

富士火山のマグマ学

藤井敏嗣*

Magmatology of Fuji Volcano

Toshitsugu FUJII*

Fuji volcano has issued mostly basaltic magmas these 100,000 years since its beginning. The basalt magmas of Fuji volcano are intensely evolved with FeO^*/MgO ratio larger than 1.6. The basalts show large variation of incompatible elements concentration without changing in silica content. This trend is quite different from the other volcanoes of Izu arc, which show gradual increase of incompatible elements with increasing silica. This contrast in compositional variation could be due to the difference in contribution of pyroxenes during differentiation. With increasing pressure of magmatic differentiation, the role of pyroxenes increases and the silica increase with differentiation is suppressed. This may indicate the magma reservoir beneath Fuji volcano is deeper than those of the other Izu volcanoes. This situation could be due to the subduction of Philippine Sea plate with matured granitic mid-crust beneath the Eurasian plate. Migration of granitic mid-crust to the deeper position through subduction may prevent the ascent of magma and form a magma reservoir at deeper level than that of the other volcanoes of Izu-arc due to its lower density. Because of the hydrous nature of the Fuji magma as an arc magma, extent of crystallization increases water content in the differentiated magma and causes density decrease. The density decrease may yield the differentiated basalt magma to overcome the buoyancy barrier of the granitic mid-crust and to ascend to the shallower position. Some of these magmas may further differentiate to silica-rich composition such as dacite. Mixing of basalt magma with this shallow differentiates may cause further enrichment of incompatible elements in basalt.

This model may explain the wide variation in incompatible elements with little variation in silica within Fuji basalt. This mixing model could be supported by the observation that some basalts contain olivine phenocrysts with melt inclusions of andesitic composition, indicating the mixing of basalt and andesite magmas.

Key words: Fuji volcano, magma reservoir, differentiation, magma mixing, magma density

1. はじめに

富士火山の特徴の一つは十万年間、シリカに乏しい玄武岩マグマを噴出し続けていることにある。しかも、シリカ量の変化は乏しいものの K_2O などの液相濃集元素は大きく変動する。同じように玄武岩マグマを主体とする伊豆大島・三宅島・八丈島などの伊豆弧の他の火山では過去数万年の活動で、富士火山とは異なり安山岩マグマやデイサイトマグマなどをかなりの量噴出している。また富士火山と同程度の液相濃集元素の増加に対してシリカ量も大きく増加する。富士火山のマグマについて議論する際にはこの違いが何によっているかも説明する必要がある。

さらに、富士地域で玄武岩を主体とする活動に変わったのは10万年前で、それ以前には愛鷹火山、小御岳や先小御岳火山(吉本・他,2004;中田・他,2007)のように安山岩、デイサイトマグマの活動も行われていたという事実も説明しなければならない。また、富士火山の玄武岩は島弧玄武岩のうちでも FeO^*/MgO 比の高い、かなり分化したマグマである。八丈島や三宅島の玄武岩類のほうがむしろ

低い FeO^*/MgO 比をもつ、より未分化な玄武岩マグマを含むことも注目すべき点である。このように分化した玄武岩からマンツルの化学組成に関する情報を導くことは容易ではない。

富士火山のもう一つの特徴はその際立ったマグマ噴出率およびマグマ噴出量にある(たとえば, Tsukui *et al.*, 1986)。富士火山の噴出量の推定は、山体の大きさの推定に基づいている。最近の掘削によって、山体中に隠れた先富士火山の山体が以前考えられたよりも大きい可能性がでてきた(吉本・他,2004;中田・他,2007)。しかし、この旧火山体が富士山全体に分布しているとは考えにくいので、日本の活火山の中では最も高い噴出率をもつことには変わりないであろう。

これらの課題はなぜ富士山がそこにあるのかという根本問題とも関わる。本稿ですべての課題に結論を出すことは困難であるが、富士火山のマグマについての最近の研究を概観したい。

2. これまでの研究

富士火山のマグマについての議論はそれほど多くない。その理由として、山体が巨大すぎることもあるが、島弧マグマの中でも分化が進んだ玄武岩が主体で、組成変化に乏しいこともあげられるかもしれない。例外的に議論が多い

*〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

東京大学地震研究所

Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Yayoi,
Tokyo 113-0032, Japan.

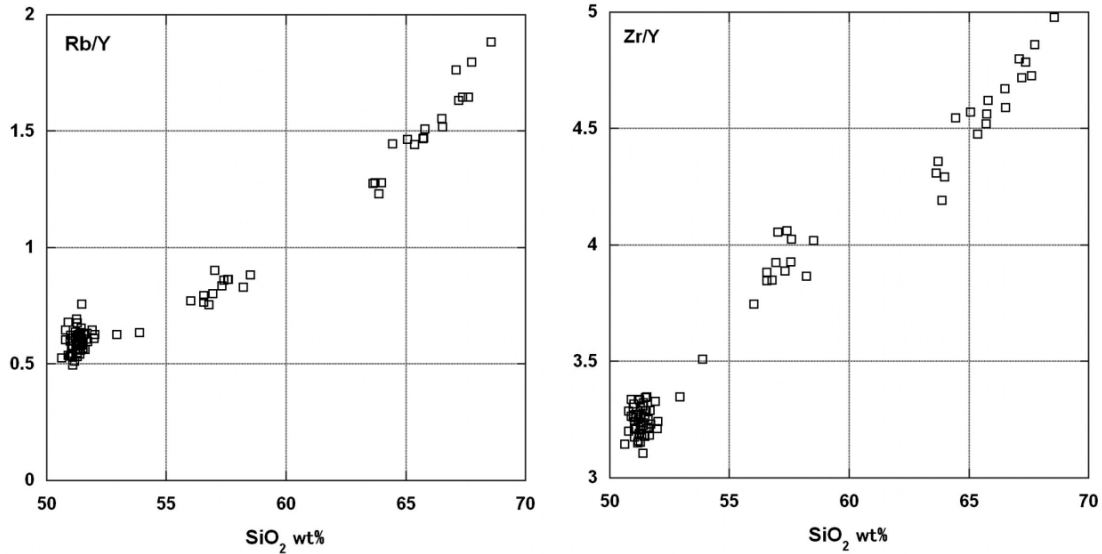


図1 富士火山1707年噴火噴出物の SiO_2 -Rb/Y, Zr/Y比. シリカに富む分化したマグマでは玄武岩マグマに比べRb/Y, Zr/Y比が大きく、かつ変化に富む。データはYoshimoto *et al.* (2004)による。

Fig. 1. Rb/Y and Zr/Y ratios against SiO_2 for the ejecta of 1707 eruption. Note the large variations of the ratios in silicic magmas. Data are from Yoshimoto *et al.* (2004).

のは、1707年の宝永噴火である。この噴火では玄武岩のみでなく、安山岩、デイサイトマグマも噴出した。このため、マグマ組成の変化については多くの記述や議論がある（中村・他, 1986；小屋口, 1986；藤林・他, 1999；Tsukui, 1986；Yoshimoto *et al.*, 2004；Watanabe *et al.*, 2006）。多くは玄武岩マグマからの結晶分化により安山岩マグマ、デイサイトマグマが作られることを述べるが、小屋口（1986）はデイサイトマグマと玄武岩マグマの接触界面に生じる拡散境界で安山岩マグマが生じたと議論した。藤井・他（2002）やYoshimoto *et al.*（2004）は安山岩マグマとデイサイトマグマが混合線上にあること、玄武岩マグマと安山岩マグマの間に組成ギャップがあることなどに着目した。彼らは宝永噴火の前に安山岩マグマとデイサイトマグマの独立なマグマ溜りが存在し、深部から上昇してきた玄武岩マグマがこれらのシリカに富むマグマを刺激して噴火のトリガーとなったと論じた。安山岩マグマやデイサイトマグマはかつて上昇してきた別の玄武岩マグマからの浅所での分化生成物であり、宝永噴火で噴出した玄武岩マグマとは直接の成因関係を持たないとした。

