

岩石学的にみた伊豆大島火山のマグマ供給系

浜田盛久^{1)*}

¹⁾ 海洋研究開発機構

Petrological Constraints on the Magma Plumbing System of Izu-Oshima Volcano

Morihisa Hamada^{1)*}

¹⁾ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Abstract

Izu-Oshima is an active volcano located on the volcanic front of the Izu arc. It erupts island arc low-K tholeiite magma. During the past 150 years it has erupted repeatedly at intervals of 30–40 years. Thirty years have already passed since its last eruption (1986–1987); therefore, the next eruption is expected in the near future. The hypothesis that the next eruption of Izu-Oshima volcano is triggered by an aftereffect of the M9 Tohoku-Oki earthquake, which took place on March 11th, 2011, is considered. In both the 9th century and the period between the 17th century and the 20th century, volcanism of Izu-Oshima volcano seems to have been activated in association with earthquakes occurring near the volcano. While some eruptions occurred after earthquakes, others occurred before earthquakes. It is possible that regional tectonic stress can trigger both major earthquakes and intense volcanic activity, although this hypothesis should be tested at Izu-Oshima volcano and/or elsewhere.

Petrological studies of Izu-Oshima volcano are also reviewed to understand its magma plumbing system, providing useful information to prepare for its next eruption. It is proposed that polybaric crystallization differentiation of H₂O-saturated magmas proceeds in both the magma chamber at 4 km depth (~3 wt.% H₂O in melt) and the magma chamber at 9 km depth (~5 wt.% H₂O in melt). The H₂O-rich nature of the basaltic magmas beneath the volcano suggests that a future eruption of Izu-Oshima volcano could be highly explosive if dissolved volatiles in melt are not sufficiently degassed from magma ascending through the conduit.

Keywords: Izu-Oshima volcano, Magma plumbing system, Island arc low-K tholeiite, Ca-rich plagioclase, Polybaric crystallization differentiation

1. はじめに

火山物理学、岩石学・地球物質科学、火山地質学など、火山に関連する諸科学（火山学）の発展によって、我々は、初生マグマの発生、移動・上昇、分化、噴火といったマグマプロセスをある程度読み解くことができるようになってきた。例えば、桜島火山のように噴火の頻度が高く、観測体制が整備されてデータが蓄積されている活火山においては、火山活動の高まりを異常として捉えて、噴火を直前に予知することが可能となってきた。噴火開始後にその噴火がどのように推移していくかについても、過去の噴火の経験則や噴火履歴に基づいてある程度予測可能な場合がある。とは言え、火山噴火予知研究は

依然として未成熟であり、何が噴火の引き金となるのかを特定したり、数年～数十年後に起こるかもしれない噴火の時期、噴出するマグマ量、噴火様式などを予知することは大変困難である（例えば、藤井、2016）。

そのような火山学の現状の下、数年～数十年後の火山噴火の引き金となるかもしれないと注目されているイベントが、巨大地震の発生である。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震はM9の巨大地震であり、日本列島にかかる応力場を圧縮場から引張場へと一気に変えた。それに伴って、東北地方の地震の発震機構は逆断層型から正断層型へと劇的に変化した（Okada *et al.*, 2011, Kato *et al.*, 2013）。高橋（2016）は、巨大地震の発生

* e-mail: mhamada@jamstec.go.jp (〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2-15)

に伴う応力場の変化の結果として地殻内のマグマの上昇が誘発され、今後、日本列島における火山活動が活性化されるのではないかという仮説を提案した。

伊豆大島火山は、伊豆弧の火山フロント上に位置しており、火山学的に比較的良く研究されている活火山の一つである。特に、山頂にカルデラを形成した約 1500 年前以降現在までの後カルデラ期の噴出物の層序（新期大島層群）に関しては、噴火履歴が火山地質学的に詳細に明らかにされている（例えば、Nakamura, 1964）。さらに、歴史時代においては伊豆大島火山の噴火の前兆現象、噴火の様子、噴火後の事象が古文書に記録されており、地質学的研究を裏付けることができる場合がある（例えば、小山・早川, 1996, 津久井ほか, 2006）。その意味において、伊豆大島火山は、巨大地震と火山噴火との因果関係を明らかにできるかもしれない有数の研究対象である。伊豆大島火山の次の噴火が、2011 年の巨大地震によって誘発されるのかどうかは今のところ不明であるが、直近の 1986-1987 年噴火から既に 30 年が経過しており、近い将来、再び噴火することは必至となっている。

マグマは、上部マントル→地殻内のマグマ溜まり→火口に至るマグマ供給系での噴火準備過程を経て最終的に噴火に至る。もちろん、全てのマグマが噴火するわけではなく、地殻中に貫入して噴火未遂に終わるマグマもある。伊豆大島火山の次の噴火が準備される場であるマグマ供給系において、どのようなマグマプロセスが進行しているのかを理解しておくことは、我々が次の噴火に備えるために重要である。そこで本稿では、伊豆大島火山周辺で発生した巨大地震と伊豆大島火山の噴火との因果関係についてのこれまでの議論を紹介するとともに、岩石学的研究成果を中心として伊豆大島火山のマグマ供給系についてのこれまでの理解をまとめる。

2. 伊豆大島火山の活動史と想定される噴火シナリオ

伊豆大島火山は、40000 年以上の活動史を有している活火山である。伊豆大島火山の基盤をなす 3 つの火山（岡田火山、行者窟火山、筆島火山）の活動も含めると全体として十数万年の活動史を有しているとも言える。伊豆大島火山の噴出物の層序は、伊豆大島火山発達初期（>40000 年）におけるマグマと海水との接触に伴うマグマ水蒸気爆発の堆積物から成る泉津層群、約 40000 年前から約 1500 年前（カルデラ形成時）までの先カルデラ期の噴出物から成る古期大島層群、約 1500 年前から現在までの後カルデラ期の噴出物から成る新期大島層群の 3 層序に大別される（Nakamura, 1964, 一色, 1984, 川辺, 1991, 1998）。後カルデラ期はさらに、約 1500 年前（S2.0）

から 12 世紀頃（N1.0）までの平均噴出率が高い（92 kg/s）時期と、12 世紀頃（N1.0）から現在に至る噴出率の低い（25 kg/s）時期に分けることができ、平均噴出率は N1.0 を境として減少したように見える（小山・早川, 1996）。N1.0 から現在に至る時期においては、平均噴出率は 25 kg/s で一定であるものの、18 世紀末の前後で一度の噴火における噴出量と噴火頻度に系統的な違いがある。18 世紀末までは噴出量が数億トンの大規模噴火がおおよそ 100 年から 150 年に 1 回の割合で 12 回起こっており、例えば安永噴火（1777 年～1792 年）ではプリニー式噴火が起こった（Nakamura, 1964）。これに対して 19 世紀から現在までは、噴火量が数千万トン以下という従来よりも一桁以上小さい中規模噴火が 30 年から 40 年に 1 回の割合で起こるようになった（川辺, 1998）。

伊豆大島火山において、838 年ごろから 886 年ごろに至る 9 世紀の約 50 年間に起こった N3.0（上部）、N2.0、N1.0 の 3 層序に相当する 3 回の大規模噴火は、伊豆大島火山の活動史上、異常に頻度が高い（津久井ほか, 2006, 2008）。9 世紀においては伊豆大島火山ばかりでなく、838 年には神津島火山で、886 年には新島火山で、864 年には富士火山でも噴火が相次いだ（津久井ほか, 2006, 2008）。この時期には 869 年の貞観三陸地震（ $M \geq 8.3$ ）と 887 年の仁和（東南海）地震（ $M 8.0 \sim 8.5$ ）という 2 つの巨大地震も発生している。ただし、必ずしも巨大地震が発生した後に伊豆弧において火山噴火が頻発したわけではなく、両者の関係が相前後したケースもありそうである。

石橋（1988, 1994）や小山・早川（1996）は、江戸時代以降（17 世紀～20 世紀）における伊豆大島火山周辺の $M 7 \sim 8$ クラスの地震と伊豆大島火山の噴火の対応関係について言及している（表 1）。彼らは、江戸時代以降の伊豆大島火山の噴火は、西相模湾断裂を震源断層とする小田原地震（およびそれを内包する地震）の前兆噴火であると主張している。

9 世紀のイベントにおいても、江戸時代以降のイベントにおいても、伊豆大島火山や伊豆弧の火山の噴火と周辺での地震発生との関係は単なる偶然とは考えにくい。ただし、まず地震が発生し、その後に噴火が誘発されたとは限らないようだ。今後さらなる検証が必要であるが、当時の特異な広域テクトニクスが（巨大）地震発生と大規模な火山噴火の両方を同時期に引き起こしたと考ええるべきであろう。

伊豆大島火山の直近の噴火である 1986-1987 年噴火後から現在に至るまでの 30 年間に、山体の膨張や山体からの火山性 CO_2 の放出が観測され続けている（渡辺,

Table 1. Possible correspondence between M7-class earthquakes near Odawara and eruptions of Izu-Oshima volcano (after Ishibashi, 1988, 1994, Koyama and Hayakawa, 1996).

| Earthquakes near Odawara | | Year of eruptions (tephra layers) of Izu-Oshima volcano |
|--------------------------|-----------|---|
| Year | Magnitude | |
| 1633 | 7.0 | 1684～1690 (Y2.0) |
| 1703 | 7.9～8.2 | |
| 1782 | 7.0 | |
| 1853 | 6.7 | The first half of the 19th century (Y0.8) |
| 1923 | 7.9 | |
| | | 1912～1914 |

