



三瓶火山溶岩ドームの形成過程

浅野, 一平
五井, 健登
清杉, 孝司
鈴木, 桂子
巽, 好幸

(Citation)

火山, 63(2):19-32

(Issue Date)

2018-06-30

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90006794>



三瓶火山溶岩ドームの形成過程

浅野 一平*・五井 健登*・清杉 孝司**・鈴木 桂子***・巽 好幸***

(2017 年 5 月 26 日受付, 2018 年 3 月 15 日受理)

Formation Process of Lava Domes in Sanbe Volcano

Ippei ASANO*, Kento GOI*, Koji KIYOSUGI**, Keiko SUZUKI-KAMATA*** and Yoshiyuki TATSUMI***

Four peaks (Osanbe, Mesanbe, Kosanbe, and Magosanbe) form the major body of Sanbe Volcano. A possible scenario of formation of such discrete peaks could be creation of a single lava dome followed by eruption and erosion, as an explosion-center-like depression is located in the center of four peaks. However, the following lines of evidence may suggest that four lava domes formed individually. Firstly, rocks constituting each peak exhibit distinctive petrographic features in terms of the amount of quartz phenocrysts and compositions of plagioclase phenocrysts. Secondly, Mesanbe rocks tend to possess SiO₂ contents lower than other rocks and show unique chemical trends. Lastly, rocks from Osanbe and Mesanbe exhibit systematically higher, K, Rb, Sr, Ba, and Zr concentrations than those from Kosanbe and Magosanbe. This geochemical characteristics together with rather constant concentration of Y for Sanbe lavas may lead to the conclusion that four types of magmas are produced by anatexis of the lower crust in the presence of garnet, plagioclase, and amphibole by different degrees of melting.

Key words : Sanbe volcano, lava domes, formation process, adakite

1. はじめに

三瓶火山は中国地方に分布する唯一の複成活火山であり、その主要な山体は、楕円形カルデラ（長径約 5 km, 短径約 4 km）の内部に形成された溶岩ドームである。この山体は、男三瓶山（1162.7 m）、女三瓶山（957 m）、子三瓶山（961 m）、孫三瓶山（907 m）の 4 峰よりなる。

これらの 4 峰はほぼ均質なデイサイト質火山岩で構成され、各峰の内側斜面と外側斜面が非対称な地形を示すことなどから、元々は 1 つの溶岩ドームとして形成された山体が、その後の噴火活動と侵食によって見かけ上複数の山体になったとする考えがある（山口, 1963; 鈴木・他, 1968; 松井・井上, 1971; 服部・他, 1983）。

一方で、久野（1954）や小畑（1967）は 4 峰が独立の溶岩ドームとして形成されたものであると考えた。この説には、4 峰構成岩石における斑晶量とカリウム含有量の

系統的差異（松元, 1994）、溶岩ドーム形成後の火山活動様式が「爆裂火口」を形成可能なプリニー式ではなくブルカノ式であった可能性が高いこと（福岡, 2009）などの賛同見解がある。

以下では、松元（1994）が行なった記載岩石学・岩石化学的検討をさらに進め、溶岩ドーム及びそれを構成するマグマの形成過程を考察する。

2. 地質概説・試料採集

現在の西南日本の火山活動は概ね、フィリピン海プレートが南海トラフ及び琉球海溝からユーラシアプレートの下へ沈み込みこむことによって引き起こされている（Fig. 1）。九州地方ではスラブ内地震を伴うフィリピン海プレートが活火山直下まで到達する。一方で四国中国地方では、地震性のスラブは 60 km 程度の深さまでしか

* 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1
神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻
Department of Planetology, Graduate School of Science,
Kobe University, Rokko-dai 1-1, Nada, Kobe 657-8501,
Japan.

** 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1
神戸大学先端融合研究環
Organization of Advanced Science and Technology, Kobe

University, Rokko-dai 1-1, Nada, Kobe 657-8501, Japan.
*** 〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5 丁目 1-1
神戸大学海洋底探索センター
Kobe Ocean-Bottom Exploration Center, Kobe University,
Fukae 5-1-1, Higashinada, Kobe 658-0022, Japan.

Corresponding author: Yoshiyuki Tatsumi
e-mail: tatsumi@diamond.kobe-u.ac.jp

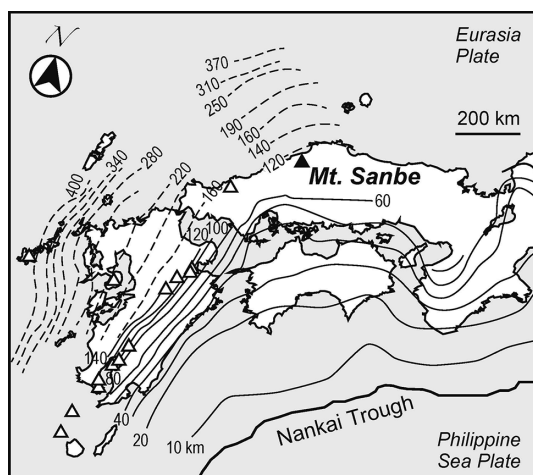


Fig. 1. Tectonic setting of Sanbe volcano (filled triangles) that forms the eastern edge of the SW Japan active volcanic chain (open triangles). This volcanic chain is created by subduction of Philippine Sea plate at the Nankai Trough, as shown by numbers indicating depths to the top of the subducted lithosphere as seismic (solid lines) and aseismic (broken lines) slabs (Zhao *et al.*, 2012). Sanbe volcano forms ~110 km above the subducted slab, which is a general feature common to terrestrial arc-trench systems.

存在しない。そしてこの位置は明らかに三瓶山よりは海溝側、すなわち前弧域である (Hirose *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2012)。

一方で、スラブ内地震は伴わないものの、マントルウェッジとは地震波速度構造が異なる「非地震性スラブ」が日本海沿岸域以北の深さ 100 km を超える所に存在する (Nakanishi, 1980; Zhao *et al.*, 2012)。これが沈み込んだフィリピン海プレートに相当するという考えを受け入れると、三瓶山直下におけるこの沈み込むプレート表面までの深さは約 110 km と予想される。この値は九州地方を含む西南日本弧のみならず、地球上の多くの沈み込み帯で認められるものである (Tatsumi and Eggins, 1995)。ただし、中国地方ではこのプレートが非地震性であることから、他地域に比べてプレート上面付近の温度が高いと想像できる (Peacock and Wang, 1999)。そのように推定する最大の理由は、四国中国地方の地下に沈み込むフィリピン海プレートが、1500 万年前に誕生した (Okino *et al.*, 1994) 若いプレートであることによる。

三瓶火山の地質については、層序学的検討、放射性炭素年代測定、広域テフラである AT と K-Ah との層位関係などに基づいて検討が行われて来た (松井・井上, 1971;

服部・他, 1983; 林・三浦, 1987; 福岡・松井, 2002; 福岡・松井, 2004)。これらの研究の中で最も包括的な検討がなされた福岡・松井 (2002, 2004) に基づけば、三瓶火山の活動は約 10 万年前の第 I 期から 3500 年前の第 VII 期に及ぶ。第 I 期から第 III 期は流紋岩質のプリニー式噴火、第 IV 期はデイサイト質の溶岩流や準プリニー式噴火、第 V 期以降はデイサイト質のブルカノ式噴火が卓越する。直径約 5 km のカルデラの主要部は第 II 期のプリニー式噴火によって形成されたと考えられている。

