

高原火山，富士山におけるマグマ混合機構：
苦鉄質包有物による検討

田島義之*・荒川洋二**・池端 慶**・金井啓通*

(2013年10月24日受付, 2014年2月10日受理)

Magma Mixing Mechanism of Fujiyama in Takahara Volcano, Northeast Japan:
Evidence from the Mafic Inclusions

Yoshiyuki TAJIMA*, Yoji ARAKAWA**, Kei IKEHATA** and Hiromichi KANAI*

The Takahara volcano is a Quaternary stratovolcano located on the volcanic front in the southern part of the northeast Japan arc. Fujiyama is a dacitic lava dome in the northern part of the Takahara volcano, with dominant mafic inclusions that are andesitic in composition. A few phenocrysts lie across the boundary between host dacites and inclusions. Plagioclase and orthopyroxene phenocrysts in the host rocks and inclusions, respectively, have wide compositional variations; the whole-rock major and trace element compositions of these rocks yield linear data distributions. These results indicate that mixing between felsic and mafic magma occurred during the formation of the Fujiyama magma. The felsic end-member could be close in composition to the host dacite, whereas the mafic end-member is not similar to that of the eruptive products at the early stage of the Takahara volcano. It is suggested that the mafic inclusions were composed of andesitic magma formed by mixing in the chamber and then mingling in the conduit during ascent.

Key words: Takahara volcano, Fujiyama lava dome, mafic inclusion, magma mixing

1. はじめに

高原火山は栃木県北部、火山フロント上に位置する第四紀火山である (Fig. 1)。本論の対象である富士山は、高原火山北部に形成されたデイサイトからなる溶岩ドームである。高原火山ではソレライト・カルクアルカリ両系列の活動が報告されている (池島・青木, 1962)。これらのマグマの成因は液相濃集元素の比が類似していることから、それぞれ同様の初生マグマからの異なる結晶分化作用で形成されたことが説明されている (井上・他, 1994)。この研究の中で、富士山のデイサイトについても結晶分化作用により形成されたことが考えられている。

苦鉄質包有物の岩石学的特徴、組成などの詳細を知ることは、マグマ供給系の進化過程を考察する上で重要で

ある。島弧火山の噴出物には、縞状軽石や苦鉄質包有物などの不均質な岩石学的特徴が認められることが多い。それらが形成される重要な要因の1つとしてマグマ混合が指摘されている (例えば, Eichelberger, 1980; Bacon, 1986; Koyaguchi, 1986a)。富士山では苦鉄質包有物の存在が報告され (池島・青木, 1962)、マグマ混合が示唆されるが、それらの岩石学的な研究例はない。本論では、母岩のデイサイト及び苦鉄質包有物の岩石記載、鉱物及び全岩の化学組成の分析値をもとに、苦鉄質包有物の形成及びマグマ供給系に関して考察を行った。

2. 地質概説

高原火山は地形的には北部の塩原火山体と南部の釈

* 〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学生命環境科学研究科
Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tennodai 1-1-1, Tsukuba 305-8577, Japan

** 〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

筑波大学生命環境系
Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tennodai 1-1-1, Tsukuba 305-8577, Japan