一般に島弧のデイサイトマグマは地殻物質の融解により形成されるという議論があり、藤林・他（1999）も宝永噴火のデイサイトマグマが古小笠原・伊豆弧の地殻物質の融解によってできたという立場をとっているが、宝永噴火のデイサイトマグマに関しては玄武岩質マグマからの結晶分化生成物とする研究者が多い。実際、倉沢（1984）、永井ら（2004）やWatanabe *et al.*（2006）によると玄武岩マグマとデイサイトマグマのストロンチウムやネオジムの同位体比がほぼ一致しており、結晶分化説とは矛盾しない。Os同位体に着目した研究（Watanabe *et al.*, 2006）でも地

殻物質の混入は極わずかに過ぎないことが主張されている。

3. 富士火山におけるマグマ進化

3-1 富士火山のマグマの特徴

富士火山のマグマのほとんどが玄武岩であり、主成分元素の変化に乏しいこともあって、マグマ進化は主に微量元素の変化に着目して議論されてきた（富樫・他, 1991；高橋・他, 1991；富樫・高橋, 2007）。

高橋・他（1991）はZr/YやRb/Y比が何度か変動し、新富士期は高い値を示すことを、富樫・他（1997）はZr/Y比が古富士期から新富士期にかけて増加することを、指摘した。富樫ら（1997）はこの事実をマントル中の微量元素が古富士期には枯渇していたためであると議論した。一方、高橋ら（1991）はマントル中の不均質を反映した変化であるとした。これらの議論は、マントル物質の融解により生成するマグマの微量元素比が地殻内での分化によって変化しないということを前提としている。しかし、富士火山の玄武岩の FeO^*/MgO 比は1.6以上で、マントルで生成される初生マグマに比べてはるかに高い値を示している。富士山で噴出するマグマは最も未分化なものでも、初生マグマからは50%以上の結晶分別を経ているはずである。富士火山の噴出物にみられる微量元素比はこのような結晶分化によって変化するので、初生マグマのレベルでの変化を反映しているとは限らない。

富士火山の玄武岩の大部分はこの分化に際してシリカの増加を伴っていないため、輝石の分別が大きく寄与していると考えられる。輝石中にはZrに比べてYがより多く分配されるために、輝石の晶出は分化生成物のZr/Y比の増

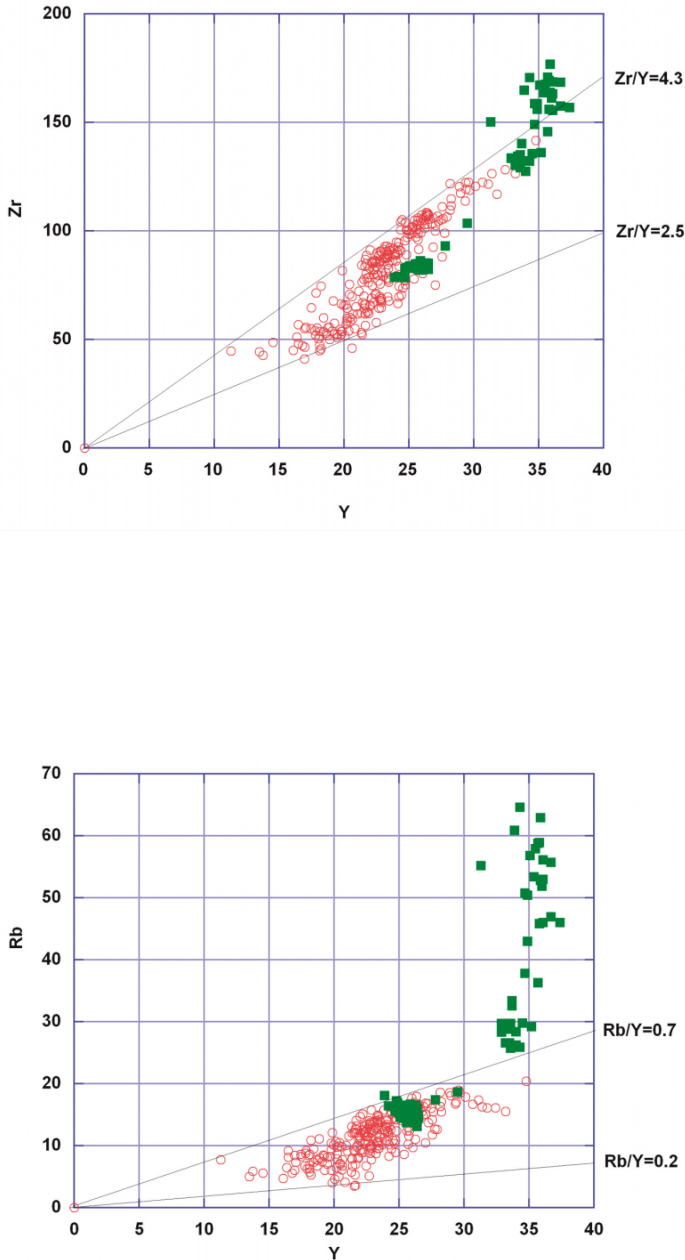


図2 富士火山噴出物の Zr-Y, Rb-Y 図。緑四角は 1707 年噴火噴出物 (Yoshimoto *et al.*, 2004 および未公表データ), 赤丸は 1707 年噴火を除く富士火山噴出物 (高橋・他, 2003)。

Fig. 2. Zr vs Y and Rb vs Y plot of Fuji volcano. Red circles are lavas and ejecta from the older and the younger Fuji volcanoes (Takahashi *et al.*, 2003) except for the ejecta of Fuji 1707 eruption (green square, Yoshimoto *et al.*, 2004, and unpublished data).

大をもたらすことになり、富士火山のマグマの Zr/Y 比の変動の少なくとも一部は結晶分化により形成される (安田・他, 2004)。しかし、これまでに公表されている無水玄武岩マグマと輝石間の Zr や Y の分配係数 (たとえば Green, 1994) では、古富士期から新富士期の玄武岩すべての Zr/Y 比の変化 (2.5–4.3, 図 1) を説明するには 60% 以上の輝石を分別する必要があることになる。島弧マグマのように水を含むマグマについての鉱物・メルト間の元素分配は確立していないため今後の研究が待たれるが、輝石の分別に加え、以下のメカニズムもはたらいて Zr/Y 比等が変化している可能性がある。

3-2 微量元素の変動とマグマ混合

図 1 には宝永噴火噴出物の Rb/Y 比, Zr/Y 比を全岩シリカ組成を軸にプロットしたが、安山岩, デイサイトは玄武岩に比べて両比とも大きい。これらは前にも述べたように玄武岩質マグマからの結晶分化で生成されたものと考えられている (たとえば, Watanabe *et al.*, 2006)。このようなシリカに富むマグマの形成には輝石や Fe-Ti 酸化物が寄与するため, Rb/Y 比や Zr/Y 比に大きな変化が生じる。このような分化が進んだ比較的シリカに富むマグマとより未分化な玄武岩マグマの混合が行われれば, 混合比は小さくても Rb/Y 比や Zr/Y 比を大きく変化させることになる。このように考えると, 富士火山のマグマ進化の本質は次のように考えることができる。

高圧下での結晶分化によって FeO*/MgO 比が増加し, 液相濃集元素に富むようになった玄武岩マグマが, 比較的浅部まで上昇した玄武岩マグマからの更なる結晶分化によってできたシリカに富むマグマと混合し, 富士火山のマグマの化学組成の変化が形成される。分化が進みシリカに富んだマグマは Rb/Y 比や Zr/Y 比が高いので, 少量の分化の進んだマグマが玄武岩マグマと混合すると, 主成分組成は玄武岩マグマのままで, Rb/Y 比や Zr/Y 比は未混合の玄武岩マグマに比べてはるかに高いものになる。図 2 から明らかのように, 少量の宝永噴火のデイサイト組成のマグマが, 比較的未分化な Rb/Y 比や Zr/Y 比の低い玄武岩マグマと混合することにより, 玄武岩にみられるこれらの比の変化を生み出すことができる。後に述べるように, マグマ混合は起こらなかったものの, 玄武岩マグマがこのような極端に分化したマグマと遭遇した例が宝永噴火である。

