

火山弾による桜島火山のマグマ溜りの温度の推定

著者	山本 温彦, 大庭 昇, 富田 克利
雑誌名	鹿児島大学理学部紀要. 地学・生物学
巻	12
ページ	33-38
別言語のタイトル	Estimation of Temperature of Magma reservoir of Sakurajima Volcano by Volcanic Bomb
URL	http://hdl.handle.net/10232/00003912

火山弾による桜島火山のマグマ溜りの温度の推定

山本温彦*・大庭 昇*・富田克利*

(1979年9月28日受理)

Estimation of Temperature of Magma Reservoir of Sakurajima Volcano by Volcanic Bomb

Masahiko YAMAMOTO*, Noboru ÔBA*, and Katsutoshi TOMITA*

Abstract

Temperature of a magma reservoir of Sakurajima Volcano was estimated from petrochemical data of a volcanic bomb erupted on November 30, 1977. It is reported by TANEDA (1961) and YOSHIDOME (1974) that the Volcano would have two magma reservoirs, an upper reservoir at about 2.5 km in depth and a lower one at about 10 km. Chemical composition of glasses included within plagioclase and pyroxene phenocrysts of the bomb indicates that it is close to that of liquid phase in the lower magma reservoir, and that the phenocrysts were crystallized in the same reservoir. Melting relations of an andesite (EGGLER, 1972) and a granodiorite (PIWINSKII and WYLLIE, 1968) were used for estimation of temperature of the reservoir. The temperature was also calculated from geothermometer of electron-probe microanalyzed augite and hypersthene phenocrysts. The reservoir has temperature between 950°C and 1,040°C, and its water content would be more than 4 weight per cent.

まえがき

桜島火山南岳は最近活発に活動し、たびたび多量の噴出物を放出している。1977年11月30日の爆発では、比較的大きなパン皮状火山弾が鹿児島市東桜島町有村海岸に落下した。この火山弾の産状、モード組成および化学組成、斑晶斜長石および輝石類の化学組成、および斑晶中に包有されている火山ガラスの産状および化学組成については、筆者らが報告した(山本ほか、投稿中)。本報では、これらの岩石学的データを使って、桜島火山のマグマ溜りの温度の推定を試みることにする。

本研究の過程で、有益な助言を賜った鹿児島大学理学部地学教室角田寿喜講師に感謝する。また、EPMAの分析をしていただいた鹿児島大学教養部地学教室根建心具助教授および上笹貫 猛氏に感謝する。

火山ガラスの化学組成からみたマグマ溜りの深さ

1977年11月30日の火山弾の斑晶中の火山ガラスの化学組成は、ノルム Or 含有量がノルム An 含有量に卓越し、流紋岩質組成を示す(山本ほか、投稿中)。そこで、第1図にノルム Q-

* 鹿児島大学理学部地学教室 Institute of Earth Sciences, Faculty of Science, Kagoshima University, Kagoshima, Japan.