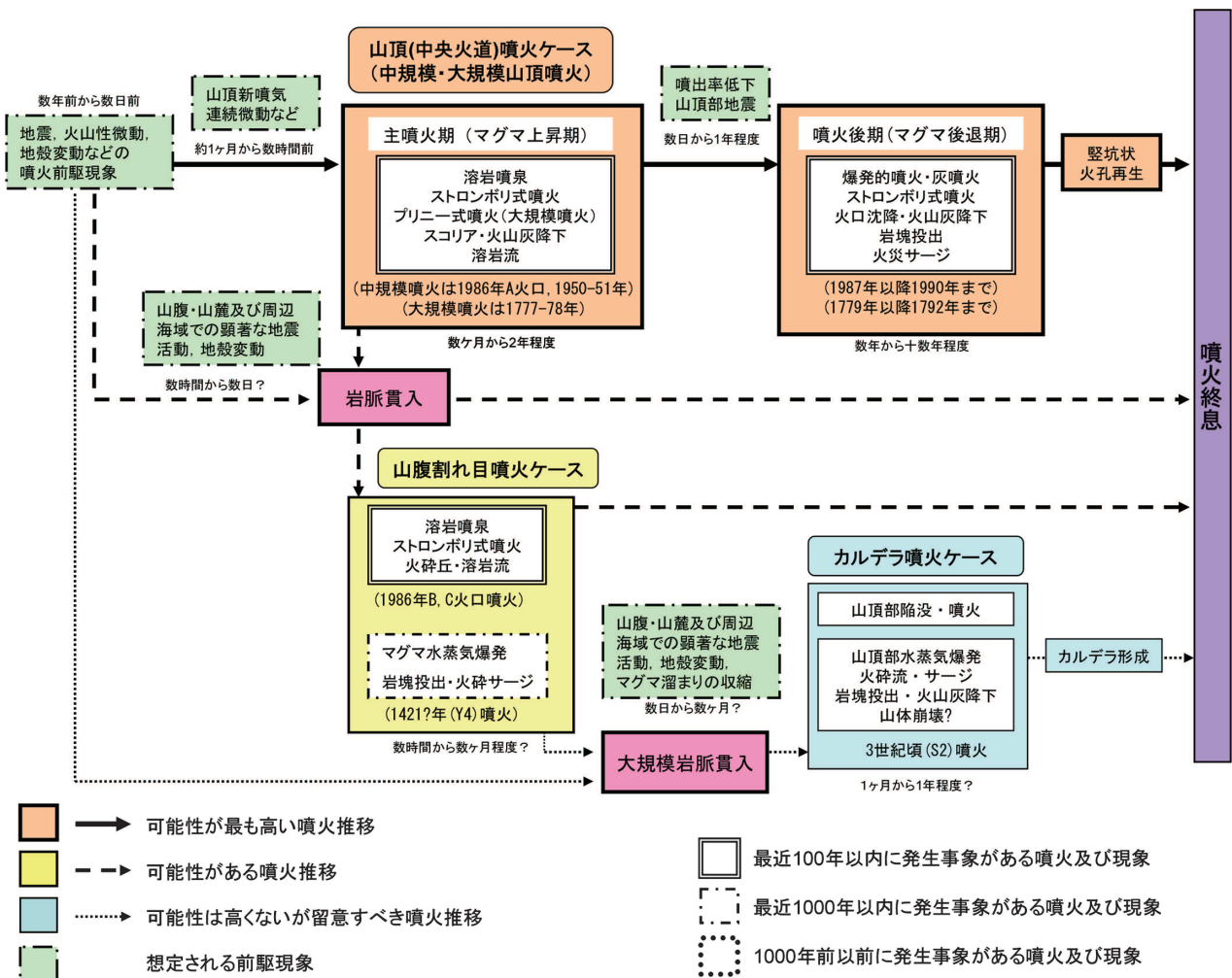


Fig. 1. An event tree of eruptive processes expected at Izu-Oshima volcano (reprinted from Japan Meteorological Agency, 2008)

2012, Onizawa *et al.*, 2013, Watanabe, 2013). これらの観測事実は、マグマが蓄積され、噴火準備が進行中であることを示している。次の噴火がいつ起こるかを予知することが大変困難であるが、火山噴火予知連絡会伊豆部会は、伊豆大島火山における過去の噴火履歴を整理し、他の類似火山の事例も参考にして、噴火の推移予測を行っている(気象庁, 2008)。気象庁(2008)は、伊豆大島火山で今後最も起こりうる噴火を山頂からの大規模噴火(噴出量が数億トン)・中規模噴火(噴出量が数千万トン以下)、山腹からの割れ目噴火、および可能性は低いがカルデラ形成噴火の3シナリオに大別して、想定される噴火推移をイベントツリーを用いて時系列的に整理した(図1)。例えば、起こる可能性が最も高い噴火(推移)は、1986年噴火A火口(山頂火口)からの噴火のようにプリニー式噴火またはストロンボリ式噴火・溶岩流の流出から始まり、次第に爆発的噴火や火砕サージの流出に移行していく噴火様式である。このような噴火の推移予測は、伊豆大島火山以外の主だった活火山においても整備されつつある(中田, 2016)。

気象庁(2008)はまた、伊豆大島火山の噴出物の化学組成と噴出した火口との対応関係についてもまとめた。それによると、伊豆大島火山の噴出物は、無斑晶質で組成が比較的均質なグループ1、分化トレンド上のグループ2、斜長石が集積するトレンド上のグループ3という3つのグループに大別される(図2)。グループ1は主マグマ溜まり(深さ約9km)から山頂火道を使って上昇して山頂から噴出するとともに、一部は山腹からも噴出する。1500年前のカルデラ形成に関与したS2.0噴火に関与したマグマもグループ1である。グループ2はグループ1のマグマからは孤立した浅所に蓄えられたマグマと考えられ、山腹から割れ目噴火する。グループ1とグループ2はともに新期大島層群と古期大島層群の両方に認められる。グループ3は、山頂噴火が起こった時に最初に噴出するマグマであり、新期大島層群と古期大島層群の両方に認められる。グループ3は先カルデラ期(古期大島層群)においては山腹からも割れ目噴出していたが、後カルデラ期(新期大島層群)では噴出が認められない。約1500年前のカルデラ形成によってマグマ供給系が変化し、山腹割れ目からグループ3の噴出が妨げられるようになったと考えられる(気象庁, 2008)。1986–1987年噴火の際には、山頂のA火口からはグループ1が噴出し、山腹のB火口およびC火口からは分化したグループ2のマグマが噴出した。A火口から噴出したマグマから、B火口やC火口から噴出したマグマを結晶分化作用によって導くことはできないため、A火口のマ

グマとB・C火口のマグマは互いに独立したマグマ供給系から供給されたと考えられている(中野・山元, 1987, 藤井ほか, 1988)。

3. 伊豆大島火山の噴出物の岩石学的概略

伊豆大島火山の噴出物は、低カリウム系列の玄武岩(島弧ソレアイト)および玄武岩質安山岩から成り、わずかに安山岩やデイサイトも認められる(図3(a))。噴出物の組成は、 SiO_2 の増加に伴って FeO^*/MgO が増加するソレアイト系列の分化トレンドを描く(図3(b))。伊豆大島火山の噴出物は、低カリウム系列、あるいはソレアイト系列という特徴に加え、 K_2O 以外の液相濃集元素(P_2O_5 , TiO_2 , 希土類元素)にも乏しく、Cs, Ba, U, Pb, Srなどの水溶性の高い元素に富む。これらの地球化学的特徴は、伊豆大島火山を含む伊豆弧の火山フロント上の火山の噴出物に共通している(久野, 1958, Jakeš and White, 1972, 一色, 1984, Ishizuka *et al.*, 2006, Tamura *et al.*, 2007)。Kimura *et al.* (2010)は、伊豆大島の火山岩に対して、かんらん岩–メルト間の微量元素や同位体の分配に関するフォワードモデル解析を行い、伊豆大島火山の初生メルトは、2–4wt.%のスラブ起源流体が付加した枯渇中央海嶺玄武岩マントル(Depleted Mid-ocean ridge basalt Mantle: DMM)が約25%部分融解することによって生成されうること示した。

最近、三宅島火山2000年噴火(Geshi *et al.*, 2002)や八丈島火山(Ishizuka *et al.*, 2008)といった伊豆弧の火山の直下において、マグマが広域応力場や地殻構造を反映して北西–南東方向への地殻内長距離水平移動をすることが明らかになった。伊豆大島火山の直下においては、マグマが地殻内を長距離移動するだけでなく、近隣の伊豆東部海底火山群のマグマと相互作用をしていることも明らかとなってきた(Ishizuka *et al.*, 2014, 2015)。このことは、伊豆大島火山の噴出物(特に山腹噴火の噴出物)の中に伊豆東部海底火山のマグマ、あるいは両火山の混合マグマが含まれる可能性があることを意味する。したがって、噴出物を用いて伊豆大島火山のマグマ供給系について議論するためには、伊豆東部海底火山のマグマの影響を除いたデータセットを準備する必要がある。