今回注目する溶岩ドームは第 VII 期に属し、その活動の直後に太平洋火砕物 (降下火山灰及びブロックアンドアッシュフローを主体とする火砕流堆積物) が噴出し、溶岩ドームの南東に火砕丘を形成した (Fig. 2)。これらに囲まれた窪地は ^{ひづのうち} 室内と呼ばれ、太平洋火砕物の噴出口と考えられている。この「爆裂火口」の存在が、現在の 4 つのピークが形成時は単一の溶岩ドームであったとする説の拠所である。

Fig. 2 に、今回の検討のために試料を採取した地点を示す。溶岩ドームの形成過程を理解するために、4 峰の構成岩石をできるだけ密に採取し、それぞれの境界域近傍では転石などを誤って採取しないように露頭と斜面の状況を確認した。また、試料採取にあたっては、可能な限り青灰色を呈する新鮮な岩石を採取するように努めた (Fig. 2)。

3. 岩石記載

溶岩ドームを構成する火山岩はいずれも斑状で流理構造は示さず、肉眼では 4 峰の岩石を区別することは困難である。岩石は多くのものが赤茶色～赤紫色を呈し、灰白色～青灰色のものは稀である。

直交する 3 方向で作成した薄片についてそれぞれ 2000 点を測定して求めたモード組成 (Table 1, Fig. 3) では、いずれの試料でも斑晶量は 20～40% であるが、子三瓶の岩石はやや斑晶量が乏しい傾向がある。主要な斑晶は斜長石 (<10 mm) と角閃石 (<5 mm) であり、前者は概ね清澄で、後者は殆どの周縁部が、そして稀には全体がオパサイト化している。融食形を示すことが多い石英 (<2 mm) はいずれの岩石にも含まれるが、松元 (1994) が指摘したように、女三瓶の岩石は石英に乏しい傾向が認められる。その他、黒雲母 (<5 mm)、不透明鉱物 (磁鉄鉱及びチタン鉄鉱)、燐灰石が斑晶として含まれる。

斜長石は測定した全ての試料においていずれも、An₄₀ 付近に組成ピークがある (Fig. 4)。また、顕著な逆累帯構造や単一試料内での複数の組成ピークなどは認められない。一方で、An₇₀ を超える斜長石斑晶の存在については、4 峰で差異が認められる。すなわち、女三瓶、子三瓶

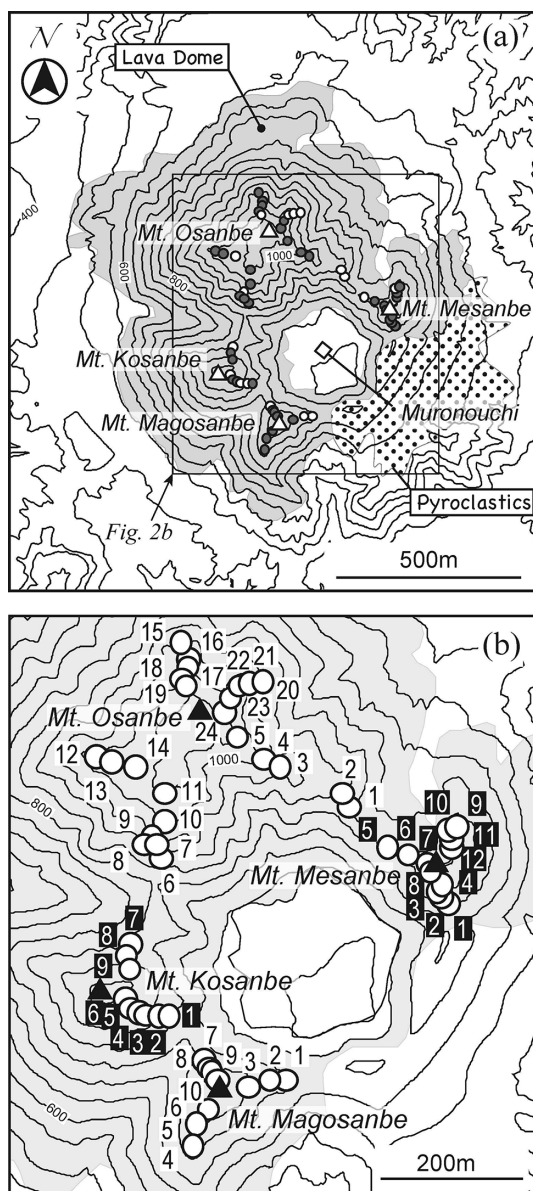


Fig. 2. Topography of the lava domes of Sanbe volcano. Hatched and dotted areas show the distribution of dacite lava and Taiheizan pyroclastics, respectively. (a) sampling sites and rock color (open, grey; filled, red). (b) sample numbers. Topography was based on 1:25,000 Topographic Map of the Geospatial Information Authority of Japan.

ではこのような斜長石が量は少ないものの普遍的に見られるが、男三瓶、孫三瓶では、全くまたはほとんど認められない。

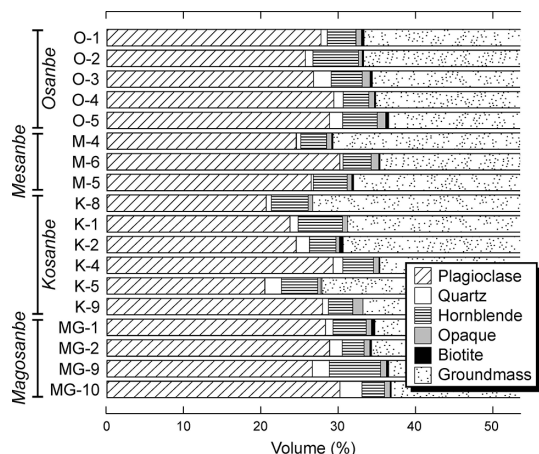


Fig. 3. Modal compositions of rock samples from lava domes of Sanbe volcano. Mesanbe samples tend to contain smaller volumes of quartz and total phenocrysts than those of other three lava domes.

4. 全岩化学組成

4 峰から採取した 49 試料について、蛍光 X 線分析法を用いて主成分元素及び 14 種の微量元素含有量を測定した。

試料の前処理には低希釈率ガラスビード法（希釈率 2 倍：粉末試料 1.8 g, 融剤 3.6 g）を用いた（山田・他, 1994）。岩石試料をカッターで 1 cm 厚のスラブに切断し超音波洗浄を行い、鉄粉が付着していないことを確認後、1 cm 程度の大きさに粗割し、アルミナボールミルで粉碎した。この粉末試料を 110℃ のオーブンで 1 昼夜乾燥させ、デシケータ内に保管後、融剤（Alfa Aesar 社製 Spectroflux 100B: メタホウ酸リチウムと四ホウ酸リチウムの 4:1 混合融剤）と混合し、Rigaku 社製ビードサンプラを用いて温度 1150℃ の条件で 420 秒間加熱し溶融させた。一部の試料では溶融時に剥離剤としてヨウ化リチウムを添加している。

分析には、神戸大学に設置された蛍光 X 線分析装置（Rigaku 社製 ZSX Primus II, 管電圧 50 kV, 管電流 50 mA）を用いた。検量線の作成には国立研究開発法人産業技術総合研究所の標準試料 17 種を用いた。分析強度の補正として重なり補正及びファンダメンタルパラメータ法を用いた理論マトリックス補正を行った。未知試料の測定時間は、1 試料あたり 24 元素で約 1 時間である。また分析時にはチェック試料の測定も行い、検量線作成時の同試料の測定値と比較することで装置のドリフト及びガラスビード作成用白金のつぼの状態の補正とした。

分析結果を Table 2 及び Figs. 5, 6 に示す。分析した試

Table 1. Major and trace element compositions of Sanbe lava domes.