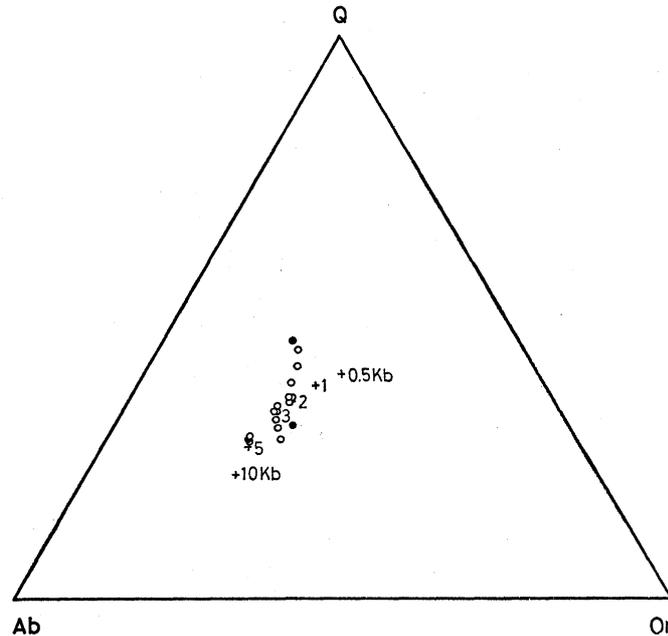


Fig. 1. Composition of volcanic glasses within phenocryst plotted in the normative Q-Ab-Or system. Crosses represent the minimum melting composition at pressures indicated in Kb in the Q-Ab-Or-H₂O system experimentally determined by TUTTLE and BOWEN (1958) and LUTH *et al.* (1964).

Open circles: Glasses in plagioclase. Solid circles: Glasses in pyroxene.

Ab-Or 三角図を示す。第 1 図中、火山ガラスの多くは、Or-Ab-Q-H₂O 系の 3Kb を中心として、2~5 Kb の minimum melting composition (TUTTLE and BOWEN, 1958; LUTH *et al.*, 1964) に沿ってプロットされる。3Kb の圧力は約 11 km の深さに相当する。

TANEDA (1961) は、桜島火山のマグマ溜りが山体の直下と始良カルデラの地下約 10km の上下 2 個所に存在すると推定している。同様に、吉留 (1974) は、地球物理学的データから、山体の直下 2.5km と始良カルデラの地下 9.5km の 2 個所を中心とするマグマ溜りが存在すると推定している。一方、1975 年 8 月から 1977 年 10 月の間に起った A 型地震の震源の分布 (西, 1978) には、10km を中心として 7~13km の深さのものが見られ、その震源の深さは噴火が近づくにつれて浅所に移動することが知られている (加茂, 1978)。

以上のことから、第 1 図中の火山ガラスの組成にばらつきが見られること、および火山ガラスの DI 値 (THORNTON and TUTTLE, 1960) が低すぎることに疑問はあるが、第 1 図において火山ガラスの組成が 3Kb の minimum melting composition に密接にプロットされることは、TANEDA (1961) および吉留 (1974) によって推定された下方のマグマ溜りの位置とうまく調和していることがわかる。それ故、火山ガラスの組成は下方のマグマ溜りの液相の組成を表わしているものと考えられる。

火山弾の化学組成によるマグマ溜りの温度の推定

1977 年 11 月 30 日の火山弾はカルクアルカリ岩系の安山岩質組成を示す (第 1 表)。カルクアルカリ岩については、多数の熔融実験の報告がなされている (例えば、GREEN and RINGWOOD, 1968). EGGLEER (1972) は、メキシコの Paricutin 火山の安山岩について、異

Table 1. Composition of volcanic bomb, Paricutin andesite and Wallowa granodiorite

No.	1	2	3	4	5	
SiO ₂	60.02%	67.41%	60.09%	64.2 %	69.44%	
TiO ₂	0.88	0.89	0.81	1.51	0.31	
Al ₂ O ₃	16.81	13.24	17.28	13.3	14.82	
Fe ₂ O ₃	1.61	—	—	—	1.09	
FeO	5.67	5.38*	5.29*	6.2*	1.56	
MnO	0.16	—	—	—	0.05	
MgO	3.00	1.35	3.73	0.99	1.59	
CaO	5.65	2.75	6.16	3.1	3.31	
Na ₂ O	3.37	3.58	4.00	4.4	3.31	
K ₂ O	1.42	2.82	1.67	2.8	3.81	
H ₂ O+	0.81	—	—	—	0.37	
H ₂ O-	0.22	—	—	—	0.07	
P ₂ O ₅	0.11	—	—	—	0.10	
Total	99.73	97.42	99.03	96.50	99.83	
Q	15.27	24.47	9.21	17.25	26.03	
Or	8.39	16.67	9.87	16.55	22.52	
Ab	28.52	30.29	33.85	37.23	28.01	
An	26.55	11.73	24.26	8.27	14.33	
Di	Wo	0.32	0.80	2.63	0.60	
	En	0.15	0.24	1.35	0.40	
Hy	Fs	0.16	0.60	1.22	0.16	
	En	7.32	3.12	7.93	1.78	3.56
Mt	Fs	7.76	7.81	7.16	6.42	1.39
		2.33	—	—	—	1.58
Il	1.67	1.69	1.54	2.87	0.59	
Ap	0.25%	— %	— %	— %	0.23%	

* Total Fe as FeO.