宝永噴火は火山噴火としては富士火山の数百回の噴火のうちで特異なものである。激しい爆発的噴火であったという意味でも, また最もシリカに富むマグマの活動を伴ったという意味でも特異である。また, シリカに富むマグマがほとんど無斑晶であることも特異といってもよいかもしれない。このように富士火山の噴火としては特異な宝永噴火ではあるが, この噴火に伴って噴出したマグマは富士火山のマグマ分化の本質を象徴的に示しているともいえる。この観点から宝永噴火を検討してみよう。

3-3 宝永噴火の意義

3-3-1 噴出物の特徴

宝永噴火のメカニズムについて議論する前に, 宝永噴火

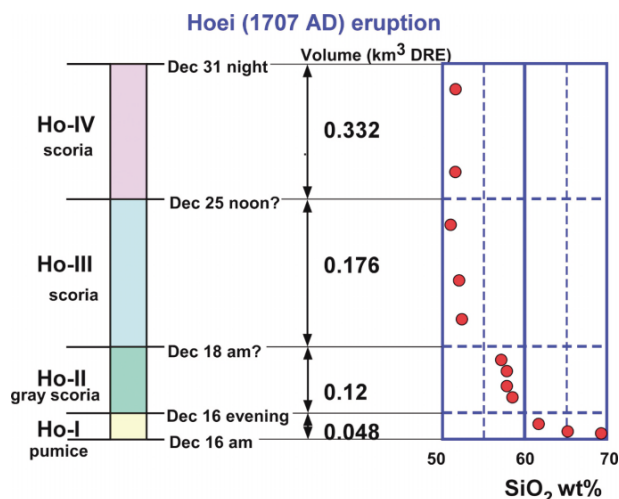


図3 富士火山1707年噴火の推移と噴出物のシリカ量変化。デイサイトと安山岩軽石に続いて玄武岩スコリアが放出され、全噴出物の70%を占める (Yoshimoto *et al.*, 2004 を一部改変)。

Fig. 3. Variation of SiO₂ with stratigraphic succession in the ejecta of Fuji 1707 eruption (modified after Yoshimoto *et al.*, 2004). Dacite and andesite pumice are followed by basalt scoria which occupy more than 70% of the ejecta.

噴出物の特徴を概観する。小屋口 (1986) が指摘したように、少なくとも宝永噴火噴出物においてはデイサイトマグマと安山岩マグマの不完全な混合が縞模様として保存されているので、マグマの分化を議論するためには、少なくとも均質なスコリアの単一岩片を分析する必要がある。複数の岩片を同一試料として分析した結果を使用して議論すると人為的にマグマ混合を生じさせたことになりかねない。先に述べたように、宝永噴火噴出物は多くの研究者によって分析が行われているが、Yoshimoto *et al.* (2004) はこの点に特に注意を払って分析したので、ここでの議論には彼らのデータのみを使用する。

宮地 (1988) や Yoshimoto *et al.* (2004) によれば、図3のように噴火の推移とともにデイサイトから玄武岩まで変化する。最下部の Ho-I はデイサイトであり、Ho-II ではデイサイトから安山岩にまで変化する。Ho-III, Ho-IV は玄武岩であるが、発泡の程度が著しいのは Ho-IV であり、Ho-III は発泡度が低い。Ho-I, Ho-II には幅数ミクロンから数 mm の暗褐色部と白色部分からなる縞状軽石が認められ、暗褐色部は安山岩質、白色部はデイサイト質の化学組成を示している。また、玄武岩マグマは安山岩-デイサイトの混合線の延長上にないことから、宝永噴火の際に放出された安山岩からデイサイトにいたるマグマは同時に噴出した玄武岩マグマとデイサイトの混合によってできたものでない。しかし、このことは安山岩マグマがデイサイトマグマと別の玄武岩マグマとの混合によってできた可能性を否定するものではない。

3-3-2 噴火メカニズムと分化マグマ

宝永噴火では初期に噴出したデイサイトマグマだけでなく、続いて噴出した玄武岩マグマも非常に爆発的であったことが多くの研究者によって指摘されている (例えば、宮地, 1988)。デイサイトや安山岩マグマは粘性が高いため、マグマ中の気泡がマグマから分離できず、気泡中の高圧のガスが爆発的噴火の原因になる。一方、玄武岩マグマは粘性が低いため、気泡が簡単にマグマから抜け出し (脱ガス)、マグマが地表に近付いた時にはもはや爆発の能力を

失っているので、溶岩流として流下するような噴火となると考えられている。富士火山でも青木ヶ原溶岩を流出した貞観の噴火はそのような典型例である。ところが、宝永噴火では玄武岩マグマも異常に爆発的であった。この玄武岩マグマの爆発性は地下で揮発性成分を含んでいたマグマが急速に低圧にもたらされたために、いっせいに発泡が生じたためであると考えられることができる (佐藤・他, 1999; 飯田・他, 2004)。

佐藤・他 (1999) は宝永地震にトリガーされて、マグマの急上昇が生じ、急速な減圧を生じたと考えた。しかし、揮発性成分を含むマグマが急速に減圧するメカニズムはマグマの急速上昇に限らない。佐藤・他 (1999) は貞観噴火と宝永噴火の対照的な爆発性の違いに着目してこのモデルを提出したが、宝永噴火でデイサイトマグマの爆発的噴火が先行したことについては議論していない。

玄武岩からデイサイトに至る組成勾配をもつマグマ溜りがあらかじめ存在していて、地震でトリガーされて同時に上昇を開始すると考えることも困難である。Koyaguchi (1985) が議論したように、粘性が高く密度の低いマグマと粘性が低く密度の高いマグマが上昇を行う際には粘性の低いマグマが追い越すことが考えられるので、玄武岩マグマとシリカに富むマグマの火道内での混合が必然的に起こると予想される。宝永噴火のように、シリカに富むマグマが伴って噴出した玄武岩マグマと混合することなく先行することは考え難い。

藤井・他 (2002) は、玄武岩マグマがごく浅所にまで移動することなく、急激な減圧を引き起こす新たなメカニズムを提唱した。このメカニズムで大きな役割を果たすのはシリカに富む分化マグマの存在である。

比較的低圧下 (500 MPa 以下) ではマグマの水の溶解度曲線は負の傾きをもち、温度が高くなるほど水の溶解度が下がる (たとえば Yamashita, 2000)。藤井・他 (2002) のモデルはシリカに富むマグマ中の水の溶解度が負の温度依存性をもつという、この性質に着目している。また、シリカに富むマグマは玄武岩マグマに比べ密度が小さいこと、

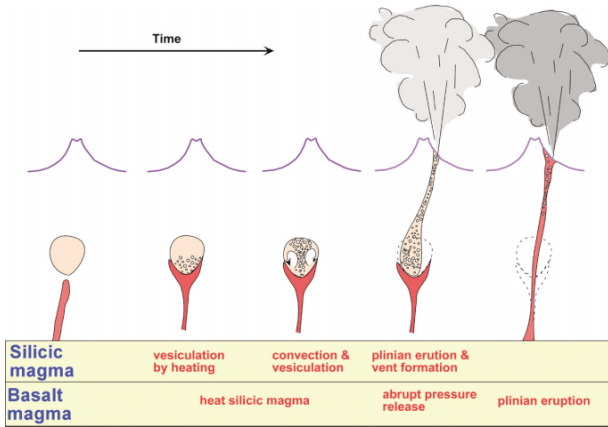


図4 1707年噴火の推移と地下のマグマ溜りの変化。

Fig.4. Cartoons showing the successive development of magma reservoir and the eruption sequence of 1707 eruption.