	Osanbe														
	0-1	0-2	0-3	0-4	0-5	0-6	0-7	0-8	0-9	0-10	0-11	0-12	0-13	0-14	0-15
SiO ₂ (wt.%)	65.65	65.32	64.44	64.82	64.51	64.32	64.71	64.58	65.75	64.90	64.34	65.40	65.11	65.51	65.32
TiO ₂	0.33	0.34	0.30	0.32	0.31	0.30	0.31	0.32	0.31	0.31	0.31	0.32	0.31	0.32	0.33
Al ₂ O ₃	17.75	17.72	17.46	17.26	17.15	17.41	17.36	17.11	17.51	17.27	17.71	17.14	17.22	17.43	17.04
Fe ₂ O ₃ *	3.65	3.70	3.35	3.43	3.50	3.34	3.44	3.63	3.50	3.34	3.72	3.49	3.47	3.28	3.51
MnO	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	0.07	0.09
MgO	1.58	1.49	1.40	1.51	1.46	1.44	1.51	1.57	1.51	1.45	1.53	1.55	1.50	1.52	1.61
CaO	4.94	4.98	4.98	4.91	4.80	5.02	5.03	4.91	5.04	4.92	4.83	4.94	4.90	4.94	4.86
Na ₂ O	4.23	4.17	4.28	4.29	4.11	4.28	4.17	4.26	4.36	4.28	4.20	4.25	4.24	4.14	4.17
K ₂ O	1.68	1.70	1.60	1.64	1.60	1.59	1.68	1.64	1.60	1.63	1.58	1.63	1.63	1.60	1.67
P ₂ O ₅	0.17	0.17	0.15	0.16	0.18	0.16	0.16	0.17	0.17	0.17	0.18	0.17	0.16	0.19	0.17
Total	100.07	99.66	98.05	98.43	97.70	97.93	98.46	98.28	99.83	98.34	98.48	98.97	98.63	98.99	98.77
Cr (ppm)	13	11	11	10	13	11	12	12	12	11	11	12	12	14	11
Co	18	34	19	20	16	11	13	13	12	11	14	12	12	12	11
Ni	11	8	9	10	11	11	10	11	11	12	15	11	11	12	11
Cu	8	11	9	10	12	10	8	15	17	15	18	8	9	4	9
Zn	41	40	39	41	42	41	45	45	48	42	39	42	41	42	41
Rb	45	46	43	46	45	43	47	46	42	45	44	45	45	45	46
Sr	947	949	961	932	907	950	941	950	942	938	969	925	927	940	910
Y	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	9	8	8	8	8
Zr	102	101	102	102	95	97	97	96	95	91	102	99	91	92	102
Nb	9	9	8	8	9	8	8	9	9	8	9	9	8	9	9
Ba	533	535	511	530	511	500	522	511	519	523	511	520	514	522	528
La	29	32	23	28	22	21	30	29	26	27	26	23	24	28	32
Ce	55	72	58	56	38	41	46	48	50	76	67	51	30	66	59
Pb	9	9	8	9	9	9	10	10	11	11	10	8	9	7	10

Table 1. Continued.

	Osanbe										Mesanbe					
	O-16	O-17	O-18	O-19	O-20	O-21	O-22	O-23	O-24		M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6
SiO ₂ (wt.%)	65.25	64.95	64.78	64.82	63.72	65.66	64.46	65.06	64.63		63.51	64.05	64.42	63.98	65.20	64.15
TiO ₂	0.31	0.31	0.31	0.30	0.30	0.32	0.31	0.31	0.31		0.31	0.32	0.32	0.34	0.32	0.33
Al ₂ O ₃	17.41	17.11	17.30	17.14	17.03	17.40	17.03	17.30	17.08		17.61	17.49	17.59	17.16	17.58	17.27
Fe ₂ O ₃ *	3.46	3.46	3.40	3.28	3.31	3.60	3.39	3.43	3.40		3.42	3.50	3.55	3.54	3.58	3.63
MnO	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.09		0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09
MgO	1.50	1.52	1.53	1.40	1.48	1.56	1.50	1.45	1.51		1.42	1.49	1.56	1.60	1.54	1.62
CaO	4.95	4.90	5.02	4.79	4.80	4.95	4.91	4.93	4.90		4.97	5.02	5.00	4.83	5.11	4.96
Na ₂ O	4.29	4.23	4.28	4.36	4.21	4.25	4.19	4.35	4.23		4.27	4.26	4.26	4.21	4.28	4.25
K ₂ O	1.64	1.65	1.62	1.63	1.60	1.66	1.61	1.63	1.63		1.60	1.62	1.61	1.66	1.62	1.64
P ₂ O ₅	0.17	0.17	0.17	0.15	0.15	0.17	0.17	0.18	0.17		0.17	0.16	0.16	0.15	0.18	0.16
Total	99.06	98.39	98.49	97.94	96.69	99.66	97.65	98.71	97.94		97.33	97.99	98.56	97.54	99.48	98.10
Cr (ppm)	11	11	10	9	9	11	10	10	9		11	10	12	10	12	10
Co	12	12	11	9	11	13	12	11	11		12	12	12	12	30	17
Ni	11	12	11	11	8	11	8	9	11		10	12	11	11	8	10
Cu	11	10	11	9	7	10	9	12	10		12	12	9	16	10	12
Zn	41	46	44	40	40	43	40	40	42		39	41	41	46	43	42
Rb	45	47	46	42	43	45	44	46	46		45	45	44	46	44	46
Sr	947	926	947	907	940	934	921	942	927		998	965	967	948	959	944
Y	8	8	8	8	8	9	9	8	7		7	8	8	9	9	8
Zr	104	100	94	96	91	104	97	101	101		98	102	100	101	105	101
Nb	9	9	8	7	8	9	8	9	9		8	8	8	9	8	8
Ba	519	517	524	520	511	532	512	519	528		503	515	528	506	500	500
La	16	22	24	23	22	22	28	23	22		33	19	28	28	23	20
Ce	61	68	60	53	64	76	58	58	37		55	52	51	57	39	62
Pb	9	9	9	10	9	7	9	8	10		9	7	7	9	8	9

Table 1. Continued.