Corresponding author: Yoshiyuki Tajima
e-mail: y_tajima@geol.tsukuba.ac.jp

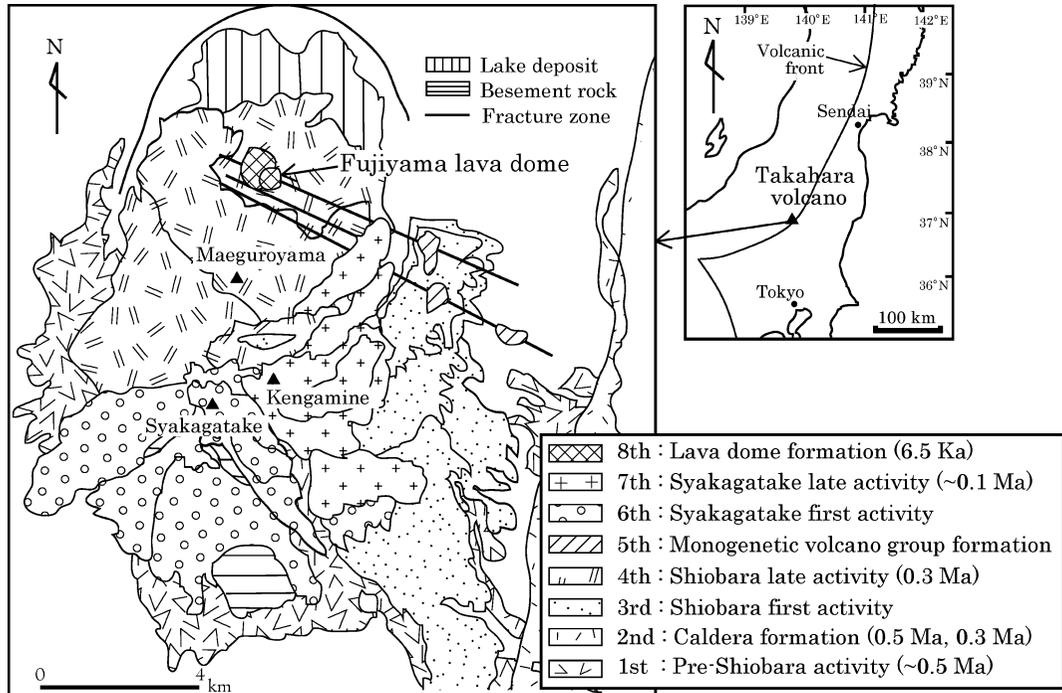


Fig. 1. Locality and geological map of the Takahara volcano. The Fujiyama lava dome is located in the northern part of the Takahara volcano. The map is modified after Inoue *et al.* (1994).

迦ヶ岳火山体に大別される(伴・他, 1992)。高原火山の形成史は井上・他(1994)によって区分されている(Fig. 1)。1期の噴出物は凝灰角礫岩と玄武岩質溶岩流であり、テフラ層序から約50万年前には活動を開始したと推定されている(井上・他, 1994)。2期には高原火山の東～南東に分布する大田原軽石流が噴出している。小池・他(1985)は大田原軽石流の下位の戸祭ローム層中のテフラについて約50万年前というフィッシュトラック年代を報告している。ただしこれについては約30万年前という報告もなされている(鈴木・他, 2004)。3～7期は安山岩質～デイサイト質の溶岩流であり、4期の溶岩の年代として約30万年前のK-Ar年代が報告されている(Itaya *et al.*, 1989)。高原火山はテフラ層序から約10万年前に主要な活動を終えたことが推定された(井上・他, 1994)。しかしながら、富士山に関しては ^{14}C 年代や熱ルミネッセンス年代から約6500年前に形成されたことが新たに示された(奥野・他, 1997;高島, 1999)。

富士山では標高1050m付近の山麓から山頂にかけて広い範囲に大小様々な岩塊が存在し、山頂付近ではより大きな岩塊が確認できる。本研究で扱う母岩及び苦鉄質包有物は、山麓から山頂付近の複数の地点から採取したものである。なお、富士山の西方に位置する新湯では現

在も噴気活動が確認できる。

3. 岩石記載

3-1 デイサイト

斑晶は斜長石、石英、斜方輝石、普通角閃石、鉄チタン酸化物からなり、普通輝石を伴うことがある。斜長石斑晶は最大径3mmで自形～他形を示す。清澄なものがほとんどであるが、汚濁帯をもつものもまれに含まれる。石英斑晶は最大径3mmで半自形～他形を示す。斜方輝石斑晶は最大径1.5mmで自形～他形を示す。普通角閃石は最大径4mmで自形～半自形を示す。また、斜長石を包有し、オパサイト縁をもつ普通角閃石も含まれる。鉄チタン酸化物は磁鉄鉱またはチタン磁鉄鉱であり、粒径は最大径0.5mmである。普通輝石は最大径1mmで半自形～他形である。

石基には斜長石、斜方輝石、普通輝石、不透明鉱物が認められるが、ガラスが多い。組織はハイアロオフィティックである。

3-2 苦鉄質包有物

苦鉄質包有物は暗色で径数cm～数10cm、外形は球形～楕円形のもものがほとんどである(Fig. 2, a)。包有物の割合は場所により異なるが、1～5 vol.%である。母岩と