すなわち軽いことがもう一つの本質である。

一定程度の容積をもつ、水を含んだシリカに富むマグマが存在する場所に玄武岩マグマが上昇してくると、玄武岩マグマは密度の小さなマグマを押し上げて上昇することはできない。必然的に玄武岩マグマはシリカに富むマグマの下盤に張り付くことになる。すなわち、シリカに富むマグマが玄武岩マグマに蓋をして、その上昇を妨げるのである。しかし、この状況がいつまでも続くわけではない。

高温の玄武岩マグマによって底部から加熱されたシリカに富むマグマの底部では、温度上昇により水の溶解度が下がり、発泡が生じる。この底部の発泡したシリカに富む高温のマグマは低密度となるため、マグマ溜り内で浮上を開始し、対流を引き起こす。この対流により、上部にあった低温部は底部に運ばれて玄武岩マグマにより加熱され、発泡する。こうして、このシリカに富むマグマ溜り内では発泡が加速度的に生じて、爆発的噴火に至る。

このようなメカニズムが、玄武岩マグマとシリカに富むマグマとが遭遇したときに必ず生じるわけではないであろう。シリカに富むマグマの容積比が重要な意味を持つに違いない。シリカに富むマグマが玄武岩マグマに比べて遙かに大きいときには、シリカに富むマグマが若干の乱れを受けるだけであるし、シリカに富むマグマが小さすぎる場合には、玄武岩マグマに取り込まれ、混合してしまい、玄武岩マグマの上昇を抑止する蓋の役割を果たさない。宝永噴火でのデイサイト噴出物の総量から考えるとデイサイトのマグマ溜りの大きさは、球状を仮定すると、直径数百m程度であったと考えられるが、これが適当なサイズであったのであろう。

宝永噴火の場合、シリカに富むマグマ溜りは不均質で、安山岩からデイサイトまで成層していた可能性があるが、近接して存在する安山岩とデイサイトの独立なマグマ溜りであったかも知れない(藤井・他,2002; Yoshimoto *et al.*, 2004)。宝永噴出物の下位2層, Ho-I, Ho-IIはデイサイトから安山岩までの組成変化があるからである。前にも述べたように、Ho-I, Ho-IIはこの2種類のマグマが噴火時に混合したものである(Yoshimoto *et al.*, 2004)が、詳細は本論では議論しない。安山岩マグマであれ、デイサイトマ

グマであれ低圧下ではマグマ中の水の溶解度が負の温度依存性をもつので、上記のシリカに富むマグマ溜りでの破局的な発泡のシナリオは適用できる。

安山岩マグマやデイサイトマグマは玄武岩マグマからの結晶分化により形成されるので、当然マグマ溜りには斑晶鉱物が存在していたと考えるべきである。しかし、実際に噴出した安山岩、デイサイトともにほとんど無斑晶である。このことは下盤に貼り付いた玄武岩マグマによってシリカに富むマグマが加熱され、スーパーヒーティングに近い状態になったためと考えることもできる。

さて、シリカに富むマグマの破局的発泡による爆発的噴火は玄武岩マグマの上昇を阻止していた障害が短時間に消滅することを意味する。火山体内部における深さは変わらないものの、瞬間的に地表に達する通路が生じたのであるから、玄武岩マグマには急激な減圧状態をもたらされる。これによって水を含む玄武岩マグマ内部では一斉に発泡が生じるはずである。この瞬時の減圧のために、玄武岩マグマが破碎され、爆発的噴火に至ったと考えられる。発泡度の低いHo-IIIの玄武岩スコリアは、低温のシリカに富むマグマとの接触部において冷却されていた玄武岩マグマの周縁部分を代表する可能性がある。

ここに述べた宝永噴火のモデルを概念化して図4(藤井・他,2002)に示した。火山体地下に存在したシリカに富むマグマがその低密度の故に、上昇する玄武岩を地下にとどめ、玄武岩マグマからの脱ガスを妨げる。逆に玄武岩マグマにより加熱されて、シリカに富むマグマが最終的には自らが爆発することにより、玄武岩マグマの急激な脱ガスと、爆発的噴火をもたらすことになるというシナリオである。すなわち、玄武岩マグマの爆発的噴火はシリカに富むマグマが存在したことにより、引き起こされるのであり、シリカに富むマグマが存在しなければ、玄武岩マグマは順調に上昇しつつ、脱ガスして浅部にまで達し得る。浅部のマグマ溜りで結晶化が進んで、脱ガスも進行した玄武岩マグマは、貞観噴火のように爆発的でない噴火にいたる(佐藤・他,1999; 飯田・他,2004)と考えられる。

3-4 富士火山におけるシリカに富むマグマの役割

宝永噴火は、地下浅所での玄武岩マグマからの更なる結

晶分化によって生じた安山岩マグマ、デイサイトマグマなどのシリカに富むマグマに、地下深部での結晶分化によって生じた鉄に富む玄武岩マグマが遭遇したという点で富士火山のマグマシステムを象徴している。宝永噴火では適当なサイズのシリカに富む分化したマグマ溜りが形成されていたために爆発的噴火をもたらしたのであるが、通常はこのような爆発的噴火を伴うことなく、地下深部から上昇する玄武岩マグマと浅所で分化しシリカに富むマグマとは混合を起こすのであろう。

このことを示す証拠のひとつがかんらん石斑晶中のガラス包有物である。金子・他(2004)によると、富士火山噴出物のかんらん石斑晶鉍物中のガラス包有物は玄武岩組成のものばかりではなく、シリカに富む安山岩質のものがかなり含まれる。全岩組成は玄武岩であるが、ガラス包有物は包有後の結晶化の影響を補正しても石基の組成よりも分化しており、シリカに富む分化したマグマとの混合が行われたことを示している。実際、このようなかんらん石斑晶は逆累帯構造を示す。もちろん、ガラス包有物としてかんらん石斑晶に証拠が残るのは混合するマグマの組成が安山岩質組成の場合であり、より分化したデイサイトマグマではかんらん石の晶出は期待できないので、ガラス包有物から混合の証拠を求めるのは容易ではない。

先に述べたように、Zr/Y比やRb/Y比の変化も、深部の玄武岩組成のマグマ溜り内での結晶分化だけでなく、浅所での結晶分化によってRb, Zr, Yに富み、かつZr/Y比やRb/Y比が高くなった安山岩、デイサイト質マグマとの混合によって形成され得る。したがって、古富士期から新富士期への移行に伴ってみられる、低Zr/Y比、低Rb/Y比のマグマから高Zr/Y比、高Rb/Y比のマグマへの変化(高橋・他, 1991; 富樫・他, 1991; 富樫・高橋, 2006)は、必ずしもマンツルの組成変動を反映していると考えする必要はない。深部マグマ溜りからの玄武岩マグマの供給が新富士期になると低下し、結果として分化マグマのZr/Y比やRb/Y比を薄める度合いが下がったと理解することもできる。

4. 富士山のマグマはなぜ玄武岩主体なのか？

富士山のマグマ進化の主要な要素は深部から上昇する玄武岩マグマであるので、深部で分化しても玄武岩のままであること、すなわちシリカが増加しないメカニズムが必要である。富士火山のマグマが、少数の例外を除けば玄武岩マグマであることは、よく知られた特徴であるが、この理由について明確に議論した例は少ない。ここでは、藤井(2004)の議論を概説する。

4-1 分化トレンドの特徴

富士火山のマグマの殆どはFeO*/MgO比が1.6以上で、わが国の島弧玄武岩マグマのうちでも分化の進んだマグマで、マンツルペリドタイトが融解してできる初生マグマの組成とは全く異なる組成である。シリカの量という点では玄武岩であっても、FeO*/MgO比の点では分化が進んだ玄武岩である。

図5に富士火山のほか伊豆大島、東伊豆単成火山群、三

宅島、八丈西山、八丈東山各火山の分析値のうちシリカ60%以下のものを示した。富士火山については、10万年の噴火史のうちで例外的にシリカに富むマグマを噴出した2回の噴火の噴出物、宝永スコリアと砂沢スコリアを除いてある。

この図から明らかなように、富士火山の岩石はシリカの範囲が極端に狭く、アルカリ元素をはじめとする液相濃集元素は大きく変化するのに対し、他の火山ではシリカの変化幅も大きく、またシリカの増加につれてアルカリや液相濃集元素が緩やかに増加するトレンドを示す。若干のばらつきは認められるものの、それぞれの火山に特有のトレンドを形成している。富士火山では玄武岩が殆どであるのに対し、他の火山では玄武岩質安山岩および安山岩もかなりの量を占める。しかし、富士火山の岩石が他の火山に比べて、分化の程度が低いわけではなく、玄武岩のFeO*/MgO比で見ると、むしろより分化が進んでいる(図6)。富士火山のようにシリカの増加をおさえた分化トレンドを形成するためには、シリカに乏しいかんらん石、斜長石のほかにマグマよりもシリカに富む輝石の結晶分化が必要である。