Okayama (2005)とHamada *et al.* (2014)は、伊豆大島火山の無斑晶質噴出物はhigher-K subgroupとlower-K subgroupとに分類されることを指摘した。そして、両者は液相濃集元素比(例えばK/Zr比)が異なるため、初生マグマも異なると議論した(図4(a))。このlower-K subgroupは、Ishizuka *et al.* (2015)が報告している伊豆東部海底火山の噴出物の組成と一致している(図4

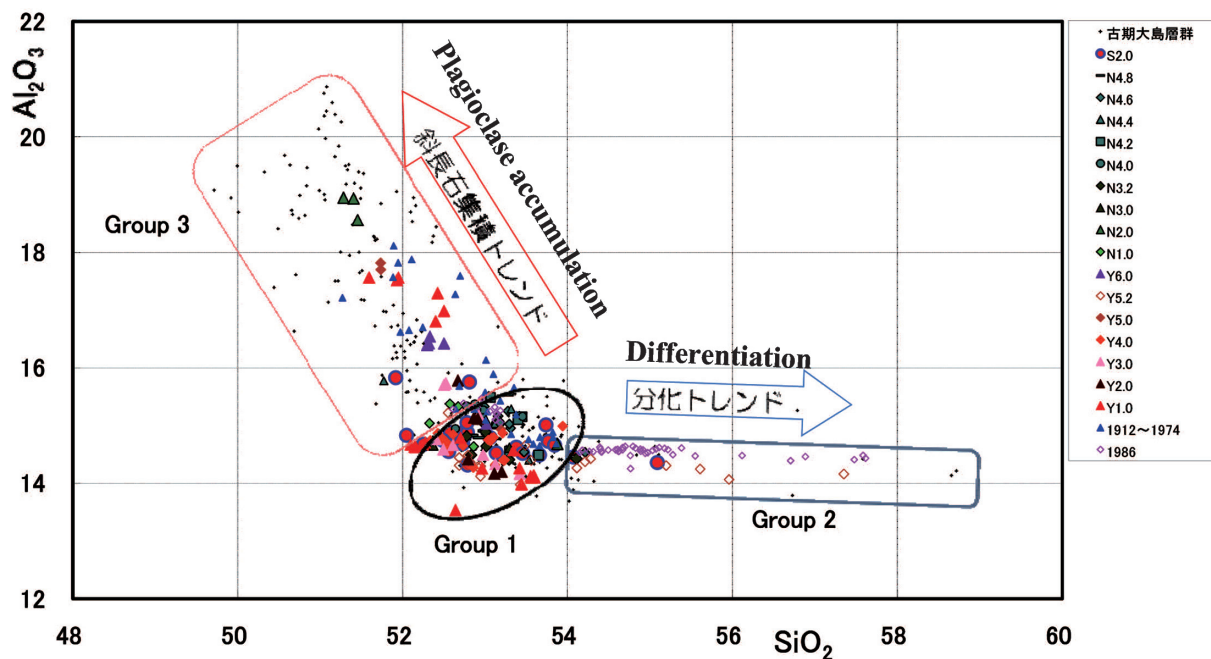


Fig. 2. Geochemical variations of volcanic rocks of Izu-Oshima volcano plotted on a SiO_2 - Al_2O_3 diagram and classified into Groups 1, 2 and 3 (reprinted from Japan Meteorological Agency, 2008)

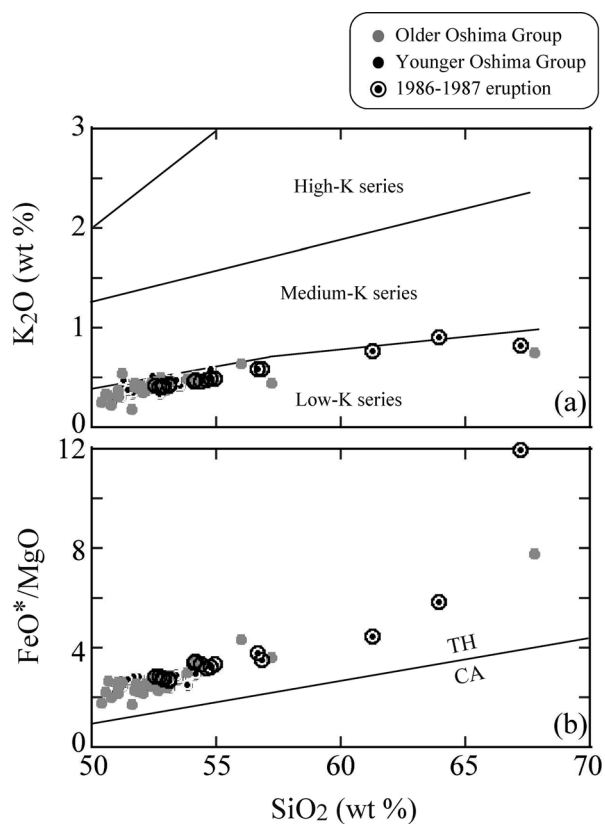


Fig. 3. Classification of volcanic rocks from Izu-Oshima volcano. Data sources for the Older Oshima Group and Younger Oshima Group are from Isshiki (1984) and Kawanabe (1991). Data sources for the 1986-1987 eruption are from Fujii *et al.* (1988) and Kawanabe (1998). (a) K_2O versus SiO_2 (wt%) variation diagram. Boundary lines dividing the high-, medium-, and low-K series are after Middlemost (1975) and Peccerillo and Taylor (1976). (b) FeO^*/MgO versus SiO_2 (wt%) variation diagram distinguishing tholeiite (TH) and calc-alkaline (CA) trends (Miyashiro, 1974). FeO^* is total iron oxide.

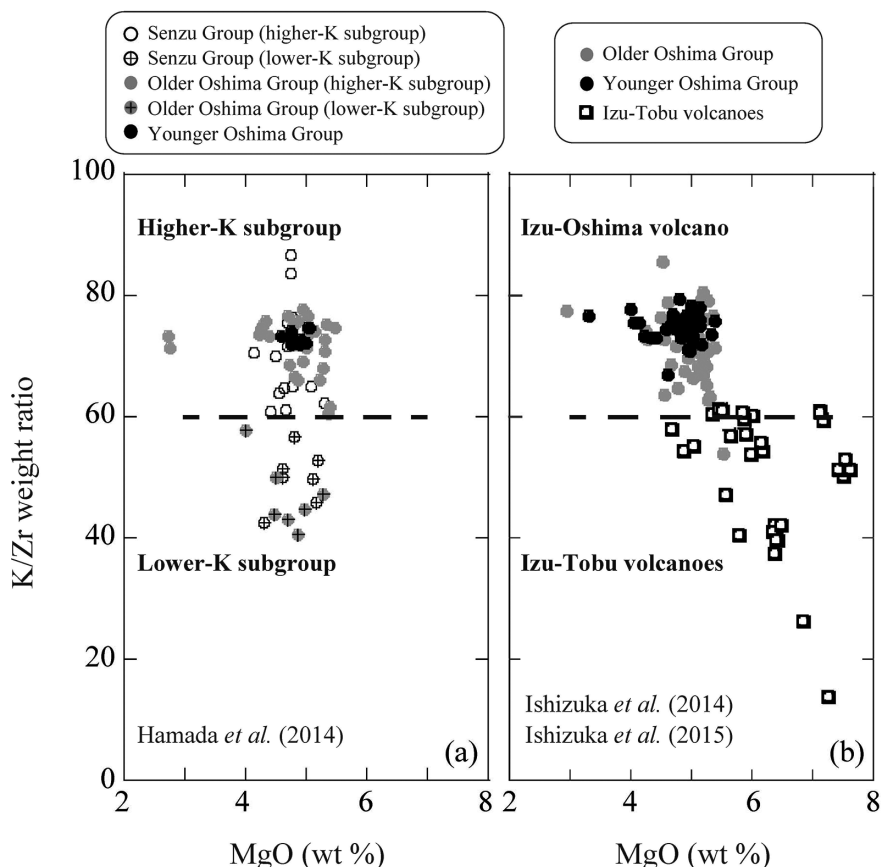


Fig. 4. Comparison of K/Zr values of volcanic rocks reported by (a) Hamada *et al.* (2014) and (b) Ishizuka *et al.* (2014, 2015). The higher-K and lower-K subgroups in (a) coincide with volcanic rocks originating from Izu-Oshima volcano and the Izu-Tobu volcanoes in (b), respectively.