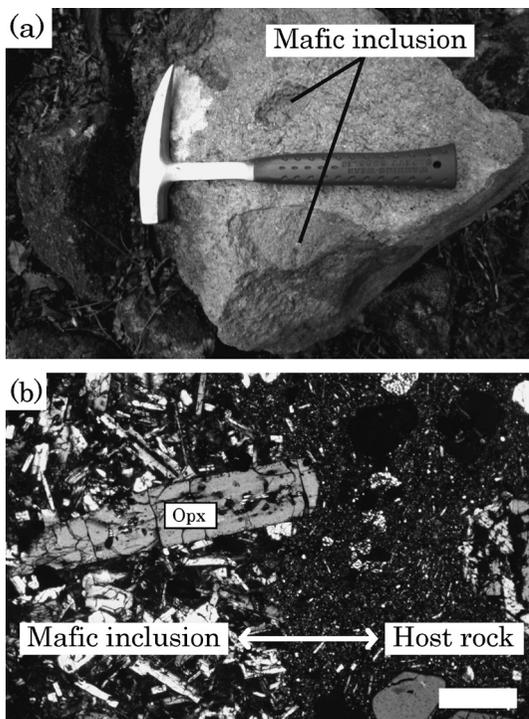


Fig. 2. (a) Occurrence of mafic inclusions from the Takahara volcano. The length of the hammer is 33 cm. (b) Photomicrograph of the boundary between the host rock and mafic inclusion. It was taken with crossed nicols. Scale bar=0.5 mm. A few phenocrysts (e.g., Opx: Orthopyroxene) straddle the boundary between the host rock and inclusion.

の境界部では、斑晶が母岩と苦鉄質包有物との双方にまたがって存在していることがある (Fig. 2, b). 包有物には母岩 (0.1~0.5 vol.%) と比較して、気泡が多く含まれる (5~10 vol.%). これらの特徴は他の珪長質火山岩から報告されている苦鉄質包有物と類似しており、包有物が珪長質マグマに取り込まれたときに少なくとも一部が液体であったことを示唆し、古い火山岩由来の類質岩片ではないことを示している (Bacon, 1986; Koyaguchi, 1986a).

斑晶は斜長石, 斜方輝石, 普通輝石, 鉄チタン酸化物からなり, 普通角閃石, 石英を伴うことがある. 斜長石斑晶は最大径 2mm で自形~他形を示し, 清澄なものや汚濁帯をもつものがある. 斜方輝石斑晶は最大径 1mm で自形~他形を示す. 普通輝石斑晶は最大径 1mm で自形~他形を示す. 鉄チタン酸化物は磁鉄鉱またはチタン磁鉄鉱であり, 最大径 0.5mm である. 普通角閃石斑晶は最大径 1mm で他形を示し, 斜方輝石からなるリムが確認できるものが多い. 石英斑晶は最大径 0.5mm

で他形を示し, 全てのもので周囲を細粒な単斜輝石の反応縁が取り囲んでいる.

石基は柱状~針状の斜長石, 斜方輝石, 普通輝石, 不透明鉱物から構成され, 間隙にガラスを含む. 石基鉱物の粒径は 0.5mm に達するものもあり, 母岩と比較して粗粒な特徴を示す. 全体的に, ディクティタキシティック組織を示す.

4. 化学組成分析結果

4-1 鉱物化学組成

鉱物化学組成分析は筑波大学研究基盤総合センターの EPMA (日本電子製 JXA-8530F) を使用した. 測定条件は加速電圧 15kV, 照射電流 10nA, ビーム径 5 μ m である. 補正法は ZAF 法を用いた. Table 1 に斑晶鉱物の代表的な分析値を示す.

デイサイト及び苦鉄質包有物の斜長石斑晶コアの An 組成 $[=100 \times \text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Na})]$ は広い組成幅を示す (Fig. 3). どちらも高 An 斜長石 (An>80) と低 An 斜長石 (An<70) が含まれる (Fig. 3). 高 An 斜長石をタイプ 1, 低 An 斜長石をタイプ 2 とした. デイサイトではどちらのタイプも正累帯構造を示すことが多いが, 一部のタイプ 2 斜長石では逆累帯構造を示す. 苦鉄質包有物中のタイプ 2 斜長石には汚濁帯をもつものが存在し, 逆累帯構造を示すものが多い. デイサイトではタイプ 2 斜長石が, 苦鉄質包有物ではタイプ 1 斜長石が卓越する. 石基斜長石の An 組成はどちらもタイプ 1 とタイプ 2 の中間組成を示す.