もちろん、シリカに乏しくK₂Oなどの液相濃集元素の変化に富む多様な初生マグマ群が存在するならば、それからのかんらん石、斜長石の分化によって、このようなトレンドを作ることは不可能ではない。しかし、その場合には、液相濃集元素の変化に富む多様な初生マグマをいかにして作るかという深刻な問題が残る。一方、他の伊豆弧の火山岩のトレンドはむしろかんらん石、斜長石の結晶分化によって形成されたと考えれば調和的である。それぞれのトレンドの出発点の組成にはそれほど違いがないので、初生マグマの化学組成が大きく異なるために分化トレンドが異なるわけではないらしい。とすると、富士火山の分化トレンドが他の火山と大きく異なるのはなぜであろうか。この鍵がマグマ溜りの深さである。

4-2 マグマ溜りの深さと分化トレンド

通常、マグマから晶出する鉍物の液相温度は圧力とともに増大するが、マグマ中に水が含まれると、特定の鉍物の晶出温度は圧力とともに減少する場合も生じる。このため、温度・圧力空間において各鉍物の晶出温度が交差することが生じ、含水玄武岩マグマにおいては冷却に伴う鉍物の晶出順序が圧力のわずかな変化によって変化する場合もあり得る。

島弧マグマは、多少なりとも初生玄武岩マグマが水を含んでいると考えられている。初生マグマではないが、富士火山で測定された例では、通常の玄武岩で2%程度の水を含んでいたと推定されており(飯田・他, 2004)、初生マグマもある程度(少なくとも1%程度)の水を含んでいたはずである。水を含むマグマでは斜長石の安定領域が縮退するため、低圧ではかんらん石、斜長石の順に晶出するのに対し、やや圧力が増加しただけで、かんらん石、輝石、斜長石、あるいは輝石、かんらん石、斜長石の順に晶出するようなことが起る。晶出順序が入れ替わる圧力は無水の場合に比べて、はるかに低圧なので、地殻内の圧力範囲で晶

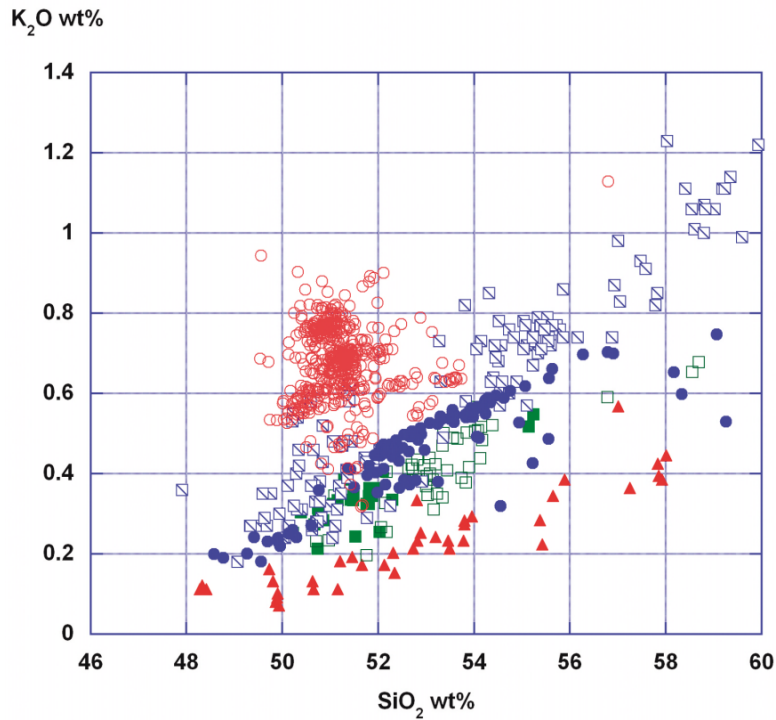


図5 伊豆弧の火山岩の SiO₂-K₂O 図. 赤丸：富士火山（1707年噴火を除く，安田・他,2004；金子・他,2004 および未公表データ），赤三角：八丈島東山（中野・他,1985），緑四角：八丈島西山（中野・他,1985），白抜き四角：三宅島（藤井・他,1985；津久井・他,2002），斜線入り四角：伊豆大島（藤井・他,1987；藤井・他,1996），青丸：東伊豆単成火山群（宮島・他,1985）。

Fig. 5. SiO₂ vs K₂O variation diagram of Fuji and the other Izu volcanoes. Red circle, Fuji volcano (Yasuda *et al.*, 2004, Kaneko *et al.*, 2004, and unpublished data) ; Red triangle, Hachijo-Higashiyama (Nakano *et al.*, 1985) ; solid green square, Hachijo-Nishiyama (Nakano *et al.*, 1985) ; open square, Miyakejima (Fujii *et al.*, 1985, Tsukui *et al.*, 2002) ; blue square with hatch, Izu-Oshima (Fujii *et al.*, 1987, Fujii *et al.*, 1996) ; blue solid circle, Higashi-Izu monogenic volcanoes (Miyajima *et al.*, 1985).

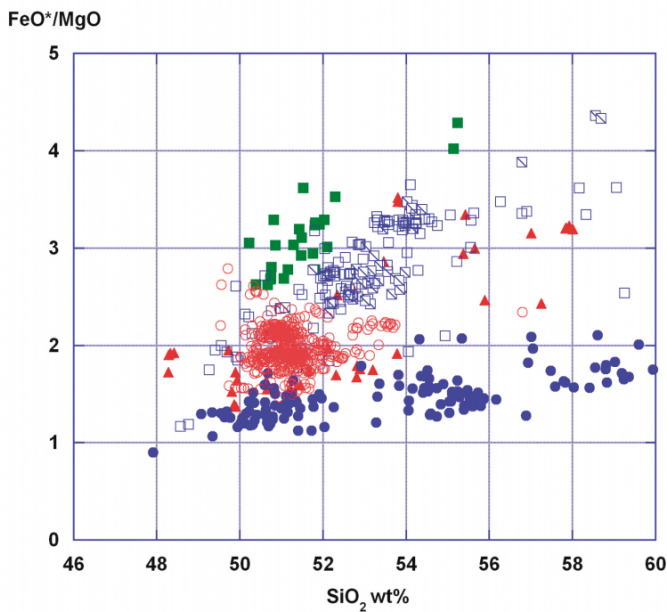


図6 伊豆弧の火山岩の FeO*/MgO-K₂O 図. 記号は図4に同じ.
Fig. 6. FeO*/MgO vs K₂O variation diagram of Fuji and the other Izu volcanoes. Symbols are the same as Fig. 4.

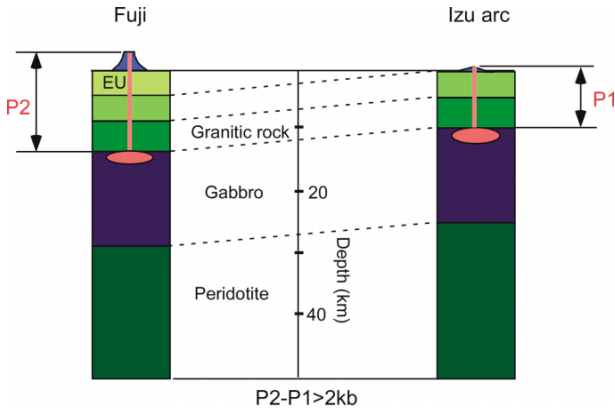


図7 富士火山直下および伊豆弧直下の地殻断面模式図。花崗岩質中部地殻直下に形成されるマグマ溜りの深さが異なることに着目。富士火山直下ではフィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込んでいるため、花崗岩質中部地殻が伊豆弧の比べて深い位置に存在し、マグマ溜りも深くなる。

Fig. 7. Schematic cross-section beneath Fuji and Izu-arc regions indicating the depth change of magma reservoir controlled by the location of granitic mid-crust. The granitic mid-crust beneath Mt. Fuji is deeper than the Izu arc because the crustal materials of Izu arc are carried beneath the Eurasian plate through subduction of Philippine Sea plate.