1. Volcanic bomb of Sakurajima Volcano.
2. Average of seventeen glasses from volcanic bomb of Sakurajima Volcano.
3. Paricutin andesite (WILCOX, 1956).
4. Groundmass of Paricutin andesite (EGGLER, 1972).
5. Wallowa granodiorite (PIWINSKII and WYLLIE, 1968).

なる H₂O 含有量における溶融実験を報告した。火山弾はこの安山岩 (WILCOX, 1956) と、また、火山弾中の火山ガラスはこの安山岩の石基 (EGGLER, 1972) と似た組成を示す (第 1 表)。それ故、EGGLER (1972) の報告は、火山弾の生成条件を考察する上で利用できるもので、その PT 図を第 2 図に示す。

火山弾では、斜長石斑晶中に斑晶と同じ組成をもつ輝石類が包有されており (山本ほか、投稿中)、輝石類が斜長石よりも先に晶出したことを示す。

今、圧力を 3Kb とし、第 2 図から判断すると、輝石類が斜長石より先に晶出するためには、H₂O 含有量が約 4wt. % 以上、また、温度が約 1040°C 以下でなければならない。一方、マグマ中の H₂O が飽和している状態を考えると、第 2 図において、3Kb では、輝石類が斜長石よりも先に晶出し、斜長石の晶出温度は約 965°C である。以上のことから、火山弾の化学組成から推定されるマグマ溜りの温度は 965~1040°C の範囲となる。

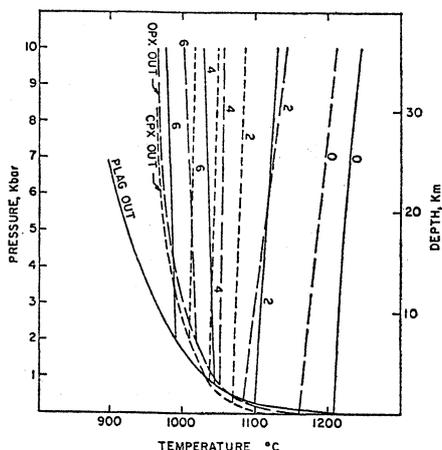


Fig. 2. P-T diagram of melting curves in Paricutin andesite experimentally studied by EGGLE (1972). Numbers represent weight percent H_2O in melt, except for phase-out cruves in H_2O -saturated conditions. Solid lines: Plagioclase out. Long-dashed lines: Orthopyroxene out. Short-dashed lines: Clinopyroxene out. Abbreviations: Plag, plagioclase; Opx, orthopyroxene; Cpx, clinopyroxene.

火山ガラスの化学組成によるマグマ溜りの温度の推定

1977年11月30日の火山弾の斑晶中の火山ガラスの化学組成は流紋岩質である(山本ほか, 投稿中)ので, 花崗岩類の溶融実験が利用できる。花崗岩類についても多数の溶融実験の報告がなされている(例えば, PIWINSKII and WYLLIE, 1968)。しかし, H_2O が不飽和な状況下における天然の花崗岩についての溶融実験の定量的データはほとんど報告がなされていない。

今, マグマ溜りにおける H_2O 含有量が 4wt. % と仮定すると, 火山弾のモード組成(山本ほか, 投稿中)から求めた液相中の H_2O 含有量約 5.5wt. % 以上となる。ROBERTSON and WYLLIE (1971) の花崗閃緑岩の溶融実験では, その系中に 6wt. % の H_2O が存在すれば飽和状態に達する。それ故, マグマ溜りの液相中の H_2O は飽和状態に近いことが考えられる。このことは, 第1図において火山ガラスの組成が minimum melting composition に密接にプロットされることとも調和している。