デイサイト及び苦鉄質包有物の斜方輝石斑晶コアの Mg# $[=100 \times \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})]$ は広い組成幅を示す (Fig. 3). どちらも高 Mg# 斜方輝石 (Mg#>68) と低 Mg# 斜方輝石 (Mg#<64) が含まれる. 高 Mg# 斜方輝石をタイプ 1, 低 Mg# 斜方輝石をタイプ 2 とした. デイサイトではタイプ 2 斜方輝石が, 苦鉄質包有物ではタイプ 1 斜方輝石が卓越する. Mg# に関して, 多くは正累帯構造を示すが, 苦鉄質包有物では逆累帯構造を示すタイプ 2 斜方輝石が存在する. 石基斜方輝石の Mg# はタイプ 1 とタイプ 2 の中間組成を示す.

普通輝石斑晶コアの Mg# は, デイサイトで Mg#=74, 苦鉄質包有物では, Mg#=70-78 を示し, それぞれの組成は類似している (Fig. 3).

普通角閃石斑晶コアの Mg# は, デイサイトで Mg#=60-68, 苦鉄質包有物では, Mg#=62-66 を示し, それぞれの組成は類似している (Fig. 3). また, どちらもタイプ 2 斜長石 (An=53-68) を包有していることが多い.

4-2 全岩化学組成

全岩化学組成分析は Activation Laboratories Ltd., Canada

Table 1. Representative chemical compositions of the phenocrysts in dacites and mafic inclusions from Fujiyama in the Takahara volcano.

Plagioclase									Hornblende				
Rock No. (wt. %)	Dacite		Dacite		Inclusion		Inclusion		Rock No. (wt. %)	Dacite		Inclusion	
	54Pl2 (Type2)		6Pl5 (Type1)		47Pl2 (Type2)		2Pl1 (Type1)			48Hbl1		1Hbl2	
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim		Core	Rim	Core	Rim
SiO ₂	56.45	57.22	50.00	59.29	57.63	52.72	45.26	50.04	SiO ₂	49.67	49.47	48.94	49.22
TiO ₂	0.03	0.00	0.01	0.04	0.05	0.00	0.01	0.03	TiO ₂	1.14	1.07	1.28	1.30
Al ₂ O ₃	26.93	26.81	32.57	25.55	27.39	30.33	34.08	30.55	Al ₂ O ₃	6.54	7.08	6.75	6.31
FeO	0.25	0.26	0.33	0.21	0.15	0.60	0.49	0.75	FeO	15.45	15.30	15.27	14.15
MnO	0.05	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	MnO	0.35	0.31	0.45	0.38
MgO	0.04	0.02	0.01	0.03	0.00	0.06	0.05	0.09	MgO	14.45	13.84	13.26	13.69
CaO	9.79	9.59	16.40	9.10	10.25	14.49	18.31	15.13	CaO	10.36	10.17	10.87	10.96
Na ₂ O	5.51	5.64	1.99	6.13	5.43	3.00	0.99	2.61	Na ₂ O	1.43	1.27	1.28	1.21
K ₂ O	0.21	0.21	0.03	0.29	0.18	0.21	0.03	0.05	K ₂ O	0.27	0.24	0.23	0.19
Total	99.27	99.74	101.38	100.63	101.08	101.41	99.22	99.25	Total	99.65	98.75	98.33	97.41
An	49.5	48.4	82.0	45.1	51.1	72.8	91.1	76.2	Mg#	62.5	61.7	60.8	63.3

Orthopyroxene									Clinopyroxene				
Rock No. (wt. %)	Dacite		Dacite		Inclusion		Inclusion		Rock No. (wt. %)	Dacite		Inclusion	
	34Opx1 (Type2)		36Opx2 (Type1)		37Opx5 (Type2)		3Opx2 (Type1)			48Cpx1		3Cpx1	
	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim		Core	Rim	Core	Rim
SiO ₂	52.18	53.21	53.69	53.49	51.78	53.14	55.93	55.20	SiO ₂	54.38	53.74	53.01	53.53
TiO ₂	0.10	0.04	0.15	0.07	0.09	0.03	0.08	0.03	TiO ₂	0.25	0.26	0.44	0.19
Al ₂ O ₃	0.70	0.47	1.03	1.03	0.55	0.41	1.12	0.95	Al ₂ O ₃	1.40	2.26	2.08	1.35
FeO	26.28	26.34	15.09	15.66	25.71	25.39	15.22	16.92	FeO	9.70	8.47	9.55	8.60
MnO	1.15	1.20	0.31	0.45	1.28	1.22	0.34	0.57	MnO	0.51	0.26	0.41	0.44
MgO	19.68	19.07	27.80	26.96	20.30	20.62	26.94	26.19	MgO	15.06	15.90	14.91	15.26
CaO	0.60	0.73	1.71	1.27	0.78	0.87	1.39	1.24	CaO	20.14	20.14	19.61	20.37
Na ₂ O	0.02	0.03	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	Na ₂ O	0.26	0.21	0.26	0.21
Total	100.71	101.09	99.83	98.98	100.50	101.69	101.04	101.12	Total	101.69	101.25	100.28	99.95
Mg#	57.2	56.3	76.7	75.4	58.5	59.1	75.9	73.4	Mg#	73.5	77.0	73.6	76.0