出順序の逆転が実現し、分化にともなう液組成変化は圧力に左右される。

さて、含水玄武岩マグマの結晶分化による液組成が地殻内のマグマ溜りの圧力の違いによって変化する以上、主要な結晶分化が生じるマグマ溜りの深さがマグマの分化トレンドを決定する上で重要な意義を持つことになる。

マグマ溜りの深さが決まる要因は一般にマグマと周囲の岩石の密度の釣り合いであると考えられている。地殻内で地表から深部に向かって次第に密度が増大する場合は、マグマと地殻物質の密度がつりあう深さで玄武岩マグマは停滞し、マグマ溜りを形成することになる。ところが、地殻内にマグマの密度よりも軽い物質の層が存在している場合、マグマはその密度よりも軽い物質を貫いて上昇することはできない。この場合には、マグマは軽い物質の下に停留する。伊豆弧の場合、成熟した島弧地殻を有するため、中部地殻に花崗岩質層が発達している (Suyehiro *et al.*, 1996)。花崗岩質岩石の密度は含水玄武岩マグマよりも小さいため、玄武岩マグマがこの直下で停滞し、マグマ溜りを形成することになる。八丈島、三宅島、伊豆大島などの伊豆弧のマグマが同じような分化トレンドを形成するのは、中部地殻に花崗岩質岩石が存在するためマグマ溜りがほぼ 10 km 程度の深さに作られるためであると考えられる。

4-3 富士火山のマグマ溜りの深さ

このような典型的な伊豆弧の地殻構造は北端の衝突帯付近では大きく様相が異なる。伊豆弧をのせたフィリピン海プレートは富士山南方でユーラシアプレートの下に沈み込んでいるため、単純に考えると富士山直下では地殻が2重に重なって、伊豆諸島直下では地下 5–10 km の深さにあった花崗岩質岩石が、富士山直下では、15–20 km 程度の深さに存在することになる (図 7)。

実際にはこの衝突部分の地殻構造はもっと複雑で、逆断層によってスライスされた伊豆弧の上・中部地殻がユーラシアプレートの下に縮合していると考えられている (Taira *et al.*, 1998) ので、伊豆諸島直下の中部地殻を形成していた花崗岩質物質は元の深さよりも更に深い場所まで存在することは確かのようなのである。このことを考えると、富士火山の直下の玄武岩質マグマの溜りは、伊豆弧の場合に比べて、より深い場所に作られ、圧力に換算すると少なくとも

1–2 kb 程度は高いと考えられる。Lee and Ukawa (1992) と 鶴川 (1994) は深さ 20 km 以深に低速度層の存在を指摘しているが、この部分に富士火山の主マグマ溜りが存在する可能性が高い。一方、伊豆弧の場合は地震波の散乱の解析から深さ 8–10 km にマグマ溜りが想定されている (Mikada *et al.*, 1994)。このように富士火山のマグマ溜りは伊豆弧の他の火山と比べて深い場所に形成されることにより、富士火山と他の火山では分化トレンドが異なると考えられる。

なお、中部地殻にあった花崗岩質岩石が沈み込みの進行に伴いスライス片として深部にもたらされると考えると、富士山直下で最近 10 万年前から突然玄武岩質のマグマの活動に変わったことも理解可能である。

吉本・他 (2004) や中田・他 (2007) が述べているように 10 万年前に古富士の活動が開始するまでは、富士火山の位置には愛鷹火山のように、玄武岩から安山岩を経てデイサイトにいたるマグマの活動があった。このことから、古富士火山が活動を開始するまではマグマ溜りは他の伊豆弧の火山のように浅所に作られていたが、10 万年前ころ、マグマ溜りの深さが深くなる事件が生じたと考えられることができる。

このような突然の変化をもたらすためには沈み込みの進行により、花崗岩質岩石からなるフィリピン海プレートの中部地殻の岩石が地下 15–20 km 付近にもたらされ、富士火山のマグマ供給系を一旦断ち切ったと考えればよい。密度の軽い岩石が深部にもたらされたため、マグマはその密度障壁を越えて上昇できず、その下位にマグマ溜りを形成せざるを得なくなったのである。この密度障壁の深部への移動は、中部地殻のスライス片が移動したためであると考えているが、地震波構造探査で明らかになったように、山頂直下で西側の基盤が東側に比べて数キロ深くなっている事実 (及川・他, 2004) と関係しているかもしれない。富士山のより深部での地下構造の解明が待たれる。

先にのべたように、やや高圧下で含水玄武岩マグマから晶出する鉱物はかんらん石、輝石、斜長石の順番であり、斜長石の晶出はかなり温度が低下し、分化が進むまで起こらない。このように、高圧下の結晶分化では輝石の役割が大きくなるため、分化に伴う液のシリカ増加は抑えられる。また、アルミナが濃集するため高アルミナ玄武岩の特徴も

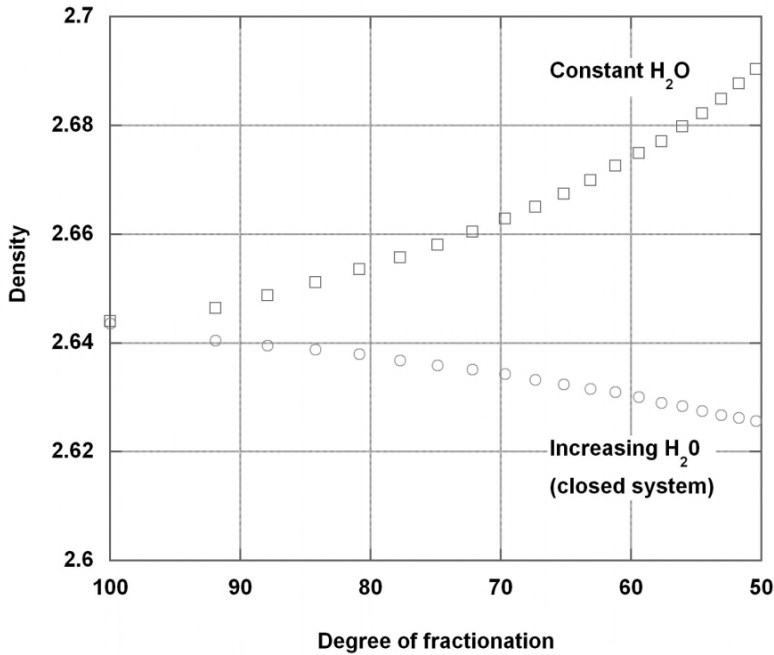


図8 富士玄武岩マグマの分化に伴う密度変化の模式図。青四角：1%の水の量を保ったまま分化する玄武岩マグマの密度，赤丸：1%の水を持つマグマが分化する際の密度変化，水は液相濃集成分として分化に伴って増加し，それによって密度が減少する。

Fig. 8. Density variation of a Fuji basalt magma with increasing degree of crystallization. Blue square represents magma with 1 wt% of H₂O and it is maintained constant through crystallization differentiation. Red circle represents magma with 1 wt% of H₂O which behaves as an incompatible element and consequently increases with increasing degree of crystallization.