(b)) ことから、伊豆東部海底火山群のマグマ供給系に由来するものと判明した。

本稿では、Okayama (2005) と Hamada *et al.* (2014) で報告している伊豆大島火山の無斑晶質噴出物（伊豆東部海底火山に由来する lower-K subgroup を除く）の全岩化学組成、川辺 (1991) および Ishizuka *et al.* (2015) が報告している伊豆大島火山の無斑晶質の噴出物（斑晶量 ≤ 5 wt.%）の全岩化学組成のデータを統合して、伊豆大島火山のマグマの液組成のデータセットとする。無斑晶質噴出物の全岩化学組成を用いる理由は、それがマグマの液の組成であると見なしていることによる (Kuno, 1960)。本稿では無斑晶質の噴出物を議論に用いるため、斜長石が集積する「グループ 3」の噴出物 (図 2) は今後の議論では除外する。

4. 伊豆大島火山のマグマの液組成バリエーション

伊豆大島火山の無斑晶質噴出物（マグマの液）の主成分組成 (SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, FeO^* , CaO vs. MgO) を図 5 に示す。マグマの液組成は $3 \leq \text{MgO} \leq 6$ wt.% という

バリエーションを示すが、これは結晶分化作用の進行と未分化マグマの注入が繰り返された結果である (藤井ほか, 1996)。伊豆大島火山には Al_2O_3 量の多い液組成のトレンドと Al_2O_3 量の低い液組成のトレンドが共存している (図 5)。本稿では、 Al_2O_3 量が比較的多い液組成のトレンドを高 Al/Si トレンド、 Al_2O_3 量が比較的小さい液組成のトレンドを低 Al/Si トレンドと呼ぶ。火山岩の組成バリエーションはこれら 2 つのトレンド上、および 2 つのトレンドの中間にプロットされる。このことからマグマの液は、高 Al/Si トレンド上の液と、低 Al/Si トレンド上の液と、それらの混合物から成ると考えられる。

結晶分化作用の進行に伴う Al_2O_3 の増大は、含水条件下や無水の高圧条件 (700~800 MPa) 下で斜長石の晶出が苦鉄質鉱物の晶出よりも相対的に遅れることによる (例えば, Yoder and Tilley, 1962, Gust and Perfit, 1987)。含水かつ 700~800 MPa より低圧下では斜長石と苦鉄質鉱物の相関係が逆転して、液組成のトレンドの違いが導かれる。未分化マグマの含水融解実験 (Hamada and

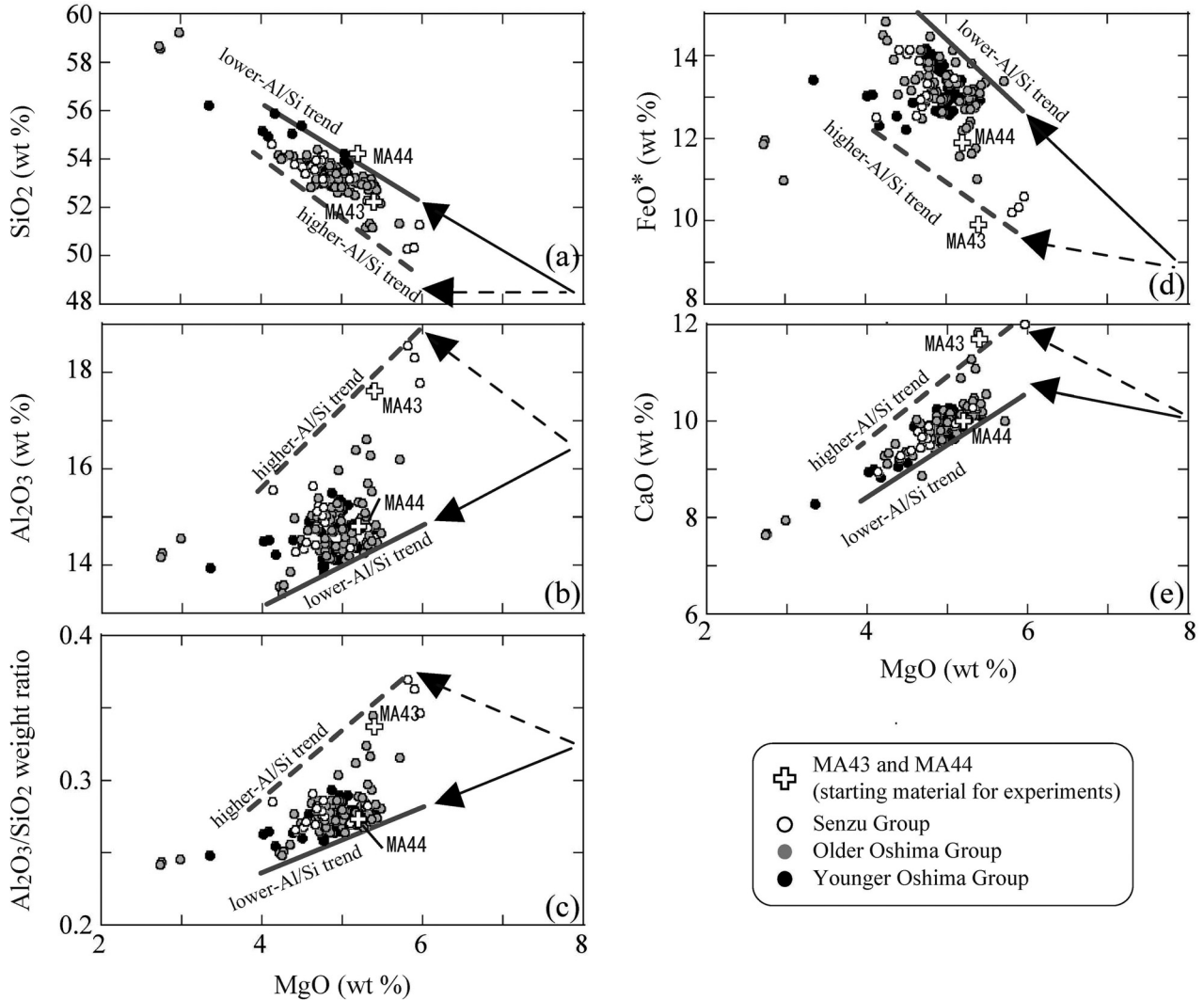


Fig. 5. Major element versus MgO variations in liquids of Izu-Oshima volcano. Data are from Kawanabe (1991), Okayama (2005), Hamada *et al.* (2014), and Ishizuka *et al.* (2015). The dashed arrow corresponds to a liquid path from undifferentiated liquid (MgO~8 wt.%) with about 2 wt.% H₂O at 200 MPa based on Hamada and Fujii (2008). The solid arrow corresponds to an estimated liquid path from undifferentiated liquid (MgO~8 wt.%) with about 2 wt.% H₂O at a pressure lower than 200 MPa.

Fujii, 2008) によれば、高 Al/Si トレンドは MgO~8 wt.% の未分化メルトがバルク含水量 \leq 2 wt.%, 200 MPa 以上の圧力条件下で結晶分化することによって導かれる (図 5)。この条件下では、斜長石よりも斜方輝石や単斜輝石が早期に晶出するため、メルトの SiO₂ 量の増加が抑えられ、Al₂O₃ 量が増加する分化トレンドが得られる。図 5 において、MgO \leq 6 wt.% で Al₂O₃ 量が減少するのは、斜長石が晶出しているためである。一方、低 Al/Si トレンドは、MgO~8 wt.% の未分化メルトがバルク含水量 \leq 2 wt.%, 200 MPa より低い圧力条件下で結晶分化することによって導かれる (図 5)。この条件下では、カンラン石+斜長石の晶出を主体とする結晶分化作用が進行す

る。圧力に関わらず、2 wt.% よりも含水量が多くなると、磁鉄鉱が早期に晶出するため、結晶分化作用の進行に伴ってメルトの FeO* (全鉄) 量が減少するカルクアルカリ系列の分化トレンドが得られる。これは、伊豆大島火山の火山岩の組成がソレライト系列の分化トレンドを描くこととは全く異なる。このことから、伊豆大島火山のマグマの液組成のトレンドを再現するためには、未分化メルト (MgO~8 wt.%) のバルク含水量は 2 wt.% 以下でなければならない。

図 6 は、玄武岩のノルム四面体 (例えば、Yoder and Tilley, 1962) において、斜長石の頂点から伊豆大島火山のマグマの液組成を単斜輝石—カンラン石—石英を頂点

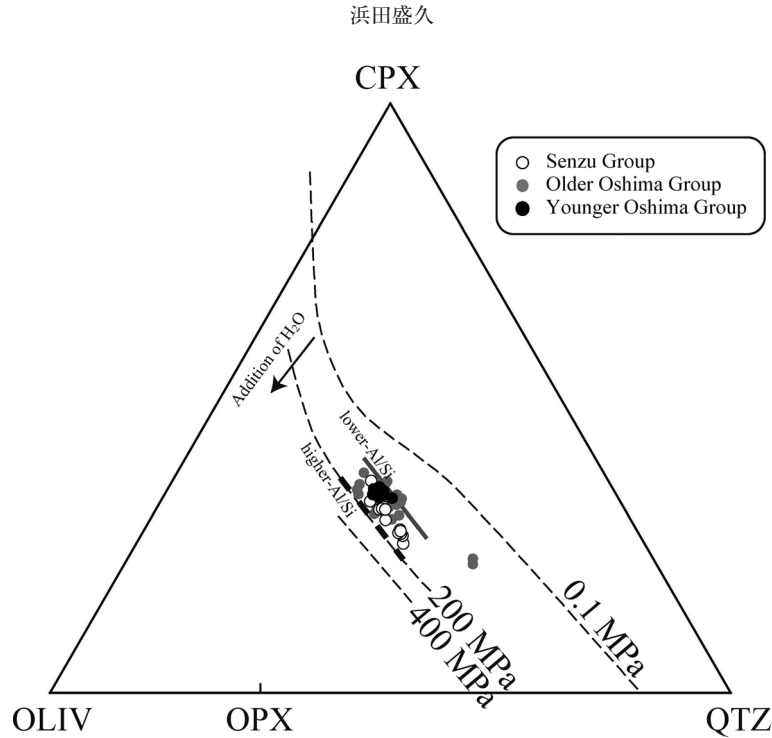


Fig. 6. Projection of normative compositions of liquids of Izu-Oshima volcano. Data are taken from Kawanabe (1991), Okayama (2005), Hamada *et al.* (2014), and Ishizuka *et al.* (2015). Projection of normative compositions of liquids on the pseudo-ternary diagram after the schemes of Tormey *et al.* (1987) and Grove (1993). The olivine-plagioclase-clinopyroxene cotectic at 0.1 MPa is from Walker *et al.* (1979); the olivine-plagioclase-clinopyroxene cotectic at 200 MPa is from Berndt *et al.* (2005); and the orthopyroxene-plagioclase-clinopyroxene cotectic at 400 MPa is from Hamada and Fujii (2008). The addition of H₂O expands the stability field of clinopyroxene at a given pressure, resulting in a shift in the cotectic curve toward the olivine apex.