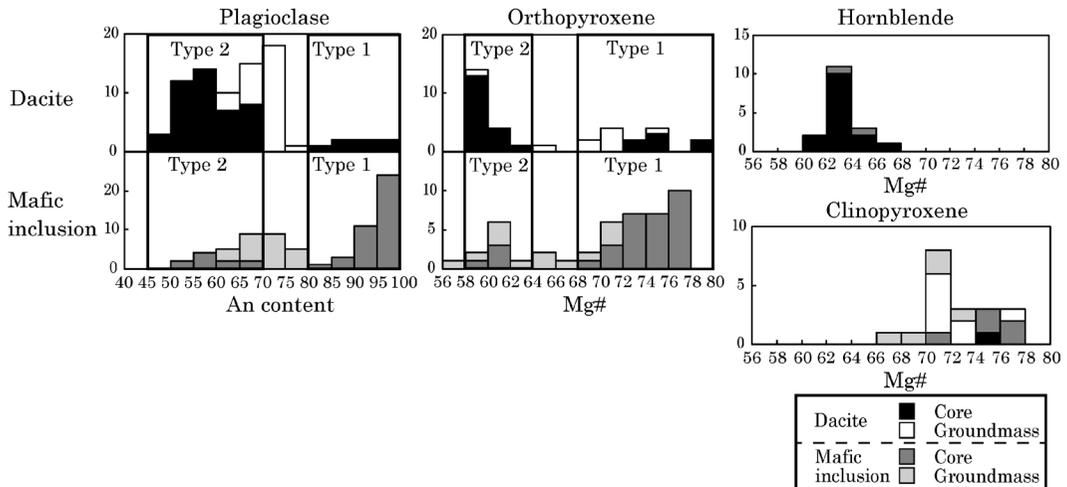


Fig. 3. Histograms of chemical compositions of plagioclase, orthopyroxene, clinopyroxene and hornblende phenocrysts and groundmass in dacites and mafic inclusions from Fujiyama in the Takahara volcano.