獲得する。

含水玄武岩マグマでは分化によって鉄の濃集が行われるが含水量も増加する。水の部分モル体積は大きいので、図8に示すように、鉄が濃集するにもかかわらず含水量の増加のためにマグマの密度が減少し、地殻中部の密度障壁を突破できるようになる。別の言い方をすると深部マグマ溜りで分化が十分に進み、マグマ中への水の濃集が起こるまで、マグマは浅部へと移動できないのである。富士火山が分化の進んだ、鉄に富む玄武岩の噴出物で構成される理由はここにあるかもしれない。

浅所まで上昇したマグマが地殻浅部でマグマ溜りを形成するとガブロの集積岩を形成しつつ、安山岩、デイサイトに向かって分化するようになる。低圧ではかんらん石—斜長石—輝石の順に晶出し、しかも輝石は他の鉱物に比べてかなり低温で生じるため、シリカに乏しいかんらん石、斜長石の分化によって、高圧下での結晶分化に比べて液中にシリカが濃集しやすいのである。一旦シリカが増え、安山岩組成に近くなると、輝石やFe-Ti 鉱物の晶出によってもシリカが残液中に更に濃集するようになる。富士火山で見られる集積岩中の苦鉄質鉱物の組成が鉄に富んでいる（安井・他, 1998）のは、初生マグマの分化に関与して形成されたのではなく、既に高圧下で分化して鉄に富む玄武岩マグマの低圧での分化に関与して形成されたものと理解できる。宝永噴火の初期に噴出したデイサイトマグマもこのような低圧での結晶分化によって形成されたと考えられる。

このように定性的には富士火山と他の伊豆弧の火山におけるマグマの分化トレンドの違いはマグマ溜りの深さの違いとして説明できる。定量的な議論を行うには水に不飽和な含水マグマの地殻内圧力での融解実験が不可欠である。

5. 富士山はなぜそこにあるか

貝塚（1990）は富士山がなぜそこにあるかを議論して、富士山が地学的には特異点にあることを指摘した。火山フロントと衝突帯が交差する場所にあるからマグマの上昇率が高いと議論したが、なぜ特異点でマグマ上昇率が高いのは説明されていない。このメカニズムが解明されるときは近いと断じたが、いまだ解決は得られていない。

テクトニクスの観点からユニークな考えを提唱し、このメカニズムを説明しようとしたのが高橋（2000）である。玄武岩マグマが卓越することと、マグマ生産量が高いという特徴はプレートの拡大境界である海嶺部において認められる。富士火山の玄武岩と海嶺玄武岩の類似性を指摘したのは Arculus ら（1991）であるが、この考えをさらに進め、高橋（2000）は海嶺でプレートが拡大しているように、富士火山の下でフィリピン海プレートが裂けて拡大しつつあるため、玄武岩マグマが大量に活動するという考えを提案した。富士山直下でフィリピン海プレートに相当すると思われる地震活動が不活発なことに着目した山岡（1995）のフィリピン海プレートが裂けているという説に拠ったのである。

フィリピン海プレートが東西に裂けるため、マンテル物質が減圧融解して玄武岩マグマが生成されるとするものである。富士火山のマグマ生成率が高いのはフィリピン海プレートが引き裂かれるためであるというのである。プレート拡大軸におけるマグマ活動とのアナロジーは、大量のマグマを生産するという意味では、説得力があるように思える。しかし、海嶺で大量のマグマが生産されるのは、プレートの拡大に応じて高温のマンテル物質の上昇流が生じて減圧融解が起こるためであるが、富士山の地下にはそのような証拠はない。さらに、高橋（2000）も指摘するように、

富士火山において説明すべきなのは、単にマグマ量の問題だけではない。富士火山における玄武岩マグマは海嶺で見られる玄武岩に比べはるかに分化の程度が進んでおり、マンツルの減圧融解で発生する、マンツル物質と平衡に共存できるような組成ではないことに着目する必要がある。

ミニ海嶺モデルの前提はフィリピン海プレートが富士山直下で裂けているという点である。しかし、これに関連した最近の議論はフィリピン海プレートの分裂・拡大を想定していない。

フィリピン海プレートの上面付近で起こる深発地震が富士山周辺では観測されないということは、石田 (1986) の地震波データのコンパイルの時期から良く知られていた事実である。この地震活動が不活発である事実の説明として、富士火山の直下はマグマ活動のゆえに地震学的にはやわらかいか、上盤のプレートとの固着が弱いために地震が発生しにくいという考えが有力であった。これに対し、山岡 (1995) は新しい解釈を提出した。富士山直下ではフィリピン海プレートが裂けて、北北東側と北北西側へと異なる方向へと沈み込むため、富士山直下には地震活動が乏しいというアイデアである。先にも述べたように高橋 (2000) のミニ海嶺モデルはこのフィリピン海プレートのモデルによっている。一方、Iidaka *et al.*, (1990) は富士山の北方で約 30 km の深さにフィリピン海プレートの存在を示す PKP 波の転換を発見し、フィリピン海プレートは富士山の北方にまで連続していることを主張していたから、フィリピン海プレートが裂けているという考えは必ずしも共通の理解ではなかった。

最近、松原ら (2005) はフィリピン海プレート北縁のトモグラフィ解析をすすめ、フィリピン海プレートが日本海に至る地域まで連続していることを示した。Seno (2005) はフィリピン海プレートが沈み込む際に、上盤のプレートとの間のディカップリングが存在していることを示した。Seno (2005) によれば、このディカップリングのために富士山直下ではプレート境界の地震活動が不活発となるので、地震活動からはプレート境界を把握できないことになる。更に 2002 年から 2005 年にかけて行われた稠密地震観測網による自然地震の解析結果も、富士山直下にフィリピン海プレートが存在していることを強く示唆している (中道他, 2004, Nakamichi *et al.*, 2006)。このように最近の富士山直下のフィリピン海プレートに関する研究はミニ海嶺モデルの前提条件を否定する方向の結論へと収束しつつある。フィリピン海プレートの富士山付近での沈み込みの形状は 2005 年に行われた大規模な物理探査によって最終的な結論が得られる可能性が高い。しかし、富士火山のマグマ噴出率が日本の火山の中でなぜ際だって高いのかという点については振り出しに戻ったことになる。

6. おわりに

富士火山のマグマが 10 万年間にわたって分化した組成の玄武岩マグマを噴出し続けた理由は、中部地殻の発達した成熟した島弧をもつフィリピン海プレートがユーラシア

プレートの下に沈み込み、玄武岩マグマの上昇を妨げる密度障壁となったためであるとして説明できる。マグマ溜りの深さが他の火山に比べて深くならざるを得ないという事情によるものである。もちろん、島弧マグマとして水を含んだマグマであるということがこの特徴を更に際立たせる原因でもある。しかし、なぜ噴出率が富士火山で特異的に高いのかという点は解決がついていない。この課題に迫るためには、まず富士火山の初生マグマの組成を推定するための方法論が確立される必要がある。その上で、はじめてマグマの成因が議論できる。分化の進んだマグマしか手にすることができないという現状が富士火山の理解を困難にしているのである。

謝辞

本原稿をまとめるにあたって、東京大学地震研究所の安田敦、金子隆之、中田節也、吉本充宏 (現、北海道大学大学院理学研究科) の各氏との議論が有益であった。また、査読にあられた日本大学文理学部の高橋正樹氏には有益なコメントを頂いた。記して、感謝いたします。

引用文献

- Arculus, R. J., Gust, D. A. and Kushiro, I. (1991) Fuji and Hakone. *National Geographic Research and Exploration*, **7**, 276-309.
- 藤林枝枝・山本玄珠・野村朋子・加々美寛雄・永尾隆志 (1999) 富士火山宝永放出物の中の本質火砕物およびはんれい岩質集積岩に記録された玄武岩-安山岩、安山岩一流紋岩マグマ混合作用。地質学論集, 53号, 135-155.
- 藤井敏嗣・荒牧重雄・福岡孝昭・千葉達朗 (1984) 三宅島 1984 年噴火噴出物の岩石学的特徴。火山, **29**, s 266-s 282.
- 藤井敏嗣・荒牧重雄・金子隆之・小沢一仁・川辺禎久・福岡孝昭 (1998) 伊豆大島火山 1986 年噴火噴出物の岩石学的特徴。火山, **33**, s 234-s 254.
- 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, p 14.
- 藤井敏嗣・吉本充宏・安田 敦 (2002) 富士火山の次の噴火を考える-宝永噴火の位置づけ-。月刊地球, **24**, 617-621.
- 藤井敏嗣 (2004) 富士火山ではなぜ玄武岩マグマが卓越するか。月刊地球号外 No. 48, 153-159.
- Green, T. H. (1994) Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis-Sedona 16 years later. *Chemical Geol.*, **117**, 1-36.
- Ghiorso, M. S., and Sack, R. O. (1995) Chemical mass transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpretation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic system at elevated temperature and pressure. *Contrib. Mineral Petrol.*, **119**, 197-212.
- 飯田晃子・藤井敏嗣・安田 敦 (2004) 富士火山, 貞観噴火と宝永噴火-ガラス包有物からのアプローチ-。月刊地球号外 No. 48, 131-138.
- Iidaka, T., Mizoue, M., Nakamura, I., Tsukuda, T., Sakai, K., Kobayashi, M., Haneda, T. and Hashimoto, S. (1990) The