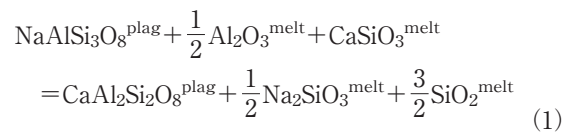
とする三角形のダイアグラム上に投影したものである。ダイアグラム上において、複数相に飽和した伊豆大島火山の液組成の投影される位置は圧力に依存しているため、結晶分化作用が進行した圧力を見積もることができる。高 Al/Si トrendは 200 MPa で行われた実験によって得られた液組成とほぼ一致している。低 Al/Si トrendは 200 MPa よりも低圧での結晶分化作用によって導かれたことが分かる。

5. 伊豆大島火山のマグマの含水融解実験

伊豆大島火山の玄武岩を含めて、島弧ソレイトは Ca に富む斜長石を斑晶にもつという特徴を有する。伊豆大島火山の場合、斜長石斑晶の組成は An₈₀~An₉₅ 程度であり、リムは An₇₀~An₈₀ 程度である (藤井ほか, 1988, Hamada, 2002, Hamada and Fujii, 2007)。このような Ca に富む斜長石斑晶は無水の玄武岩メルトからは晶出しないが、含水玄武岩からは晶出しうることが玄武岩マグマの融解実験によって確かめられている (例えば, Sisson and Grove, 1993, Panjasawatwong *et al.*, 1995, Takagi *et al.*, 2005, Ushioda *et al.*, 2014)。

含水メルトから晶出する斜長石が Ca に富むことは、灰

長石 (CaAl₂Si₂O₈) — 曹長石 (NaAlSi₃O₈) の単純系の含水融解実験 (Johannes, 1978) により良く知られている。これはもちろん天然系においても成立し、熱力学的には、含水メルト中で Na 成分の活動度が大きく下がってしまうためと説明することができる。例えば, Ghiorso and Sack (1995) の正則溶液モデルに基づく、斜長石—含水メルト間の反応式は式 (1) のように記述できる。



式 (1) において、メルトの各成分の活動度 $a_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, a_{CaSiO_3} , $a_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}$, a_{SiO_2} はメルトの含水量の増加に伴って減少するが、 $a_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}$ の減少幅は一桁程度と最も大きい。そのため、含水系においては式 (1) の反応は右側に進み、含水メルトと平衡共存する斜長石の灰長石 (CaAl₂Si₂O₈) 成分が増加する。この反応を利用して逆に、平衡共存する斜長石とメルトの組成から、メルトの含水量を推定するための含水量計も考案されている (Housh and Luhr, 1991; Putirka, 2005; Lange *et al.*, 2009)。

Hamada and Fujii (2007) は、伊豆大島火山の比較的

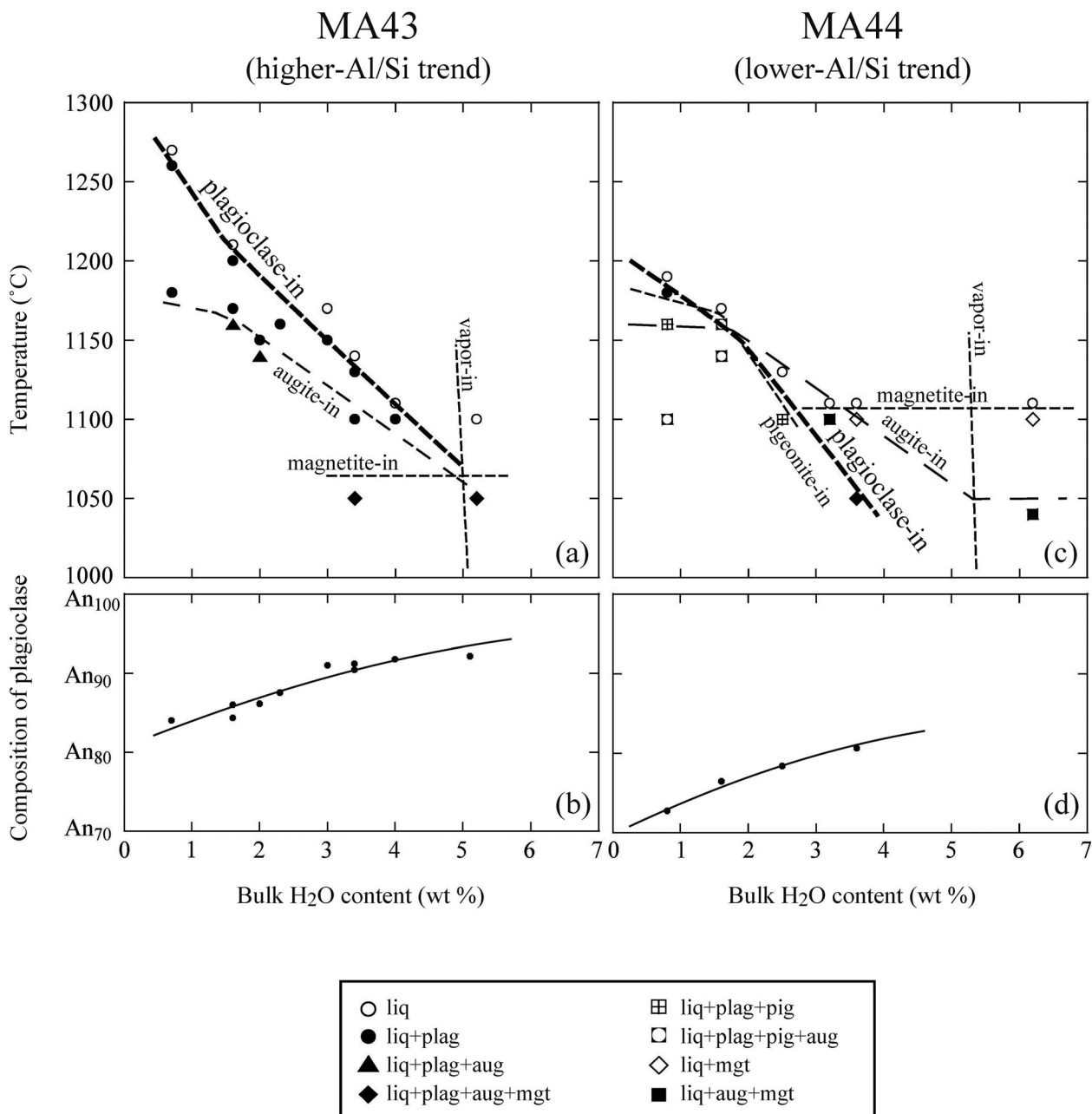


Fig. 7. Phase diagrams for MA43 and MA44 and changes in composition of crystallized plagioclase reprinted from Hamada *et al.* (2014). (a) Phase diagram for MA43 and (b) composition of plagioclase crystallized from MA43 melt at 250 MPa, plotted against bulk H₂O content (wt. %). (c) Phase diagram for MA44 and (d) composition of plagioclase crystallized from MA44 melt at 250 MPa, plotted against bulk H₂O content (wt. %). Abbreviations: liq, liquid; plag, plagioclase; aug, augite; pig, pigeonite; mgt, magnetite.