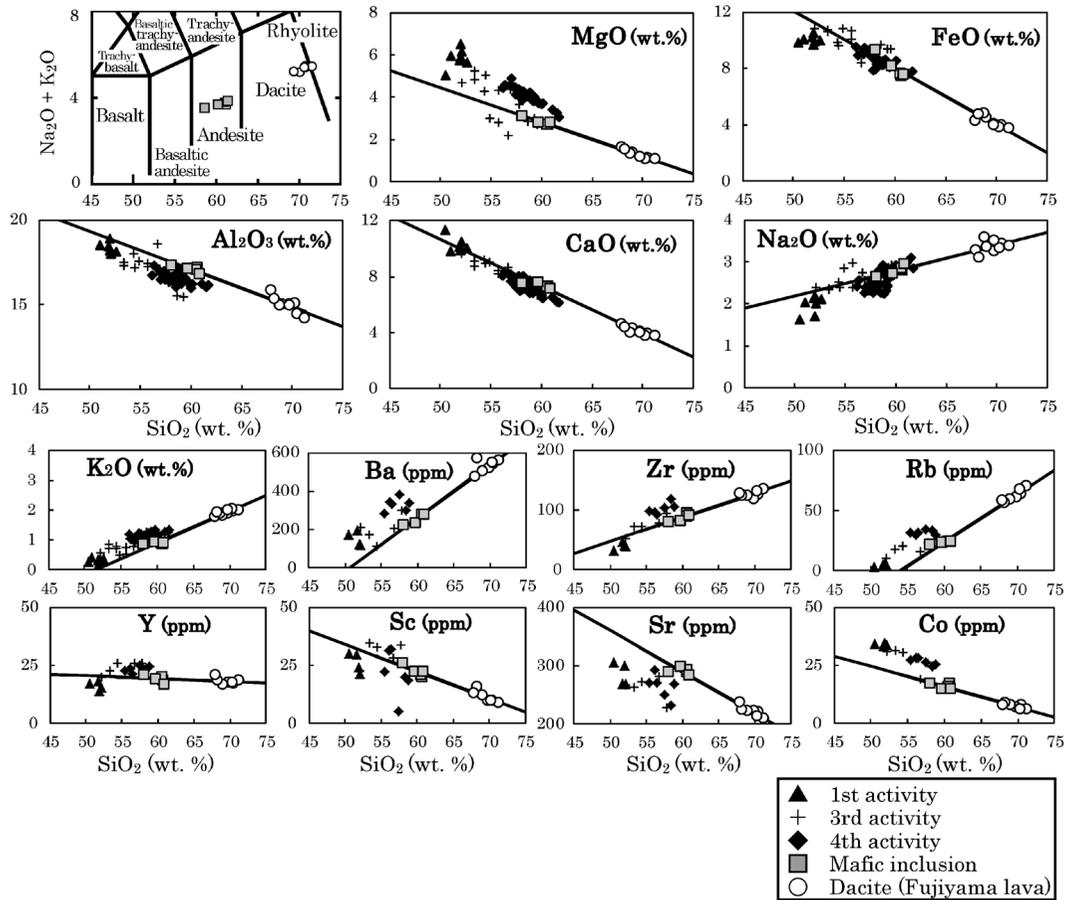


Fig. 4. Major and trace element variation diagrams (demarcation lines are after Le Bas *et al.*, 1986) for whole-rock samples of the Fujiyama dacites and mafic inclusions. The whole-rock chemical compositions of the early stage of the Takahara volcano (1st, 3rd and 4th) and some of dacites from Fujiyama (Ban *et al.*, 1992; Inoue *et al.*, 1994) are also shown for comparison. Major element data are normalized to 100 wt. % on a H₂O-free basis. The lines are obtained by the method of least squares for compositional data of the host rocks and mafic inclusions.

に依頼し、ICP-OES 及び ICP-MS で測定した。今回得られた分析値（デイサイト 5 試料、苦鉄質包有物 5 試料）と伴・他 (1992)、井上・他 (1994) の高原火山噴出物の分析値を合わせて Fig. 4 に示す。

富士山のデイサイトと苦鉄質包有物は、SiO₂量の増加に伴って、Na₂O、K₂O が増加し、MgO、FeO、Al₂O₃、CaO は減少する (Fig. 4)。微量元素では同様に、Ba、Zr、Rb の含有量は増加し、Y、Sc、Sr、Co の含有量は減少する (Fig. 4)。それらはハーカー図において直線的データ配列を示す。しかしながら、富士山形成以前の高原火山本体の活動で形成された火山岩の組成 (伴・他, 1992; 井上・他, 1994) は、元素によってばらつきがあり、異なる組成トレンドを示す。

5. 議 論

高原火山の富士山噴出物には、苦鉄質包有物の存在が確認できた。さらに、汚濁帯をもつ斜長石、逆累帯構造を示す斜長石及び斜方輝石、石英の反応縁、主要・微量元素のハーカー図における直線的データ配列など、マグマ混合を示唆する特徴が認められる。そこで、以下ではより詳細なマグマ混合機構について考察を試みる。

5-1 端成分マグマの晶出鉱物と化学組成の特徴

デイサイト及び苦鉄質包有物はどちらもタイプ 1、タイプ 2 斜長石、斜方輝石を含む (Fig. 3)。これはタイプ 1 斑晶を含む苦鉄質マグマとタイプ 2 斑晶を含む珪長質マグマの混合によると考えられる。苦鉄質包有物に含まれるタイプ 2 斜長石は汚濁帯をもち、逆累帯構造を示す。これはマグマ混合による急激なメルト組成の変化を示唆

