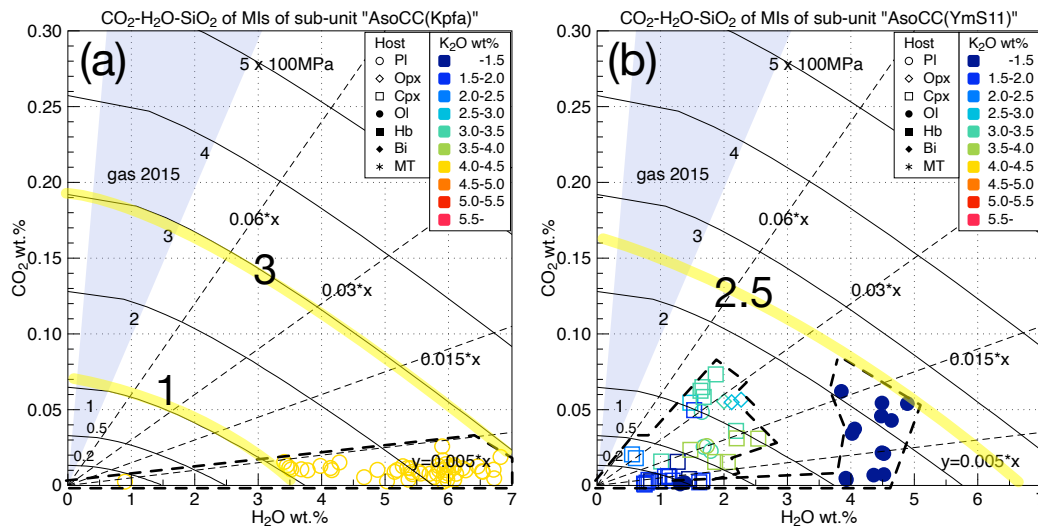


図 2.3-7 : ポストカルデラグループ (AsoCC) の斑晶ガラス包有物の水、二酸化炭素、カリウム濃度. (a) : Kpfa (ポストカルデラ噴出物の珪長質端成分マグマ). (b) : YmS11 (ポストカルデラ噴出物の苦鉄質端成分マグマ). 凡例は図 2.3-5 と同じである。