	Mesanbe					Kosanbe									
	M-7	M-8	M-9	M-10R	M-10G	M-11	M-12	K-1	K-2	K-3R	K-3G	K-4	K-5	K-6R	K-6G
SiO ₂ (wt.%)	64.38	63.72	63.86	63.91	64.31	64.05	64.32	64.84	64.66	64.75	64.46	64.65	65.02	64.48	64.76
TiO ₂	0.32	0.30	0.32	0.32	0.31	0.31	0.31	0.30	0.32	0.30	0.29	0.30	0.30	0.30	0.31
Al ₂ O ₃	17.33	17.79	17.33	17.31	17.71	17.41	17.48	17.10	16.75	17.42	17.35	17.19	16.84	17.28	17.43
Fe ₂ O ₃ *	3.63	3.50	3.48	3.54	3.47	3.52	3.48	3.43	3.59	3.39	3.38	3.44	3.55	3.49	3.47
MnO	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08
MgO	1.52	1.40	1.54	1.54	1.51	1.50	1.51	1.54	1.60	1.53	1.48	1.49	1.52	1.39	1.45
CaO	4.96	4.97	4.99	4.99	5.02	5.01	5.03	4.95	4.85	5.04	5.04	4.98	4.92	5.06	4.90
Na ₂ O	4.25	4.14	4.24	4.24	4.27	4.22	4.30	4.09	4.15	4.24	4.15	4.14	4.10	4.15	4.31
K ₂ O	1.60	1.60	1.63	1.60	1.60	1.59	1.59	1.50	1.54	1.47	1.48	1.50	1.49	1.46	1.51
P ₂ O ₅	0.16	0.16	0.17	0.16	0.17	0.17	0.16	0.15	0.15	0.15	0.14	0.15	0.14	0.16	0.16
Total	98.23	97.65	97.63	97.69	98.46	97.86	98.25 1.5/1	97.99	97.69	98.36	97.86	97.91	97.96	97.85	98.38
Cr (ppm)	10	11	11	11	9	10	11	13	12	12	12	13	12	9	11
Co	13	10	12	13	12	15	14	22	28	12	11	19	21	12	11
Ni	12	11	12	12	10	11	13	9	9	12	11	11	11	8	12
Cu	12	10	11	13	9	11	12	14	12	14	8	13	14	8	9
Zn	42	38	42	41	42	41	40	42	43	42	41	42	43	45	41
Rb	44	43	45	44	41	41	42	42	42	41	40	42	43	41	42
Sr	954	952	950	950	969	957	962	887	856	910	913	896	871	910	923
Y	8	8	7	8	9	9	8	8	7	7	7	8	8	8	8
Zr	104	104	104	100	100	99	99	90	90	86	89	93	93	92	93
Nb	8	8	8	9	8	9	8	7	8	7	7	8	7	8	7
Ba	497	494	504	489	501	515	496	506	511	494	497	503	495	486	484
La	34	32	34	28	23	33	18	20	29	27	28	21	15	23	24
Ce	67	47	64	29	53	57	51	50	42	50	47	41	50	53	64
Pb	9	9	8	8	9	9	9	7	8	9	9	9	10	8	9

Table 1. Continued.

	Kosanbe				Magasanbe									
	K-7R	K-7G	K-8	K-9	MG-1	MG-2	MG-3	MG-4	MG-5	MG-6	MG-7	MG-8	MG-9	MG-10
SiO ₂ (wt.%)	64.87	64.62	64.73	65.22	64.76	66.30	64.35	64.14	64.25	64.41	64.62	65.25	64.30	64.31
TiO ₂	0.31	0.30	0.30	0.30	0.31	0.32	0.30	0.31	0.31	0.29	0.29	0.30	0.31	0.30
Al ₂ O ₃	17.38	17.27	17.02	17.57	16.96	17.55	17.11	17.48	17.10	17.22	17.25	17.04	17.25	17.22
Fe ₂ O ₃ *	3.57	3.43	3.53	3.53	3.52	3.67	3.43	3.46	3.48	3.35	3.32	3.33	3.42	3.45
MnO	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09
MgO	1.56	1.49	1.53	1.39	1.52	1.54	1.41	1.48	1.51	1.43	1.37	1.40	1.49	1.44
CaO	4.97	5.04	4.74	5.12	5.02	5.11	4.98	5.02	5.00	4.93	4.84	4.79	5.06	4.96
Na ₂ O	4.25	4.21	4.03	4.29	4.08	4.14	4.14	4.13	4.14	4.20	4.34	4.27	4.16	4.16
K ₂ O	1.52	1.49	1.52	1.45	1.51	1.52	1.49	1.48	1.48	1.48	1.48	1.50	1.47	1.44
P ₂ O ₅	0.14	0.15	0.16	0.15	0.17	0.17	0.15	0.18	0.16	0.15	0.15	0.16	0.16	0.15
Total	98.66	98.07	97.64	99.09	97.95	100.42	97.45	97.77	97.53	97.54	97.73	98.11	97.69	97.50
Cr (ppm)	13	13	12	12	10	10	11	10	10	11	10	10	9	10
Co	11	11	15	22	32	39	13	12	11	13	13	10	17	25
Ni	15	12	11	9	9	8	12	11	11	12	10	11	11	8
Cu	14	13	14	15	6	9	10	8	8	13	9	10	10	7
Zn	43	42	44	39	41	46	41	40	41	39	38	39	41	40
Rb	43	41	43	41	41	41	41	40	41	43	42	44	41	38
Sr	901	907	860	928	888	908	903	919	899	905	883	873	912	905
Y	7	8	7	7	9	8	8	8	8	7	8	8	8	8
Zr	96	88	89	91	88	92	86	90	90	94	98	96	91	91
Nb	8	7	7	7	7	8	7	7	8	7	8	8	8	7
Ba	498	500	522	472	513	508	496	491	491	496	466	495	504	485
La	25	18	17	23	23	26	20	27	19	15	20	30	20	21
Ce	37	35	49	41	58	59	62	44	49	60	53	56	67	56
Pb	9	9	11	10	9	9	9	9	8	9	8	11	9	12

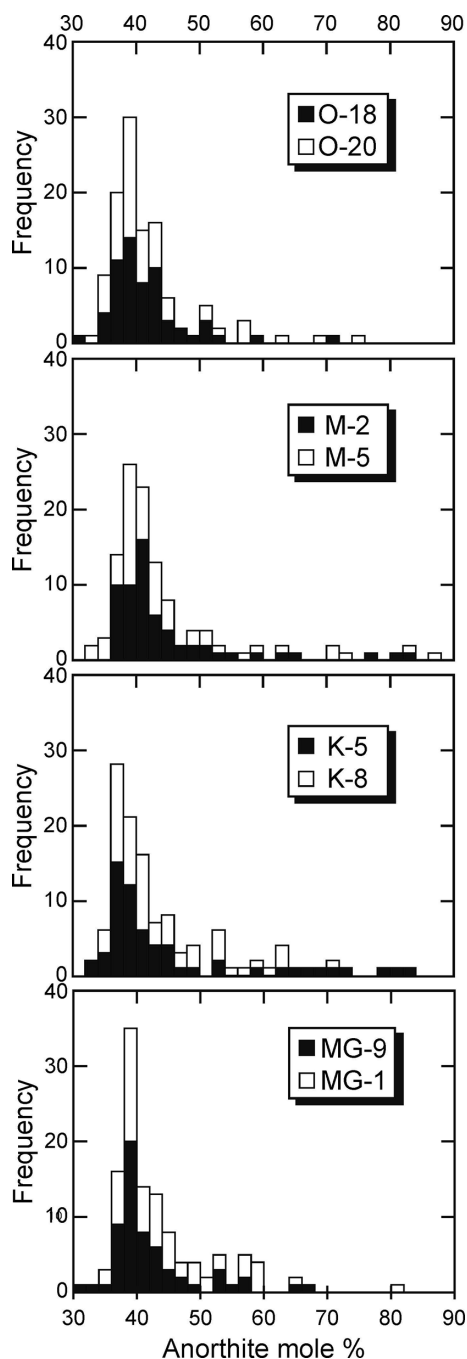


Fig. 4. Frequency distributions of An-contents of plagioclase phenocrysts of Sanbe lava domes. All samples exhibit a peak composition at An₄₀.