- upper boundary of the Philippine Sea plate beneath the western Kanto region estimated from S-P-converted wave. *Tectonophysics*, **179**, 321-326
- 石田瑞穂 (1986) 関東・東海地域の震源分布から推定したフィリピン海および太平洋プレートの等深線. 国立防災科学技術センター研究報告, No.36, 1-19.
- 貝塚爽平 (1990) 富士山はなぜそこにあるのか. 丸善, 174pp.
- 金子隆之・安田 敦・吉本充宏・嶋野岳人・藤井敏嗣・中田節也 (2004) 富士火山のマグマの特質とマグマ供給系-テフラ層の分析による検討-。月刊地球号外 No.48, 146-152.
- Koyaguchi, T. (1985) Magma mixing in a conduit. *J. volcano. Geotherm. Res.*, **25**, 365-369.
- 小屋口剛博 (1986) 苦鉄質マグマと珪長質マグマの混合機構. 火山, **30**, S41-54.
- 倉沢一 (1984) ストロンチウム同位体比からみた富士・箱根・伊豆地域火山岩類. 地調月報, **35**, 637-659.
- Lee, J.M. and Ukawa, M. (1992) The South Fossa Magna, Japan, revealed by high-resolution P- and S-wave travel time tomography. *Tectonophysics*, **207**, 377-396.
- 松原 誠・小原一成・笠原敬司 (2005) 東海地方における深部低周波微動・スロースリップイベント発生領域の速度構造, 日本地震学会講演予稿集, B 020.
- Mikada, H., Watanabe, H., and Sakashita, S. (1994) 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. *Physics Earth Planet. Int.*, **104**, 257-269.
- 宮地直道 (1988) 新富士火山の活動史, 地質雑, **94**, 433-452.
- 宮島 宏・吉田武義・青木謙一郎 (1985) 東伊豆単成火山群の地球化学的研究. 核理研報告, **18**, 158-174.
- 永井 匡・高橋正樹・平原由香・周藤賢治 (2004) 富士・小御岳・愛鷹火山岩類の Sr・Nd 同位体組成. 日大文理学部自然科学研究所研究紀要, No. 39, 205-215.
- 中田節也・吉本充宏・藤井敏嗣 (2007) 先富士火山群. 「富士火山」(荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道編), 山梨県環境科学研究所, 69-77.
- 中道治久・渡辺秀文・大湊隆雄・富士山稠密地震観測グループ (2004) 富士山稠密地震観測による地震波速度構造探索. 月刊地球, 号外 48, 17-22
- Nakamichi, H., Watanabe, H., Ohminato, T., Seismic Observation Group of Mount Fuji. (submitted) Three-dimensional velocity structure of Mount Fuji and the South Fossa Magna, central Japan. (in press *J. Geophys. Res.*)
- 中村利廣・万寿 優・佐藤 純・高橋春男 (1986) 富士火山 1707 年 (宝永 4 年) 噴出物の層序にそった組成変化. 火山, **31**, 253-264.
- 中野 俊・山元孝弘・一色直記 (1997) 八丈島火山群の全岩化学組成: 地表資料からみた東山火山と西山火山の比較. 地調月報, **48**, 93-105.
- 及川 純・鍵山恒臣・田中 聡・宮町宏樹・筒井智樹・池田 靖・湯山弘明・松尾のり道・西村裕一・山本圭吾・渡辺俊樹・大島弘光・山崎文人 (2004) 人工地震を用いた富士山における構造探索. 月刊地球, 号外 48, 23-26.
- 佐藤博明・原 郁男・小山美香 (1999) 富士火山 1707 年/864 年噴火のメカニズム. 月刊地球, **21**, 446-451.
- Seno, T. (2005) Izu detachment hypothesis: A proposal of a unified cause for the Miyake-Kozu event and the Tokai slow event. *Earth Planets. Space*, **57**, 925-934.
- Suyehiro, K., N. Takahashi, Y. Arie, Y. Yokoi, R. Hino, M. Shinohara, T. Kanazawa, N. Hirata, H. Tokuyama, A. Taira (1996) Continental crust, crustal underplating, and low-Q upper mantle beneath an oceanic island arc, *Science*, **272**, 390-392.
- Taira, A., Saito, S., Aoike, K., Morita, S, Tokuyama, H., Suyehiro, K., Takahashi, N. Shinohara, M., Kiyokawa, S., Naka, J. and Klaus, A. (1998) Nature and growth rate of the Northern Izu-Bonin (Ogasawara) arc crust and their implications for continental crust formation, *The Island Arc*, **7**, 395-407.
- 高橋正樹 (2000) 富士火山のマグマ供給システムとテクトニクス場-ミニ拡大海嶺モデル-, 月刊地球, **22**, 516-523.
- 高橋正樹・根本靖彦・長谷川有紀絵・津久井雅志 (1991) 富士火山におけるマグマ供給系の進化: 全岩化学組成の視点から. 火山, **36**, 281-296.
- 高橋正樹・小見波正修・根本靖彦・長谷川有紀絵・永井 匡・田中英正・西 直人・安井真也 (2003) 富士火山噴出物の全岩化学組成-分析データ 847 個の総括-. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, No.38, 117-166.
- 富樫茂子・宮地直道・山崎春雄 (1991) 新富士火山初期の大きなソレアイトマグマだまり, 火山, **36**, 269-280.
- 富樫茂子・宮地直道・安井真也・角田明郷・朝倉伸行・遠藤邦彦・鶴川元雄 (1997) 古富士火山末期から新富士火山にわたるマグマの組成変化-富士吉原火山観測施設のポーリングコアの岩石化学的性質. 火山, **42**, 409-4211.
- 富樫茂子・高橋正樹 (2007) 富士山のマグマの化学組成と岩石学的特徴: マグマの実態への制約条件. 「富士火山」(荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道編), 山梨県環境科学研究所, 219-231
- Tsukui, M. (1986) A magma reservoir and its evolution beneath a polygenetic volcano. Doctoral thesis, University of Tokyo.
- Tsukui, M., Sakuyama, M., Koyaguchi, T. and Ozawa, K. (1986) Long-term eruption rates and dimensions of magma reservoirs beneath Quaternary polygenetic volcanoes in Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **29**, 189-2-2.
- 津久井雅志・新堀賢志・川辺禎久 (2002) 三宅島火山 2000 年陥没カルデラ, 地震研彙報, **77**, 27-42.
- 鶴川元雄 (1994) 富士火山の下で何が起きているか: 地震波でみるマグマの上昇. 岩波科学, **64**, 570-581.
- Watanabe, S., Widom, E., Ui, T., Miyaji, N. and Roberts, A. M. (2006) The evolution of a chemically zoned magma chamber: The 1707 eruption of Fuji volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **152**, 1-19.
- 山岡耕春 (1995) 沈みこんだフィリピン海プレートの形状と東海地震, 月刊地球, 号外 No 14, 116-124.
- Yamashita, S. (1999) Experimental study of the effect of temperature on water solubility in natural rhyolite melt to 100 MPa. *J. Petrol.* **40**, 1497-1507.
- 安井真也・富樫茂子・下村泰裕・阪本晋介・宮地直道・遠藤邦彦 (1998) 富士火山・1707 年降下火砕堆積物中の斑れい岩質岩片の岩石学的性質とその起源. 火山, **43**, 43-59.

安田 敦・金子隆之・吉本充宏・嶋野岳人・中田節也・藤井敏
嗣 (2004) 溶岩流試料に基づくマグマの成因の検討. 月刊地
球, 号外 No. 48, 139-145.

吉本充宏・金子隆之・嶋野岳人・安田 敦・中田節也・藤井敏
嗣 (2004) 掘削試料から見た富士山の火山形成史. 月刊地球,
号外 No. 48, 89-94.

Yoshimoto, M., Fujii, T., Kaneko, T., Yasuda, A., and Nakada,
S. (2004) Multiple magma reservoirs for the 1707 eruption of Fuji
volcano, Japan. *Proc. Japan Acad., Ser. B*, **80**, 103-106.