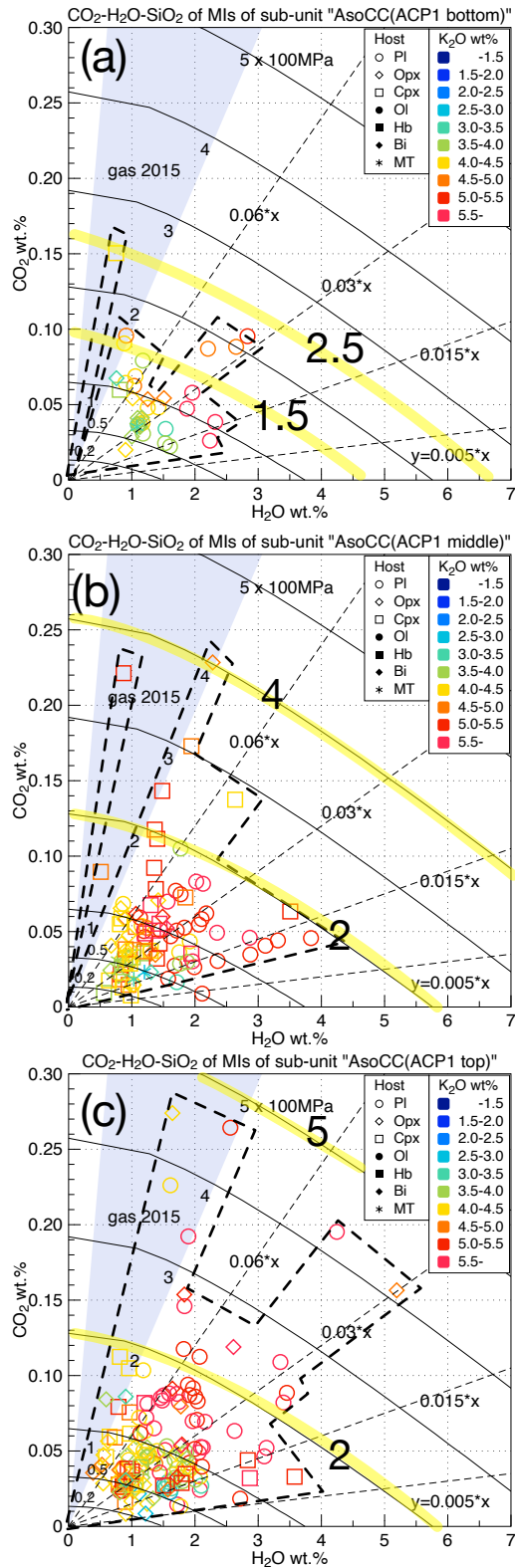


図 2.3-8 : 阿蘇の最新の珪長質噴出物 ACP1 の斑晶ガラス包有物の水, 二酸化炭素, カリウム濃度. (a) : ACP1 堆積物の最下部, (b) : ACP1 堆積物の中間部, (c) : ACP1 堆積物の最上部. 凡例は図 2.3-5 と同じである.

(7) 議論

斑晶ガラス包有物の揮発成分濃度から圧力を見積る方法については、図 2.3-5-(f)に概要を示したが、詳細は図 2.5-13～図 2.5-15 および本文を参照されたい。

1) Aso-1P and Aso-1A

Aso-1P の斑晶ガラス包有物の H₂O および CO₂ 濃度の分布は、テフラが堆積した順に、300 MPa、250 MPa、200-250 MPa、および 200MPa の等圧線内に分布している。このことは、噴出時間とともに、マグマ蒸気飽和の圧力が低下したことを意味する。具体的には、マグマが由来した深度が 12km から 8km に移動した可能性がある。一方、Aso-1A の溶接火砕流堆積物の下から採取された斑晶ガラス包有物の揮発成分濃度は、50MPa の等圧線の内側にのみ分布する。これは、火砕流堆積物の徐冷中に水素が抜けたことが原因かもしれない。

2) Aso-4X and Aso-4A

Aso-X および Aso-4A の斑晶ガラス包有物の揮発成分濃度は、100 および 200MPa のイソバリックラインの間に分布している。メルトのカリウム濃度は、Aso-4A のほうが Aso-4X よりも低い。Aso-4A の斑晶ガラス包有物のカリウム濃度には低～中程度のものがあり、揮発成分濃度は 300MPa のイソバリックラインの内側に分布している。このことは、約 8～12km にあるカリウムに比較的富むマグマ供給系に、カリウムに乏しく水に富むマグマが注入し、結晶分化したためだと解釈できる。

3) AsoCC

阿蘇の後カルデラ期の珪長質端成分である Kpfa のカリウム濃度は、Aso-4A と同程度だが、Aso-4X より少ない(図 2.3-7 (a))。Kpfa の斑晶ガラス包有物は 300 MPa のイソバリックラインの内側に分布し、CO₂ 濃度は比較的 low、H₂O 濃度は比較的高い。これらのメルトはカリウム濃度がほぼ一定のまま含水量が変化している。したがって、マグマの結晶化(図 2.3-5-f (1))や部分溶融(10-f (4))により含水量が変化したよりも、マグマが減圧したことによって含水量が減った可能性(図 2.3-5-f (3))が示唆される。阿蘇の後カルデラ期の苦鉄質端成分である YmS11 は、2つの異なる特徴を示しています(図 2.3-7 (b))。カリウムの低い(<1.5wt K₂O)斑晶ガラス包有物は、約 250 MPa から始まるマグマの減圧(図 2.3-5-f (3))を示唆する。ただし、斑晶ガラス包有物は気泡を含むため、観測された CO₂ 濃度は、蒸気飽和圧力を過小評価する。一方、カリウムが比較的高い斑晶ガラス包有物は、水と二酸化炭素の濃度が増えるにつれカリウムも増加する扇形の領域に分布し、揮発成分に不飽和なマグマが結晶化によってこれらの元素をメルトに濃縮したことを(図 2.3-5-f (1))示唆する。メルトの水、二酸化炭素、カリウムが同時に増加する現象は、阿蘇の最新の珪長質マグマである ACP1 斑晶ガラス包有物で、さらに顕著である(図 2.3-8)。ACP1 の揮発成分濃度は、揮発成分に不飽和なマグマが比較的深部(>20km)で結晶化したことを示唆する。ACP1 の噴火においては、噴火の進行とともに、より深部に由来するマグマが噴出した(図 2.3-8 (a)→(b)→(c) : 6～10km→8～16km→8～20km)。