料は、SiO₂ 含有量が 65~66.5% の狭い組成範囲を示す中カリウムデイサイトであり、多くの元素では 4 峰の試料が一連の化学トレンドを示す。しかしながら K₂O に

ついては松元 (1994) が指摘したように、比較的 K₂O に富む男三瓶・女三瓶の高カリウムグループと、子三瓶・孫三瓶の低カリウムとの、2つの独立したトレンドを形成する。さらに今回、同様の 2 種類のトレンドは、Rb, Sr, Ba, そして Zr でも、またこれらに比べると明瞭ではないが、La, Ce, P₂O₅ でも認められた (Figs. 5, 6)。

松元 (1994) は、4 峰の中では女三瓶の岩石が SiO₂ に乏しい傾向があることを指摘した。この傾向は今回の分析でも確認することができ、さらに女三瓶の岩石は、SiO₂ と TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃* などで他の 3 峰とは異なる化学トレンドを示すことが明らかになった (Fig. 5)。

三瓶火山溶岩ドームの岩石については、Morris (1996) が Defant and Drummond (1990) の定義したアダカイトであることを報告した。今回の分析結果からも、このことは確認できる (Fig. 7)。

5. 議 論

5-1 4 峰の形成過程

今回の記載岩石学・岩石学的検討の結果、松元 (1994) が指摘したように、三瓶火山溶岩ドームは均質なデイサイトよりなるわけではないことが確認できた。この点について以下に、松元 (1994) と今回の結果を比較検討する (Table 3)。

まず斑晶鉱物については、女三瓶を構成する岩石が他に比べて石英斑晶に乏しい傾向を確認することができた。さらに今回の検討では、最も主要な斑晶鉱物である斜長石について、女三瓶及び子三瓶をなす岩石には比較的 Ca に富む (>An₇₀) 斜長石斑晶が量的には少ないものの普遍的に認められた。

次に化学的特性に注目すると、松元 (1994) が述べたように、女三瓶の岩石が他に比べて SiO₂ に乏しい傾向があることは確かである (Figs. 5, 6)。さらに今回の分析によって、女三瓶の岩石は SiO₂ と TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃* などで他の 3 峰とは異なる化学トレンドを示すことも明らかになった (Fig. 5)。しかしながら、松元 (1994) の指摘した、男三瓶が最も広い、そして子三瓶が最も狭い SiO₂ の組成範囲を有するとする特徴は今回の分析では認められなかった。この相違は、今回男三瓶の試料は他の峰、特に子三瓶との境界付近では採取しなかったこと、それに子三瓶の試料数が倍増したことに起因すると思われる。

松元 (1994) が三瓶山溶岩ドームの岩石について示した最も顕著な化学的特徴は、男三瓶・女三瓶と子三瓶・孫三瓶の 2 つのグループで系統的に (同じ SiO₂ 含有量で比較した場合に) K₂O 含有量が異なる点である。このことは今回の分析結果でも明瞭に確認することができ

Table 2. Modal compositions of Sanbe lava domes.

	Plagioclase	Quartz	Hornbrebde	Oxi-hornbrende	Opaque	Biotite	Apatite	Groundmass
Osanbe								
O-1	27.6	0.8	3.6	0.1	0.7	0.4	-	66.9
O-2	25.6	0.9	5.8	-	0.6	0.2	-	66.9
O-3	26.7	2.3	4.0	-	1.0	0.4	0.1	65.6
O-4	29.4	1.2	3.3	0.1	0.8	0.2	-	65.1
O-5	28.8	1.7	4.5	-	1.0	0.5	-	63.5
Mesanbe								
M-4	24.4	0.7	3.2	-	0.7	0.1	-	70.9
M-5	26.4	0.3	4.4	-	0.6	0.3	-	68.2
M-6	30.0	0.5	3.5	0.1	1.0	0.1	-	64.8
Kosanbe								
K-1	23.6	1.1	5.7	0.1	0.6	-	-	68.9
K-2	24.5	1.8	3.4	-	0.4	0.5	-	69.5
K-4	29.2	1.4	3.9	-	0.7	0.1	-	64.8
K-5	20.4	2.2	4.6	0.1	0.4	-	0.2	72.2
K-8	20.6	0.7	4.6	0.1	0.6	-	-	73.5
K-9	27.8	0.8	3.0	0.2	1.3	-	-	66.9
Magosanbe								
MG-1	28.2	1.0	4.1	0.1	0.7	0.5	0.1	65.2
MG-2	28.8	1.7	2.8	-	0.7	0.2	-	65.8
MG-9	26.5	2.2	6.6	0.1	0.7	0.3	-	63.6
MG-10	30.1	2.8	3.0	-	0.7	0.2	-	63.2

る。しかし、松元 (1994) が指摘した、孫三瓶の岩石が最も K_2O に乏しく、子三瓶の岩石が K_2O の変化が少ない、という傾向は認められない (Fig. 5)。一方で今回新たに明らかになったことは、Rb, Sr, Ba, そして Zr でも、またこれらに比べると明瞭ではないが、La, Ce, P_2O_5 でも、男三瓶・女三瓶 (高カリウムグループ) と子三瓶・孫三瓶 (低カリウムグループ) でこれらの元素の含有量に系統的な相違が存在することである。

以上の記載岩石学及び地球化学的解析に基づく、三瓶山溶岩ドームは単一の岩石で構成されているのではなく、4 峰がそれぞれ異なる特性を持つ岩石で構成されていると結論できる。

今回明らかになった三瓶火山溶岩ドームを構成する岩石の不均質性を最も簡単に説明するメカニズムは、基本的には共通の起源ではあるが一部の化学的特性や斑晶量の異なる 4 種類のマグマが供給されたとするものであろう。ただし、これまでの研究で明らかにされているように、三瓶火山溶岩ドームは地質学的にはほぼ一時期に形成されたものである、4 種類のマグマの供給はほぼ同時に起き、各溶岩ドームが個別に形成されたことになる。

5-2 化学的特徴の異なるマグマの成因

以上述べたように、三瓶火山溶岩ドームの形成には 4 種類のマグマが関与したと考えられる。ここでは、これ

らのマグマの成因及びそれぞれのマグマ間の成因関係を考察する。

まず第一の論点は、三瓶火山溶岩ドームを構成する岩石がアダカイトに分類される点である。いわゆるアダカイトの成因に関しては、その高い Sr/Y 比と低い Y 濃度 (Kay, 1978; Defant and Drummond, 1990) からザクロ石存在下での玄武岩質岩石の部分融解という点では概ね研究者の意見は一致している。ただ、そのような条件が満足される場としては、異常高温の海洋地殻の沈み込み、いわゆる「スラブ融解」説 (Defant and Drummond, 1990; Morris, 1995; Gutscher *et al.*, 2000; Yogodzinski *et al.*, 2001) と、下部地殻の部分融解説 (Chung *et al.*, 2003; Zellmer *et al.*, 2012; Hou *et al.*, 2015) が唱えられている。先に述べたように、三瓶火山を含む西南日本弧の背弧側では火山弧の直下には非震性のスラブが特徴的に位置する (Fig. 1)。このことは、まだ十分に冷え切っていない若いフィリピン海プレートが沈み込んでいる (Peacock and Wang, 1999) と考えると理解することができる。このことは、三瓶山アダカイトマグマが、異常高温状態のプレートが部分融解して生成されたとする考え (Morris, 1995) と調和的である。