未分化な2種類のマグマ (MA43 と MA44, MgO 量はいずれも約 5 wt.%) の含水融解実験 (1~6 wt.% H₂O) を行い, 晶出する斜長石の組成に及ぼすメルトの組成と含水量の効果を調べた。MA43 は高 Al/Si トレンド上の比較的未分化なマグマの液組成を代表し, MA44 は低 Al/Si トレンド上の比較的未分化なマグマの液組成を代表する (図 5)。含水融解実験の結果を図 7 にまとめて示

す。MA43 試料を含水融解したところ, 1~6 wt.% の含水量の条件下で斜長石がリキダス相であり, 含水量の増加に伴って斜長石の晶出温度がリニアに低下する結果が得られた (図 7a)。斜長石の組成は, 無水に近い条件下では An₈₀ であったが, 含水量の増加に伴って Ca に富むようになり, メルトの含水量が 3 wt.% 以上の場合, 晶出する斜長石の組成は An_{≥90} であった (図 7b)。MA44

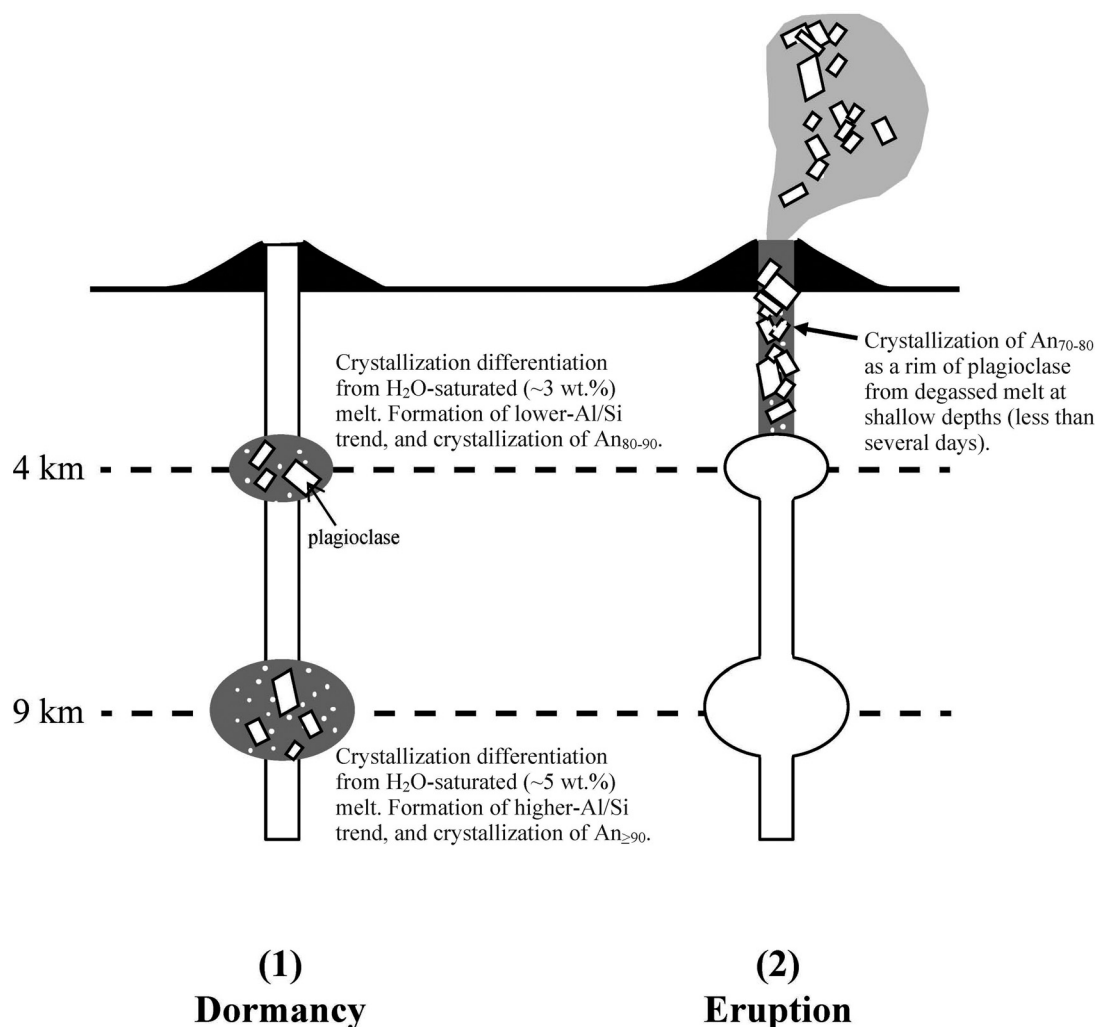


Fig. 8. Schematic illustrations of the magma plumbing system of Izu-Oshima volcano based on previous petrological studies. (1) During the dormant period, polybaric crystallization differentiation proceeds at two depths. (2) During eruption, An₇₀₋₈₀ plagioclase crystallizes as a rim from degassed melt in a conduit at shallow depths.

試料を含水融解したところ、含水量が2wt.%よりも少ない場合、斜長石がリキダス相であったが、さらに含水量が増加すると単斜輝石がリキダス相として晶出した(図7c)。斜長石の組成は、無水に近い条件下ではAn₇₀であり、含水量の増加に伴ってCaに富むものの、メルトの含水量が4wt.%まで増加しても、晶出する斜長石の組成はAn₈₀に留まった(図7d)。例えばコアの組成がAn₉₀の斜長石は、高Al/Siトレンド上の液からは含水量が約3wt.%で晶出することができるが、低Al/Siトレンド上の液からは含水量に関わらず晶出することができない。一方、リムとして最もCaに乏しいAn₇₀の斜長石は、高Al/Siトレンド上のメルトからは含水量に関わらず晶出することができないが、低Al/Siトレンド上の無水メルトから晶出することができる。

図6とHamada and Fujii (2007)の実験結果(図7)より、伊豆大島火山には少なくとも2つのマグマ溜まりがあることが制約される。一つのマグマ溜まりは圧力が約200 MPaのマグマ溜まりであり、苦鉄質鉱物の晶出よりも斜長石の晶出が遅れるためにマグマの液組成がAl₂O₃に富み、高Al/Siトレンドを形成する。そのようなメルトからは、結晶分化作用によって島弧ソレイトに特有のCaに富む斜長石斑晶、とりわけAn_{≥90}を晶出させることができる。もう一つのマグマ溜まりは、0.1 MPaと200 MPaの間の圧力条件のマグマ溜まりであり、低Al/Siトレンドを形成する。このマグマ溜まりのメルトからは、An_{≥90}の斜長石斑晶を晶出させることはできないが、結晶分化作用によって比較的An値の低い斜長石斑晶(An₈₀~An₉₀)を晶出させることができる。1986

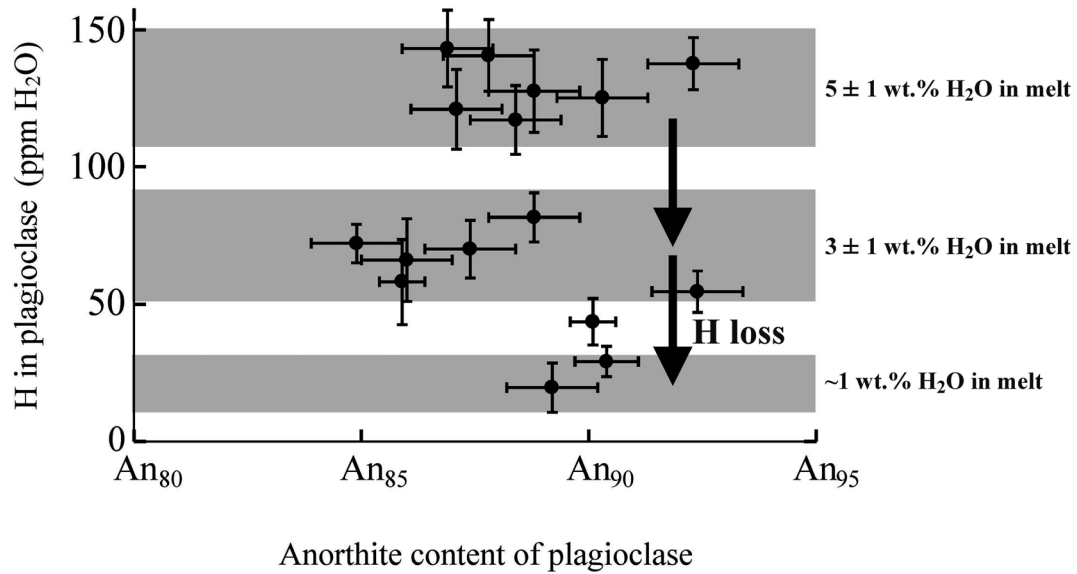


Fig. 9. Hydrogen concentration in plagioclase collected from the summit eruption of Izu-Oshima volcano in 1986 (Hamada *et al.*, 2011). The highest, middle, and the lowest levels of hydrogen concentration correspond to about 5 wt.%, 3 wt.%, and 1 wt.% H_2O in coexisting melt based on experiments by Hamada *et al.* (2013) and the infrared absorption coefficient of hydrogen in plagioclase proposed by Mosenfelder *et al.* (2015).

年噴火の噴出物の岩石学的な検討（例えば、藤井ほか、1988、荒牧・藤井、1988）や、地震学的手法（例えば、Mikada *et al.*, 1997）によって、伊豆大島火山の地下 9 km（圧力約 200~250 MPa）に主マグマ溜まりが、地下 4 km（圧力約 100 MPa）に副マグマ溜まりが存在すると議論されていることを考慮すると、高 Al/Si トレンドを形成するのは深度 9 km のマグマ溜まりであり、低 Al/Si トレンドを形成するのは深度 4 km のマグマ溜まりであるに対応づけられる。さらに噴火直前に、深度 4 km のマグマ溜まりあるいはさらに浅所の火道中の脱ガスしたメルトから Ca に乏しい斜長石（ An_{70-80} ）が晶出して、深部から上昇してきたマグマ中の斜長石斑晶に数十 μm 程度のリムとして付け加わると考えられる。本稿で議論した伊豆大島火山のマグマ供給系についての理解を図 8 に模式的にまとめる。図 8 は、Hamada *et al.* (2014) で議論した伊豆大島火山のマグマ供給系の描像の修正版である。図 8 はまた、結果的に、2 章で紹介した気象庁 (2008) の「グループ 1」に対応するマグマ供給系に関する理解、とりわけ各マグマ溜まりのメルトの含水量や晶出する斜長石の組成についての理解を一步深めた図となっている。結晶分化作用の時間スケールが伊豆大島火山の活動史 (40000 年以上) にほぼ匹敵することと比較して、マグマの上昇とそれに伴う脱ガスによって斑晶にリムが付け加わるプロセスの時間スケールは数日以下と極めて短い (Turner and Costa, 2007)。