(8) まとめ

- ・阿蘇の一連の大規模火砕流噴火を最初にひきおこした、阿蘇 1 噴火に先行して噴出したマグマは、揮発成分に飽和しており、由来した深度は、時間とともに浅くなった(12→8km)。
- ・阿蘇カルデラの最大規模の火砕流噴火である阿蘇 4 噴火に先行して噴出したマグマには、比較的カリウム濃度に乏しく揮発成分に富むものが混入した。
- ・阿蘇の後カルデラ期の最新珪長質活動である、ACP1 のマグマは、揮発成分に不飽和であり、由来した深度は、噴火の進行とともに深くなった(6km→20)。

引用文献

- Hoshizumi H, Miyabuchi Y, Miyagi I, Geshi N, Takarada S (2022) Tephrostratigraphy and eruptive history of Aso-4/3 tephra group, Aso volcano: Preparatory process for Aso-4 ignimbrite eruption. Bull Volcanol Soc Japan p (in Japanese with English abstract) (in press)
- Hunter AG (1998) Intracrustal Controls on the Coexistence of Tholeiitic and Calc-alkaline Magma Series at Aso Volcano, SW Japan. J Petrol 39:1255–1284
- Kaneko K, Kamata H, Koyaguchi T, Yoshikawa M, 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
- Kaneko K, Inoue K, Koyaguchi T, Yoshikawa M, Shibata T, Takahashi T, Furukawa K (2015) Magma plumbing system of the Aso-3 large pyroclastic eruption cycle at Aso volcano, Southwest Japan: Petrological constraint on the formation of a compositionally stratified magma chamber. J Volcanol Geotherm Res 303:41–58
- Miyabuchi Y (2009) A 90,000-year tephrostratigraphic framework of Aso Volcano, Japan. Sedimentary Geology 220(3-4):169–189
- Miyabuchi Y (2017) Eruption history of Janoo volcano in the northern part of Aso caldera, Japan. Bull Volcanol Soc Japan 62(1):1–12 (in Japanese with English abstract)
- Newman S, Lowenstern JB (2002) VolatileCalc: a silicate melt-H₂O-CO₂ solution model written in Visual Basic for excel. Comput Geosci 28:597–604
- Ono K, Matsumoto Y, Miyahisa M, Teraoka Y, Kambe N (1977) Geology of the Takeda district. Quadrangle Series, Scale 1:50,000 15 Kagoshima(23):145, 1 sheet (in Japanese with English abstract)
- Saito G, Ishizuka O, Ishizuka Y, Hoshizumi H, Miyagi I (2018) Petrological characteristics and volatile content of magma of the 1979, 1989, and 2014 eruptions of Nakadake, Aso volcano, Japan. Earth, Planets and Space 70(197):1–26
- Tajima Y, Hoshizumi H, Matsumoto A, Hirota A, Koyaguchi T (2017) New insights into the Aso-1 ignimbrites sequence and preceding Koga lava flow, Aso volcano, central Kyushu. Bull Volcanol Soc Japan 62(4):177–188 (in Japanese with English abstract)

Ushioda M, Miyagi I, Suzuki T, Takahashi E, Hoshizumi H (2020) Preeruptive P-T Conditions and H₂O Concentration of the Aso-4 Silicic End-Member Magma Based on High-Pressure Experiments. *J Geophys Res-Solid Earth* 125:1–17 <https://doi.org/10.1029/2019JB018481>