する (Tsuchiyama, 1985). また、デイサイト中のタイプ1斜長石は正累帯構造を示すことから、これは苦鉄質マグマに含まれていたタイプ1斜長石が混合の際に珪長質マグマに取り込まれて成長したためと考えられる。タイプ1、タイプ2斜方輝石も同様にそれぞれのマグマからもたらされたと推測される。これら両マグマ間の斑晶の移動は、境界をまたぐ斑晶の存在 (Fig. 2, b) から示唆される。普通輝石は、どちらの斑晶も Mg に富む組成をもつが、デイサイト中での産出が少ないことから、もともと苦鉄質マグマに含まれていたものが、珪長質マグマに混入したと思われる。苦鉄質包有物中の石英は輝石反応縁をもち、これらは珪長質マグマ側から苦鉄質マグマに取り込まれ、形成されたと推定される。普通角閃石については、苦鉄質包有物中での産出がまれであり、ほとんどがタイプ2斜長石を伴っていることから、これらは珪長質マグマから晶出していたと考えられる。苦鉄質包有物中の普通角閃石の斜方輝石からなるリムも石英と同様に苦鉄質マグマに取り込まれ、メルトと反応した結果、形成されたと推定される。以上より、珪長質端成分マグマはタイプ2斜長石、タイプ2斜方輝石、石英、普通角閃石を、苦鉄質端成分マグマはタイプ1斜長石、タイプ1斜方輝石、普通輝石を斑晶に含んでいたと考えられる。

Fig. 4において、デイサイトと苦鉄質包有物の全岩化学組成は直線的なデータ列を形成している。富士山の活動ではこの直線上の端成分マグマが混合に関与したことが予想される。このことから、珪長質端成分は母岩である富士山デイサイト質マグマ、あるいはこれよりも珪長質なデイサイト質～流紋岩質なマグマであったことが考えられる。一方、高原火山で報告されている富士山形成以前の活動で形成された火山岩の組成は同一の組成トレンドを形成しない (Fig. 4)。そのため苦鉄質端成分は、それら高原火山本体を形成したマグマとは異なる組成をもつ玄武岩質～安山岩質マグマであったと考えられる。

5-2 マグマ混合機構及び苦鉄質包有物の形成過程

高原火山の富士山では、噴火前に地殻内に珪長質マグマ溜りが存在し、その基底に深部より苦鉄質マグマが供給されることを想定する。この時、大きな密度差のためこれらのマグマの混合は起こらず、下部の苦鉄質マグマ、上部の珪長質マグマからなる成層マグマ溜りが形成される (Eichelberger, 1980; Huppert *et al.*, 1982)。Kouchi and Sunagawa (1985) は玄武岩質マグマとデイサイト質マグマを混合させる実験を行っている。そこでは、デイサイト質マグマは玄武岩質マグマに取り込まれて、安山岩組成となることが示された。Koyaguchi (1986a) は玄武岩質マグマと流紋岩質マグマの対流速度の違いから、玄武岩質マグマに流紋岩質マグマが取り込まれて混合し、安

山岩質マグマ層が形成されることを指摘している。富士山でも同様に、マグマ溜り内での混合 (mixing) により安山岩組成のマグマが両マグマの境界に形成されたと推定される。また、母岩中にも苦鉄質マグマに含まれていたと考えられる斑晶鉱物 (タイプ1斜長石、タイプ1斜方輝石、普通輝石) が確認でき、石基鉱物の組成からも珪長質マグマが混合により組成を変化させていたことが示唆される。そのため、珪長質マグマの組成は、苦鉄質マグマの一部が珪長質マグマに液滴として取り込まれ、剪断を受けて珪長質マグマに分散されたため変化したと考えられる (Koyaguchi, 1986b)。

また、苦鉄質マグマは珪長質マグマにより冷却されるので、苦鉄質マグマでは結晶化と溶存ガスの離溶が起こる (Eichelberger, 1980; Huppert *et al.*, 1982)。そのため、混合で形成された安山岩質マグマは気泡を多く含んでいたと推定される。これは本研究の包有物が気泡を多く含んでいる特徴と調和的である。また、安山岩質マグマでは、包有物で観察されるような針状で粗粒な石基鉱物が結晶化したと思われる。

珪長質マグマ及び苦鉄質マグマが火道を同時に上昇した場合、苦鉄質マグマが珪長質マグマ中に取り込まれて分散され、それらが固結して包有物が形成される (Koyaguchi, 1986a)。富士山でも、混合により形成された安山岩質マグマがデイサイト質マグマに取り込まれ、Bacon (1986)、Koyaguchi (1986a) のモデルのように mingling した結果、包有物として噴出した可能性が高い。