6. 斜長石斑晶中の水素含有量から探る伊豆大島火山のメルトの含水量

噴火前のメルトがどの程度の揮発性成分 (H_2O , CO_2 , S など) を含んでいたかを直接調べる物質科学的な研究方法として、メルト包有物の分析が挙げられる。伊豆大島火山においては、古期大島層群最下部 (O95 層) のスコリア (全岩の MgO 量は 4.4 wt.%) 中のカンラン石メルト包有物から 3 wt.% を越える含水量が報告されている (Ikehata *et al.*, 2010)。一方、分化の程度がほぼ同じ 1986 年噴火のスコリア (全岩の MgO 量は 4.7 wt.%) 中の斜長石メルト包有物の含水量は 2 wt.% 未満である (Hamada and Fujii, 2007)。2 wt.% 未満という含水量は、Ca に富む斜長石を晶出させるために必要な含水量よりもはるかに低い (図 7)。このことから Hamada and Fujii (2007) は、斜長石斑晶中のメルト包有物は、メルトが斜長石に包有された後に、メルト包有物から水が斑晶中の劈開を通じてリークしたため低含水量となったと議論した。

メルトの含水量を推定する新しい試みとして、無水鉱物 (Nominally anhydrous minerals) の水素を分析する研究が始まっており、火山学よりも惑星科学の分野で研究が先行している (例えば、Hui *et al.*, 2013)。斜長石も無水鉱物であるが、数十~百数十 ppm 程度の微量の水素を OH 基として含み、その水素含有量が斜長石と共存するメルトの含水量の指標として応用可能である。この

ことに着目して、Hamada *et al.* (2011, 2013) は斜長石中の微量の水素含有量を分析することにより、伊豆大島火山における噴火直前のメルトの含水量の再検討を試みた。図9は分析結果の一例で、伊豆大島火山1986年山頂噴火時に噴出し急冷したスコリア試料中の斜長石斑晶の組成（横軸）と水素含有量（縦軸）との関係を示している。斜長石は25~150 ppm H₂Oの幅広い水素含有量を示すが、それらは3つのグループに分けられ、斜長石が噴火直前にそれぞれ約1 wt.%, 3±1 wt.%, 5±1 wt.%の含水量のメルトと平衡共存していたことが推定された。約1 wt.%, 3±1 wt.%, 5±1 wt.%の含水量は、それぞれ火口付近、深度4 km、深度9 kmにおけるメルトの飽和含水量に相当する。このことから、伊豆大島火山においては、浅部から深部に至るまでマグマは水に飽和しており、斜長石がそれぞれの深度でのメルトの飽和含水量の情報を水素含有量として結晶中に保持して噴出し、急冷したと推定される。斜長石斑晶中のメルト包有物からは揮発性成分の大半が失われている一方で、無水鉱物中の水素の分析に基づいて噴火直前のメルトの含水量を推定することが可能であることが分かった。

伊豆大島火山のマグマが水に飽和しており、深度9 kmのマグマ溜まりでのメルトの含水量が5±1 wt.%に達することは、4章で「伊豆大島火山の液組成のトレンドを再現するためには、未分化メルト（MgO~8 wt.%）のバルク含水量は2 wt.%以下でなければならない」と述べたことと一見矛盾すると思われるかもしれないが、これは分化したメルトにおいて含水量が5±1 wt.%、未分化なメルト（MgO~8 wt.%）の段階では含水量2 wt.%以下という意味であり矛盾しない。火山防災の観点からは、近い将来に予想される次の噴火時に、高含水量マグマが急激に上昇して脱ガスが不十分なまま噴火に至った場合には、安永噴火（1777-1792年）で起こったプリニー式噴火のような爆発的噴火が起こる可能性を警戒する必要がある。

7. ま と め

伊豆大島火山は、巨大地震と火山噴火との因果関係を明らかにできるかもしれない有数の研究対象である。伊豆大島火山を含む伊豆弧の火山は、9世紀に集中的に噴火した。同時期には周辺域で巨大地震も発生しているが、まず地震が発生し、その後に噴火が誘発されたとは限らない。江戸時代以降の、伊豆大島火山周辺のM7~8クラスの地震と伊豆大島火山の噴火の対応関係についても同様である。今後さらなる検証が必要であるが、当時の特異な広域テクトニクスが（巨大）地震発生

と火山噴火の両方を同時期に引き起こしたと考えるべきであろう。

伊豆大島火山の次の噴火が2011年の巨大地震によって誘発されるのかどうかは今のところ不明であるが、近い将来、再び噴火することは必至である。その噴火に備えるため、岩石学的研究成果を中心として伊豆大島火山のマグマ供給系についてのこれまでの理解をまとめた。伊豆大島火山のマグマの液組成には、高Al/Siトレンドと低Al/Siトレンドという2種類の分化トレンドを見出すことができ、伊豆大島火山の噴出物の組成バリエーションはこれら2つのトレンド上とそれらの中間的な領域にプロットされる。高Al/Siトレンドは、9 kmの深度のマグマ溜まりにおいて水に飽和したメルト（~5 wt.% H₂O）からの結晶分化作用によって導かれ、このトレンド上のメルトからはCaに富む斜長石（An_{≥90}）が晶出する。低Al/Siトレンドは4 kmの深度のマグマ溜まりにおいて水に飽和したメルト（~3 wt.% H₂O）からの結晶分化作用によって導かれ、このトレンド上のメルトからはややCaに乏しい（An_{80~90}）の斜長石が晶出する。すなわち、深度（圧力条件）と飽和含水量の異なる2つのマグマ溜まりにおいて、それぞれ結晶分化作用が同時進行していると考えられる。火山防災上は、高含水量マグマが急上昇して脱ガスが不十分なまま爆発的噴火に至る可能性に警戒する必要がある。

謝 辞

東京工業大学・地球惑星科学専攻の高橋栄一教授には本稿の執筆の機会を与えて頂いた。高橋栄一教授と産業技術総合研究所・地質調査総合センターの東宮昭彦博士には、本稿の改善のために有益な助言を多数頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 荒牧重雄・藤井敏嗣, 1988, 伊豆大島火山1986~1987年噴火の岩石学的・地質学的モデル, 火山, **33**, S297-S306.
 Berndt, J., J. Koepke and F. Holtz, 2005, An experimental investigation of the influence of water and oxygen fugacity on differentiation of MORB at 200 MPa, *J. Petrol.*, **46**, 135-167.
 藤井敏嗣, 2016, わが国における火山噴火予知の現状と課題, 火山, **61**, 211-223.
 藤井敏嗣・荒牧重雄・金子隆之・川辺禎久・福岡孝昭, 1988, 1986年噴火噴出物の岩石学的特徴, 火山, **33**, S234-S254.
 藤井敏嗣・金子隆之・安田 敦・Adaniya, E. R.・福岡孝昭, 1996, 伊豆大島火山カルデラ形成以前のマグマ組成（ボーリング試料）, 日本火山学会講演予稿集 1996年度秋季大会, A14.
 Geshi, N., T. Shimano, T. Chiba and S. Nakada, 2002, Caldera collapse during the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan, *Bull. Volcanol.*, **64**, 55-68.