そこで, マグマ中の H_2O が飽和している状態を考えると, PIWINSKII and WYLLIE (1968) の溶融実験において, 2Kb では, Wallowa 花崗閃緑岩(第1表)の liquidus phase は普通角閃石であり, その液相温度は約 $975^{\circ}C$ である。PT 図において, 普通角閃石の安定曲線は正の勾配をもち, 2Kb と 3Kb とでは, その温度差はせいぜい $10^{\circ}C$ 前後である。以上のように, 火山ガラスの組成から推定されるマグマ溜りの温度は $975^{\circ}C$ 以上である。

輝石地質温度計の利用

1977年11月30日の火山弾中の斑晶輝石類を EPMA で分析した。結果をそれらの構造式とともに第2表に示す。分析した輝石類の組成は, 荒牧(1976)が報告した1972年10月2日, 1973年4月9日および1975年10月30日の南岳噴出物中の斑晶輝石類の組成とよく一致している。

EPMA 分析した輝石類の組成から, 輝石地質温度計を用いてその晶出温度を求めると, WELLS (1977) の式を使うと $1008^{\circ}C$, また, WOOD and BANNO (1973) の式を使うと $953^{\circ}C$ となる。

ま と め

これまでの種々の方法で求められた温度を圧力および H_2O 含有量とともに第3表に一括し

Table 2. Electron-probe microanalyses and structural formulae* of augite and hypersthene

No.	1	2	No.	1	2
SiO ₂	51.03%	52.16%	Si	1.930	1.951
TiO ₂	0.50	0.30	Al ^{VI}	0.070	0.032
Al ₂ O ₃	1.57	0.73	Z	2.000	1.983
FeO**	10.85	21.62	Cr	tr.	—
MnO	0.36	0.62	Ti	0.014	0.009
MgO	14.72	22.73	Fe ⁺²	0.292	0.352
CaO	20.01	1.69	Mg	0.709	0.661
Na ₂ O	0.27	0.07	M ₁	1.015	1.022
K ₂ O	0.02	0.01	Ca	0.811	0.068
Cr ₂ O ₃	0.01	tr.	Na	0.020	0.005
Total	99.34%	99.93%	K	0.001	tr.
			Mn	0.012	0.020
			Fe ⁺²	0.051	0.324
			Mg	0.121	0.606
			M ₂	1.016	1.023

* Calculated on the basis of six oxygens per formula unit.

** Total Fe as FeO.

1. Average of six augites. 2. Average of six hypersthene.

Table 3. List for estimation of temperature of the Sakurajima lower magma reservoir

	Rock	P(Kb)	t(°C)	H ₂ O(%)	Reference
Pl and Cpx outs	And	3	1,040	4	EGGLER (1972)
Pl out	And	3	965	excess	EGGLER (1972)
Liquidus	Gd	2	975	excess	PIWINSKII and WYLLIE (1968)
Opx-Cpx geothermometer*	—	—	1,008	—	
Opx-Cpx geothermometer**	—	—	953	—	
Showa lava	—	air	950	—	NAGATA <i>et al.</i> (1946)

* Calculated from WELLS' (1977) equation.

** Calculated from WOOD and BANNO's (1973) equation.

Abbreviations: Pl, plagioclase; Cpx, clinopyroxene; Opx, orthopyroxene; And, Paricutin andesite; Gd, Wallowa granodiorite.