以上のことから、富士山デイサイト質マグマとその供給系は、北部高原火山の結晶分化作用による安山岩質マグマを主体とする供給系 (井上・他, 1994) に加え、下部からの苦鉄質マグマの供給によるマグマ混合が関与していたことが推測された。

6. ま と め

高原火山の富士山噴出物に苦鉄質包有物の産出が確認され、マグマの混合を示唆する特徴が認められた。高 An 斜長石 (タイプ1)、高 Mg# 斜方輝石 (タイプ1)、普通輝石は苦鉄質マグマで、低 An 斜長石 (タイプ2)、低 Mg# 斜方輝石 (タイプ2)、石英、普通角閃石は珪長質マグマで晶出していたことが推定された。この両端成分は主要・微量元素組成から、珪長質端成分は富士山デイサイト質マグマ、もしくはそれよりも珪長質なデイサイト質～流紋岩質組成をもつマグマ、苦鉄質端成分は富士山形成以前に高原火山で活動していたマグマと異なる組成をもつマグマであり、玄武岩質～安山岩質組成と推測される。これらのマグマはマグマ溜り中で混合し、安山岩質マグマを形成した。この安山岩質マグマが火道上昇中

にデイサイト質マグマに取り込まれて固結し, 苦鉄質包有物が形成されたと考えられる。

謝 辞

研究を進めるにあたり, 筑波大学研究基盤総合センターの西田憲正氏には EPMA 分析の際に, 大変お世話になった。また, 査読者である大場司博士, 佐藤鋭一博士, 編集担当である嶋野岳人博士の的確なご助言により本稿は大きく改善された。これらの方々に深く御礼申し上げます。

引用文献

- Bacon, C. R. (1986) Magmatic inclusions in silicic and intermediate volcanic rocks. *J. Geophys. Res.*, **91**, 6091-6112.
- 伴 雅雄・山中孝之・井上道則・吉田武義・林信太郎・青木謙一郎 (1992) 東北本州弧, 高原火山噴出物の地球化学. 東北大学核理研究報告, **25**, 199-226.
- Eichelberger, J. C. (1980) Vesiculation of mafic magma during replenishment of silicic magma reservoirs. *Nature*, **288**, 446-450.
- Huppert, H. E., Sparks, R. S. J. and Turner, J. S. (1982) Effects of volatiles on mixing in calc-alkaline magma systems. *Nature*, **297**, 554-557.
- 池島柳一・青木謙一郎 (1962) 高原火山の岩石学的研究. 岩鉱, **48**, 97-107.
- 井上道則・吉田武義・藤巻宏和・伴 雅雄 (1994) 東北本州弧, 高原火山群における山体形成史とマグマの成因. 東北大学核理研究報告, **27**, 169-198.
- Itaya, T., Okada, T., Onoe, T. and Isshiki, N. (1989) K-Ar ages of the Middle Pleistocene Takahara volcano, central Japan, and argon release processes in cooling lava. *Mass Spectroscopy*, **37**, 365-374.
- 小池一之・岩崎孝明・檀原 徹・百瀬 貢 (1985) 下野火山灰下部層のフィッシュン・トラック年代とその地史的意義. 駒沢地理, **21**, 39-56.
- Kouchi, A. and Sunagawa, I. (1985) A model for mixing basaltic and dacitic magmas as deduced from experimental data. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **89**, 17-23.
- Koyaguchi, T. (1986a) Evidence for two-stage mixing in magmatic inclusions and rhyolitic lava domes on Niijima Island, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **29**, 71-98.
- Koyaguchi, T. (1986b) Textural and compositional evidence for magma mixing and its mechanism, Abu volcano group, Southwestern Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **93**, 33-45.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.*, **27**, 745-750.
- 奥野 充・守屋以智雄・田中耕平・中村俊夫 (1997) 北関東, 高原火山の約 6500 cal yr BP の噴火. 火山, **42**, 393-402.
- 鈴木毅彦・藤原 治・檀原 徹 (2004) 東北南部, 会津地域周辺における中期更新世テフラの層序と編年. 地学雑, **113**, 38-61.
- 高島 勲 (1999) 北関東高原火山富士山溶岩ドームの熱ルミネッセンス年代. 火山, **44**, 275-277.
- 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.

(編集担当 嶋野岳人)