今回得られたデータの中で、上述の 2 つのアダカイトマグマの成因に関して束縛条件を与える可能性があるのが、高カリウム・低カリウムグループが示す系統的な化

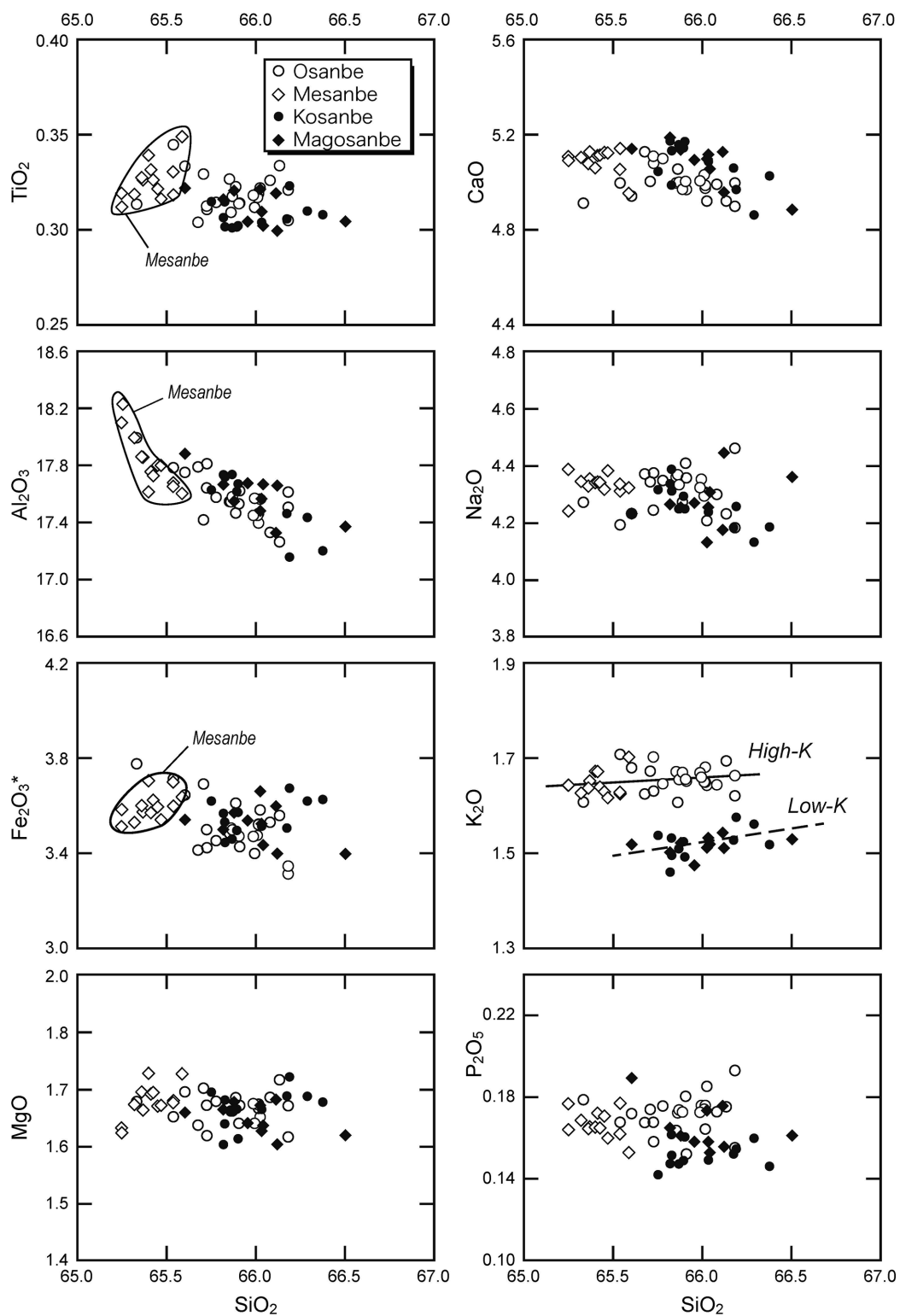


Fig. 5. Major element compositions of Sanbe lava domes. All samples form an identical chemical trend excepting K_2O vs. SiO_2 , which show high-K and low-K trends for Osanbe/Mesanbe and Kosanbe/Magosambe samples, respectively.