- Ghiorsso, M.S. and R.O. Sack, 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.
- Grove, T.L., 1993, Corrections to expression for calculating mineral compositions in “Origin of calc-alkaline series lavas at Medicine Lake volcano by fractionation, assimilation and mixing” and “Experimental petrology of normal MORB near Kane Fracture Zone : 22°–25° N, mid-Atlantic ridge”, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **114**, 422–424.
- Gust, D.A. and M.R. Perfit, 1987, Phase relations of a high-Mg basalt from the Aleutian Island Arc : Implications for primary island arc basalts and high-Al basalts, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **97**, 7–18.
- Hamada, M., 2002, Melting experiments of hydrous magma — implication for the origin of anorthite phenocryst —, 東京大学修士論文, 106 頁.
- Hamada, M. and T. Fujii, 2007, H₂O-rich island arc low-K tholeiite magma inferred from Ca-rich plagioclase –melt inclusion equilibria, *Geochem. J.*, **41**, 437–461.
- Hamada, M. and T. Fujii, 2008, Experimental constraints on the effects of pressure and H₂O on the fractional crystallization of high-Mg island arc basalt, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **155**, 767–790.
- Hamada, M., T. Kawamaoto, E. Takahashi and T. Fujii, 2011, Polybaric degassing of island arc low-K tholeiite basalt magma recorded by OH concentrations in Ca-rich plagioclase, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **308**, 259–266.
- Hamada, M., M. Ushioda, T. Fujii and E. Takahashi, 2013, Hydrogen concentration in plagioclase as a hygrometer of arc basaltic melts : Approaches from melt inclusion analyses and hydrous melting experiments, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **365**, 253–262.
- Hamada, M., Y. Okayama, T. Kaneko, A. Yasuda and T. Fujii, 2014, Polybaric crystallization differentiation of H₂O-saturated island arc low-K tholeiite magmas : a case study of the Izu-Oshima volcano in the Izu arc, *Earth Planets Space*, **66** : 15.
- Housh, T.B. and J.F. Luhr, 1991, Plagioclase-melt equilibria in hydrous systems, *Amer. Mineral.*, **79**, 477–492.
- Hui, H., A.H. Peslier, Y. Zhang and C.R. Neal, 2013, Water in lunar anorthosites and evidence for a wet early Moon, *Nature Geoscience*, **6**, 177–180.
- Ikehata, K., A. Yasuda and K. Notsu, 2010, The geochemistry of volatile species in melt inclusions and sulfide minerals from Izu-Oshima volcano, Japan, *Mineral. Petrol.*, **99**, 143–152.
- 石橋克彦, 1988, “神奈川県西部地震”と地震予知 I, II. 科学, **58**, 537–547, 771–780.
- 石橋克彦, 1994, 「大地動乱の時代—地震学者は警告する—」, 岩波書店, 234 頁.
- Ishizuka, O., R.N. Taylor, J.A. Milton, R.W. Nesbitt, M. Yuasa and I. Sakamoto, 2006, Variation in the mantle sources of the northern Izu arc with time and space — Constraints from high-precision Pb isotopes, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **156**, 266–290.
- Ishizuka, O., N. Geshi, J. Itoh, Y. Kawanabe and T. Tuzino, 2008, The magmatic plumbing of the submarine Hachijo NW volcanic chain, Hachijojima, Japan : Long distance magma transport? *J. Geophys. Res.*, **113**, B08S08, doi : 10.1029/2007JB005325.
- Ishizuka, O., N. Geshi, Y. Kawanabe, I. Ogitsu, R.N. Taylor, T. Tuzino, I. Sakamoto, K. Arai and S. Nakano, 2014, Long-distance magma transport from arc volcanoes inferred from the submarine eruptive fissures offshore Izu-Oshima volcano, Izu-Bonin arc, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **285**, 1–17.
- Ishizuka, O., R.N. Taylor, N. Geshi, T. Oikawa, Y. Kawanabe and I. Ogitsu, 2015, Progressive mixed-magma recharging of Izu-Oshima volcano, Japan : A guide to magma chamber volume, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **430**, 19–29.
- 一色直記, 1984, 地域地質研究報告 5 万分の 1 図幅 大島地域の地質, 地質調査所, 133 p.
- Jakes, P. and A.J.R. White, 1972, Major and trace element abundances in volcanic rocks of orogenic areas, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **83**, 29–40.
- Johannes, W., 1978, Melting of plagioclase in the system Ab-An-H₂O and Qz-Ab-An-H₂O at P_{H₂O} = 5 kbars, an equilibrium problem, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **66**, 295–303.
- Kato, A., J. Fukuda and K. Obara, 2013, Response of seismicity to static and dynamic stress changes induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 3572–3578, doi : 10.1002/grl.50699.
- 川辺禎久, 1991, 伊豆大島火山の岩石学的発達史, 火山, **36**, 297–310.
- 川辺禎久, 1998, 伊豆大島火山地質図, 火山地質図 10, 地質調査所.
- Kimura, J.-I., A.J.R. Kent, M.C. Rowe, M. Katakuse, F. Nakano, B.R. Hacker, P.E. van Keken, H. Kawabata and R.J. Stern, 2010, Origin of cross-chain geochemical variation in Quaternary lavas from the northern Izu arc : Using a quantitative mass balance approach to identify mantle sources and mantle wedge processes, *Geochem. Geophys. Geosys.*, **11**, Q10011, doi : 10.1029/2010GC003050.
- 気象庁, 2008, 火山噴火予知連絡会伊豆部会 伊豆大島火山の火山活動に関する勉強会報告書—伊豆大島噴火シナリオ—, 41 p. <http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/izu/izu-01.pdf>
- 小山真人・早川由紀夫, 1996, 伊豆大島火山カルデラ形成以降の噴火史, 地学雑誌, **105**, 133–162.
- 久野 久, 1958, 大島火山の地質と岩石, 火山, **3**, 1–16.
- Kuno, H., 1960, High-alumina basalt, *J. Petrol.*, **1**, 121–145.
- Lange, R.A., H.M. Frey and J. Hector, 2009, A thermodynamic model for the plagioclase-liquid hygrometer/thermometer, *Amer. Mineral.*, **94**, 494–506.
- Middlemost, E.A.K., 1975, The basalt clan, *Earth Sci. Rev.*, **11**, 337–364.
- Mikada, H., H. Watanabe and S. Sakashita, 1997, Evidence for subsurface magma bodies beneath Izu-Oshima volcano inferred from a seismic scattering analysis and possible interpretation of the magma plumbing system of the 1986 eruptive activity, *Phys. Earth Planet. Int.*, **104**, 257–269.
- Miyashiro, A., 1974, Volcanic rock series in island arcs and active continental margins, *Amer. J. Sci.*, **274**, 321–355.
- Mosenfelder, J.D., G.R. Rossman and E.A. Johnson, 2015, Hydrous species in feldspars : A reassessment based on FTIR and SIMS, *Amer. Mineral.*, **100**, 1209–1221.
- 中田節也, 2016, 噴火シナリオと確率論的予測, 火山, **61**, 199–209.
- Nakamura, K., 1964, Volcano-stratigraphic study of Oshima volcano, Izu, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **42**, 649–728.

- 中野 俊・山元孝広, 1987, 伊豆大島火山 1986 年噴出物の主成分化学組成, 地質調査所月報, **38**, 631-647.
- Okada, T., K. Yoshida, S. Ueki, J. Nakajima, N. Uchida, T. Matsuzawa, N. Umino, A. Hasegawa and Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, 2011, Shallow inland earthquakes in NE Japan possibly triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63**, 749-754, doi : 10.5047/eps.2011.06.027.
- Okayama, Y., 2005, Magma evolution of Izu-Oshima volcano for the past 40,000 years, 東京大学修士論文, 105 頁.
- Onizawa, S., A. Takagi, K. Kokubo and T. Yamamoto, 2013, Ground deformation of Izu-Oshima volcano in magma accumulation period, IAVCEI 2013 Scientific Assembly, 1 W_2F-P16.
- Panjasawatwong, Y., L. V. Danyushevsky, A. J. Crawford and K. L. Harris, 1995, An experimental study of the effects of melt composition on plagioclase-melt equilibria at 5 and 10 kbar : implications for the origin of magmatic high-An plagioclase, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **118**, 420-432.
- Peccerillo, A. and S. R. Taylor, 1976, Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **58**, 63-68.
- Putirka, K., 2005, Igneous thermometers and barometers based on plagioclase + liquid equilibria : tests of some existing models and new calibrations, *Amer. Mineral.*, **90**, 336-346.
- Sisson, T. W. and T. L. Grove, 1993, Experimental investigations of the role of H₂O in calc-alkaline differentiation and subduction zone magmatism, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **113**, 143-166.
- Takagi, D., H. Sato and M. Nakagawa, 2005, Experimental study of a low-alkali tholeiite at 1-5 kbar : optimal condition for the crystallization of high-An plagioclase in hydrous arc tholeiite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **149**, 527-540.
- 高橋栄一, 2016, 巨大地震により火山活動が長期的に活性化される可能性について, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会予稿, SCG62-01.
- Tamura, Y., K. Tani, Q. Chang, H. Shukuno, H. Kawabata, O. Ishizuka and S. Fiske, 2007, Wet and dry basalt magma evolution at Torishima volcano, Izu-Bonin arc, Japan : The possible role of phengite in the downgoing slab, *J. Petrol.*, **48**, 1999-2031.
- Tormey, D. R., T. L. Grove and W. B. Bryan, 1987, Experimental petrology of normal MORB near Kane Fracture Zone : 22°-25° N, mid-Atlantic ridge, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **96**, 121-139.
- 津久井雅志・齋藤公一・林幸一郎, 2006, 伊豆諸島における 9 世紀の活発な噴火活動について—テフラと歴史史料による層序の改訂—, 火山, **51**, 327-338.
- 津久井雅志・中野 俊・齋藤公一・滝, 2008, 9 世紀のアムールプレート東縁に沿って起きた噴火・地震活動について, 火山, **53**, 79-91.
- Turner, S. and F. Costa, 2007, Measuring timescales of magmatic evolution. *Elements*, **3**, 267-272.
- Ushioda, M., E. Takahashi, M. Hamada and T. Suzuki, 2014, Water content in arc basaltic magma in the Northeast Japan and Izu arcs : an estimate from Ca/Na partitioning between plagioclase and melt, *Earth Planets Space*, **66** : 127.
- Walker D, T. Shibata and S. E. DeLong, 1979, Abyssal tholeiites from the Oceanographer Fracture Zone, II. Phase equilibria and mixing, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **70**, 111-125.
- 渡辺秀文, 2012, 伊豆大島火山のマグマ供給システムと噴火予測, 日本惑星科学会誌, **21**, 198-205.
- Watanabe, H., 2013, Characteristics of magma accumulation process of a basaltic volcano Izu-Oshima, Japan as revealed from integrated monitoring of deep low-frequency earthquakes, volcano-deformation and CO₂ out-gassing, IAVCEI 2013 Scientific Assembly, 4P1_2I-O20.
- Yoder, H. S. Jr. and C. E. Tilley, 1962, Origin of basalt magma : an experimental study of natural and synthetic rock systems, *J. Petrol.*, **3**, 342-532.

(Received March 24, 2016)

(Accepted January 19, 2017)