て示す。これらの温度は 950~1040°C の範囲に入り、その差は 90°C で、比較的良好一致しているといえる。また、これらの温度は永田ほか (1946) によって報告された昭和溶岩の温度、950°C にもうまく調和している。

以上をまとめると、1977年11月30日の火山弾中の火山ガラスの組成は下方のマグマ溜りの液相のそれを表わし、斑晶の大部分はこのマグマ溜りで形成されたと推定される。また、下方のマグマ溜りは深さ約 10km の位置にあり、圧力にして 3Kb であるので、その温度は 950~1040°C の範囲にあり、その H₂O 含有量は 4wt.% 以上で、温度が低ければ、H₂O に飽和している状態も可能であると推定される。

あ と が き

本報では、桜島火山の上下2個所のマグマ溜りの内、深さ約10kmの位置にある下方のものについて、種々の方法を用いてその温度とH₂O含有量の推定を行った。しかし、深さ約2.5km付近にある上方のマグマ溜りに関しては、今のところ何の手掛りも得られていない。また、HAMILTON *et al.* (1964) が報告しているように、酸素分圧の差により輝石と斜長石の晶出温度に差が生じるが、本報では、酸素分圧に関しては全く触れていない。これらのことの解明は今後の課題である。さらに、マグマ溜りの状況を知る上で、火山弾の溶融実験を行うことが必要であると考えられる。

文 献

- 荒牧重雄, 1976, 鹿児島湾北部の地質構造と堆積物による過去の火山活動史. 鹿児島湾北部の海中火山活動と環境調査報告, 15-20.
- EGGLER, D.H., 1972, Water-saturated and undersaturated melting relations in a Paricutin andesite and an estimate of water content in the natural magma. *Contr. Mineral. Petrol.*, **34**, 261-271.
- GREEN, T.H. and RINGWOOD, A.E., 1968, Genesis of the calc-alkaline igneous rock suite. *Ibid.*, **18**, 105-162.
- HAMILTON, D.L., BURNHAM, C.W., and OSBORN, E.F., 1964, The solubility of water and effects of oxygen fugacity and water content on crystallization in mafic magmas. *J. Petrol.*, **5**, 21-39.
- 加茂幸介, 1978, 桜島における噴火の前駆現象と予知. 火山, 2集, **23**, 53-64.
- LUTH, W.C., JAHNS, R.H., and TUTTLE, O.F., 1964, The granite system at pressures of 4 to 10 kilobars. *J. Geophys. Res.*, **69**, 759-773.
- 永田 武・佐久間修三・福島 直, 1946, 桜島新噴出熔岩流について. 震研集報, **24**, 161-169.
- 西 潔, 1978, 桜島火山に発生するやや深い地震の発震機構. 京大防災研年報, **21**, 145-152.
- PIWINSKII, A.J. and WYLLIE, P.J., 1968, Experimental studies of igneous rock series: Wallowa batholith, Oregon. *J. Geol.*, **76**, 205-234.
- ROBERTSON, J.K. and WYLLIE, P.J., 1971, Experimental studies on rocks from Deboullie stock, northern Maine, including melting relations in the water-deficient region. *Ibid.*, **79**, 549-571.
- TANEDA, S., 1961, Moving of the magma chamber of the Sakurajima Volcano. *J. Geol. Soc. Japan*, **67**, 593-605.
- THORNTON, C. and TUTTLE, O.F., 1960, Chemistry of igneous rocks. I. Differentiation index. *Amer. J. Sci.*, **258**, 664-684.
- TUTTLE, O.F. and BOWEN, N.L., 1958, Origin of granite in the light of experimental studies in the system NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂-H₂O. *Mem. Geol. Soc. Amer.*, **74**.
- WELLS, P.R.A., 1977, Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contr. Mineral. Petrol.*, **62**, 129-139.
- WILCOX, R.E., 1956, Petrology of Paricutin volcano, Mexico. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, **965-C**, 281-353.
- WOOD, B.J. and BANNO, S., 1973, Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. *Contr. Mineral. Petrol.*, **42**, 109-124.
- 山本温彦・大庭 昇・富田克利, 1977年11月30日の桜島火山の火山弾. 岩鉱, 投稿中.
- 吉留道哉, 1974, 桜島周辺における地震記録の異常とマグマたまりとの関連について. 験震時報, **39**, 49-62.