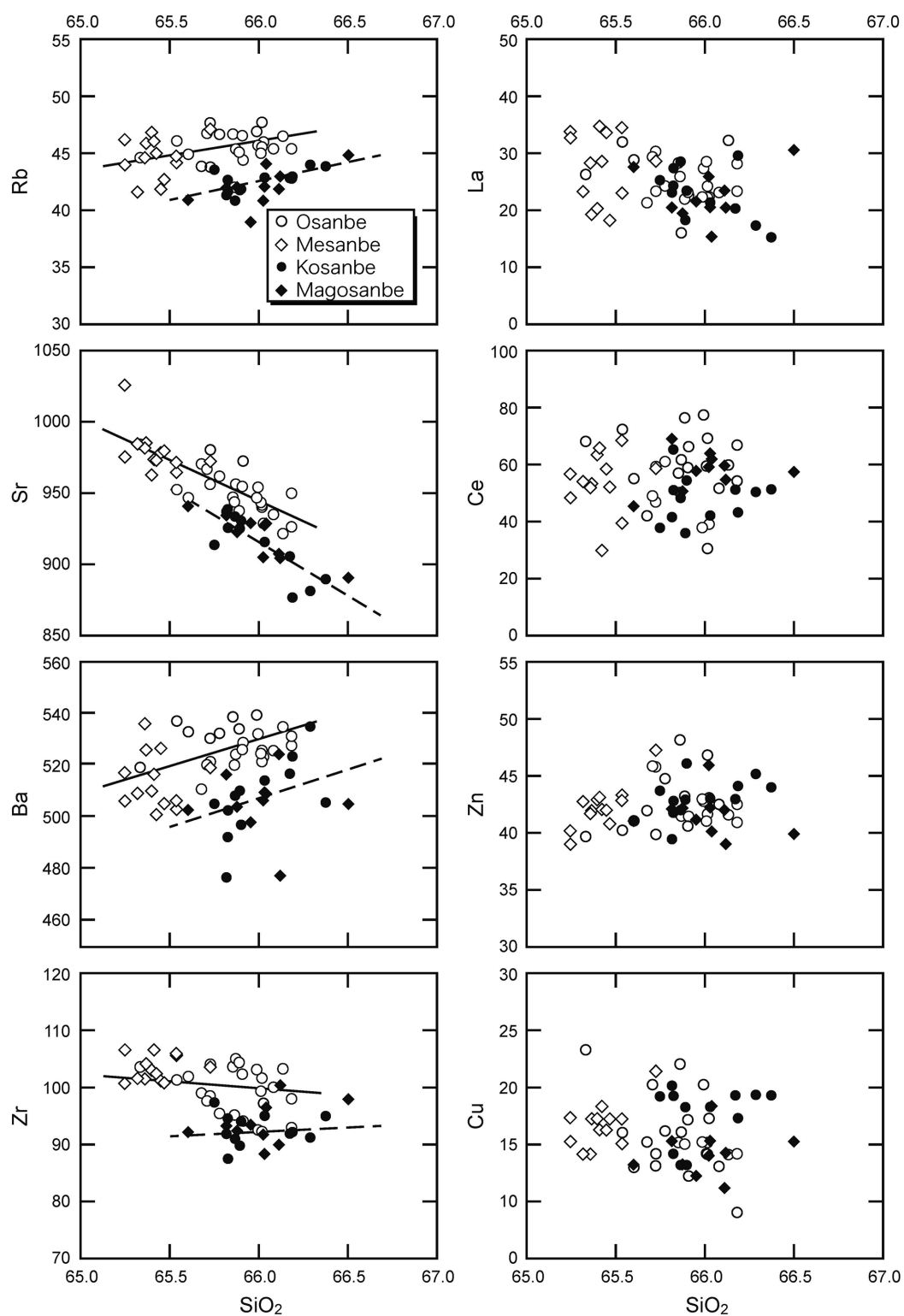


Fig. 6. Trace element compositions of Sanbe lava domes in ppm. High-K and low-K samples show systematic difference in Rb, Sr, Ba and Zr concentrations.

学的特性の相違である (Fig. 8). すなわち, 2つのグループにおいて K 以外にも認められた系統的な濃度差 (各元素の SiO₂ 変化図上のトレンドにおける, SiO₂ 65 wt.% における濃度の差) は Rb, K 及び La, Ce において大きく, 逆に Sr, Y において小さい.

このような2つのグループにおける元素の非一様な濃度差の成因を考慮する際に, 参考になるのが「固相・液相間の分配係数結晶構造支配則」(Matsui *et al.*, 1977) である. 例えば Tatsumi *et al.* (2008a) は, 東北日本の第四紀火山に産するソレライト質, カルクアルカリ質の2つのマグマの成因関係をそれぞれの未分化なマグマの化学

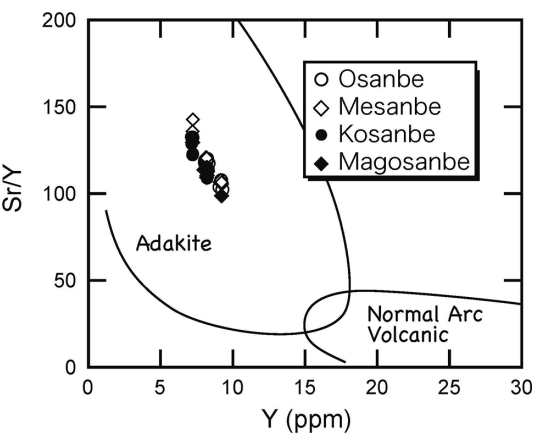


Fig. 7. Y vs. Sr/Y characteristics of Sanbe lava domes samples that are plotted well within the adakite field proposed by Defant and Drummond (1990).

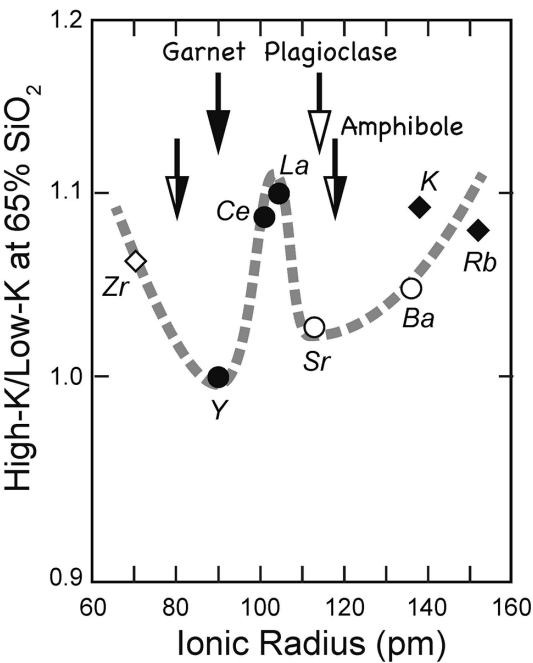


Fig. 8. Relative abundances of elements between high-K and low-K rocks in Sanbe lava dome as a function of ionic radius. The high-K magma is more depleted in elements that are likely to be partitioned into garnet, plagioclase and possibly amphibole than the low-K magma, suggesting production of two types of magmas by different degrees of partial melting in the presence of such phases. Filled diamonds, open and filled circles, and open diamonds show monovalent, divalent, trivalent and tetravalent cations, respectively.

Table 3. Petrographical and chemical characteristics of four peaks.

		Osanbe	Mesanbe	Kosanbe	Magosanbe
Matsumoto (1993)	Quartz		lower		
	SiO ₂	wider*	lower	narrower*	
	K ₂ O	higher	higher	lower narrower*	lowest*
This study	Quartz		lower		
	An-rich plagioclase	rare	usual	usual	rare
	SiO ₂		lower		
	Ti, Al, Fe vs. Si		distinct		
	K, Rb, Sr, Ba, Zr	higher	higher	lower	lower
	La, Ce, P				

* not observed in this study

的特徴を上記の支配則を用いて解析し、前者が斜長石と角閃石の存在する条件下、すなわち下部地殻の融解で生じたと議論した。同様に Fig. 8 を検討すると、高カリウムと低カリウムグループのマグマが、ザクロ石と斜長石（±角閃石）の存在下で異なる部分融解程度で形成された可能性が考えられる。Tatsumi *et al.* (2008b, 2015) の岩石学的モデリングによれば、含水玄武岩は下部地殻条件下でザクロ石、角閃石、斜長石が共存する岩相となる場合がある。従って、三瓶山アダカイトについても、このような鉱物組み合わせを持つ下部地殻物質が玄武岩質マグマやマントルダイアビルからの熱供給で部分融解した可能性が考えられる。このような条件では、熱源からの距離に依存して、部分融解程度の異なるマグマが形成することは可能である (Tatsumi *et al.*, 2008a)。

一方で、スラブ融解で生じたアダカイトマグマは、その高い石英成分含有量から、マントルカンラン岩と反応する運命にある。十分に反応が進むと高 Mg 安山岩質マグマとなる (Tatsumi and Hanyu, 2003) ので、アダカイトとして噴出するには反応が進まないうちに上昇することが必要である。しかしこのようなプロセスが実際に起こるかどうかはよく分からない。また、この条件を満足しつつ、斜長石と共存するマグマを作るには、さらに地殻内での反応が必要であり、あまりにも複雑かつアドホックな仮説と考える。

上述したように、三瓶山溶岩ドームの形成にはまず、男三瓶・女三瓶の高カリウムグループと、子三瓶・孫三瓶の低カリウムグループの2種類のマグマが地殻下部の部分融解によって形成された可能性が高い。これらは化学的特徴が明瞭に異なるので独立したマグマ溜りを形成し、それぞれのマグマ溜りにおける分化作用の違いによって最終的に4峰を形成する4種類のマグマが生成されたと考えられる。この分化作用について考察することは、化学組成特に SiO₂ 含有量の差が大きいために困難ではあるが、SiO₂ 変化図からは、主要斑晶鉱物である斜長石に加えて石英や磁鉄鉱の濃集や分別が予想される。

6. おわりに

中国地方で唯一の複成活火山である三瓶火山溶岩ドームは見かけ上4つのドームで構成されるが、記載岩石学的、岩石化学的特徴からも、4つの独立した溶岩ドームとして形成されたものと判断できる。またこの火山活動を起こしたアダカイトマグマは、玄武岩質下部地殻の異なる部分融解程度によって形成された可能性が高い。

謝 辞

蛍光 X 線分析装置の初期設定及び分析条件設定に当たっては、株式会社リガクの井上央氏にお世話になった。2名の査読者からの批判的かつ建設的なコメントは本論文の特色を明瞭にすることに大いに貢献した。

引用文献

- Chung, S. L., Liu, D. Y., Ji, J. Q., Chu, M. F., Lee, H. Y., Wen, D. J., Lo, C. H., Lee, T. Y., Qian, Q. and Zhang, Q. (2003) Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geol.*, **31**, 1021–1024.
- Defant, M. J. and Drummond, M. S. (1990) Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, **347**, 662–665.
- 福岡 孝 (2009) 三瓶火山は爆裂火口か？—室内の形成についての考察。島根県立三瓶自然館研究報告, **7**, 1–13.
- 福岡 孝・松井整司 (2002) AT 降灰以降の三瓶火山噴出物の層序。地球科学, **56**, 105–122.
- 福岡 孝・松井整司 (2004) 三瓶火山の噴火様式の変遷。島根県立三瓶自然館研究報告, **2**, 9–14.
- Gutscher, M.-A., Maury, R., Eissen, J. P. and Bourdon, B. (2000) Can slab melting be caused by flat subduction? *Geol.*, **28**, 535–538.
- 服部 仁・鹿野和彦・鈴木隆介・横山勝三・松浦浩久・佐藤博之 (1983) 三瓶山地域の地質。地域地質研究報告 (5 万分の1 地質図幅)。地質調査所, 168 p.
- 林 正久・三浦 清 (1987) 三瓶火山のテフラの層序とその分布。山陰地域硯究 (自然環境), **3**, 43–66.
- Hirose, F., Nakajima, J. and Hasegawa, A. (2008) Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography. *J. Geophys. Res.*, **113**, B09315, doi: 10.1029/2007JB005274.
- Hou, Z., Yang, Z., Lu, Y., Kemp, A., Zheng, Y., Li, Q., Tang, J. and Duan, L. (2015) A genetic linkage between subduction- and collision-related porphyry Cu deposits in continental collision zones. *Geol.*, **43**, 247–250.
- Kay, R. W. (1978) Aleutian magnesian andesites: Melts from subducted Pacific Ocean crust. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **4**, 117–132.
- 久野 久 (1954) 火山及び火山岩。岩波全書, 岩波書店, 東京, 255 p.
- 松井整司・井上多津男 (1971) 三瓶火山の噴出物と層序。地球科学, **25**, 147–163.
- Matsui, Y., Onuma, N., Nagasawa, H., Higuchi, H. and Banno, S. (1977) Crystal structure control in trace element partition between crystal and magma. *Bulletin de la Societe Francaise de Mineralogie et de Cristallographie*, **100**, 315–324.
- 松元拓朗 (1994) 三瓶火山円頂丘溶岩の化学組成。地質雑, **100**, 639–641.
- Morris, P. A. (1995) Slab melting as an explanation of Quaternary volcanism and aseismicity in southwest Japan. *Geol.*, **23**, 395–398.

- Nakanishi, I. (1980) Precursors to ScS phases and dipping interface in the upper mantle beneath southwestern Japan. *Tectonophysics*, **69**, 1–35.
- 小畑 浩 (1967) 三瓶山の地形と火山灰編年について. *地理学評論*, **40**, 553–563.
- Okino, K., Shimakawa, Y., and Nagaoka, S. (1994) Evolution of the Shikoku Basin. *J. Geomag. Geoelect.*, **46**, 463–479.
- Peacock, S. M. and Wang, K. (1999) Seismic consequences of warm versus cool subduction zone metamorphism: Examples from northeast and southwest Japan. *Science*, **286**, 937–939.
- 鈴木隆介・横山勝三・高橋健一 (1968) 三瓶火山の活動史と地形. *地理学評論*, **41**, 386–387.
- Tatsumi, Y. and Eggins, S. (1995) **Subduction zone magmatism**. Blackwell, Boston, 211 p.
- Tatsumi, Y. and Hanyu, T. (2003) Geochemical modeling of dehydration and partial melting of subducting lithosphere: Towards a comprehensive understanding of high-Mg andesite formation in the Setouchi volcanic belt, SW Japan. *Geochem. Geophys. Geosys.*, **4**, doi: 10.1029/2003GC000530.
- Tatsumi, Y., Sato, T. and Kodaira, S. (2015) Evolution of the Earth as an andesite planet: water, plate tectonics, and delamination of anti-continent. *Earth Planets Space*, **67**, DOI 10.1186/s40623-015-0267-2.
- Tatsumi, Y., Takahashi, T., Hirahara, Y., Chang, Q., Miyazaki, T., Kimura, J.-i., Ban, M. and Sakayori, A. (2008a) New insights into andesite genesis: The role of mantle-derived calc-alkalic and crust-derived tholeiitic melts in magma differentiation beneath Zao Volcano, NE Japan. *J. Petrol.*, **49**, 1971–2008.
- Tatsumi, Y., Shukuno, H., Tani, K., Takahashi, N., Kodaira, S. and Kogiso, T. (2008b) Structure and growth of the Izu-Bonin-Mariana arc crust: 2. Role of crust-mantle transformation and the transparent Moho in arc crust evolution. *J. Geophys. Res.*, **113**, B02203, doi: 10.1029/2007JB005121.
- 山田康治郎・河野久征・村田 守 (1994) 低希釈率ガラスビード法による岩石の主成分と微量成分分析. X線分析の進歩, **26**, 33–44.
- 山口鎌次 (1963) 三瓶火山の地質—特に頂上部の Tholoide の地質構造と形態とについて. *地質雑*, **69**, 325.
- Yogodzinski, G. M., Lees, J. M., Churikova, T. G., Dorendorf, F., Woerner, G. and Volynets, O. N. (2001) Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges. *Nature*, **409**, 500–504.
- Zellmer, G. F., Iizuka, Y., Miyoshi, M., Tamura, Y. and Tatsumi, Y. (2012) Lower crustal H₂O controls on the formation of adakitic melts. *Geol.*, **40**, 487–490.
- Zhao, D., Yanada, T., Hasegawa, A., Umio, N. and Wei, W. (2012) Imaging the subducting slabs and mantle upwelling under the Japan Islands. *Geophys. J. Int.*, **190**, 816–828.

(編集担当 鈴木由希)