



Magma mixing processes in island arc volcanoes

Sato, Eiichi

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2009-03-25

(Date of Publication)

2011-11-07

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4513

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004513>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏 名 佐藤 鋭一
博士の専攻分野の名称 博士（理学）
学 位 記 番 号 博い第 4513 号
学位授与の要件 学位規則第 5 条第 1 項該当
学位授与の日付 平成 21 年 3 月 25 日

【 学位論文題目 】

Magma mixing processes in island arc volcanoes （島弧火山におけるマグマ混合過程の研究）

審 査 委 員

主 査 教 授 佐藤 博明
教 授 乙藤 洋一郎
教 授 宇都 浩三
准教授 岩山 隆寛
准教授 鎌田 桂子

マグマ混合過程は、中間組成のマグマを生成する原因として、中央海嶺玄武岩、ホットスポット火山、および島弧火山でその証拠が数多く報告されている。島弧火山においては、安山岩の有力な成因論としてマグマ混合の考えが支持されてきた。また、マグマ混合は噴火のトリガーになるばかりでなく、マグマ溜まりの進化過程にも大きな影響を与える。このように噴火現象・マグマ溜まりの進化過程を考察する上で、マグマ混合は重要な鍵となる。本論文は、マグマ混合過程のレビュー、これまで明らかにされていなかった低レイノルズ数で火道を上昇する場合のマグマ混合に関するアナログ実験、さらにその実験結果を雲仙普賢岳 1991-1995 年噴火のマグマ混合過程に適用することで構成されている。

本論文では、まず島弧火山におけるマグマ混合過程のレビューを行った。このレビューにおけるマグマ混合とは、低温・低密度で存在する珪長質マグマ溜まりに高温・高密度の苦鉄質マグマが注入する過程とする。珪長質マグマ溜まりに新しく苦鉄質マグマが注入する場合、苦鉄質マグマの注入の駆動力が大きいときに珪長質マグマと乱流混合する場合が考えられる。しかし、珪長質マグマの粘性力が大きい場合には、たとえ苦鉄質マグマの注入の駆動力が大きい場合であっても珪長質マグマの粘性力によって混合が抑制される。その場合、苦鉄質マグマは珪長質マグマ溜まりの底に溜まり、密度成層したマグマ溜まりが形成される。密度成層したマグマ間での元素拡散は非常に小さく、混合が生じるためには以下の 3 つの機械的な混合の条件が必要とされる。(1) 苦鉄質マグマの冷却に伴う結晶化および気泡の生成による上下マグマの密度の逆転、(2) 珪長質マグマの熱対流による苦鉄質マグマの吸い上げ、(3) マグマ間の境界付近で生じる強制的回転によるマグマの取り込みである。成層マグマ溜まり内でこれらの過程が生じた場合、成層状態を維持できずに混合が生じる。一方、成層マグマ溜まり内の圧力が周囲の岩体の圧力よりも大きくなった場合、上部の珪長質マグマが火道に押し出される。その後、珪長質マグマの粘性力によって、マグマ溜まりの下部に位置する苦鉄質マグマが引き上げられ、両マグマは同時に火道を上昇する。このように

2 種類のマグマが火道を同時に上昇する際の混合過程は、火道内でのマグマのレイノルズ数が大きい場合 (爆発的な噴火) と小さい場合 (非爆発的な噴火) に分類できる。レイノルズ数が大きい場合は、火道内でマグマに不安定が生じ両マグマは混合しうる。しかし、レイノルズ数が小さい場合には、マグマは火道内を層流状態で上昇し、安定した管状流が維持され混合は生じない。その場合、閉鎖した火道内で珪長質マグマの粘性力と苦鉄質マグマの重力効果のバランスによるマグマの循環によって混合が可能であるが、開放した火道内で定常的にマグマの流れがあるような状態での混合過程は未だに解明されていない。

したがって、本研究ではマグマ溜まりと火道が繋がった状態で、マグマ溜まりからマグマが低レイノルズ数で上昇する場合を想定し、マグマ混合におけるマグマポケットの効果をアナログ実験によって検討した。マグマポケットは近年、地球物理学的な観測からその存在が確認されてきている。実験にはアクリル板を用いて作成した上部容器 (60 mm × 60 mm × 80 mm; 底辺 × 底辺 × 高さ) の下方にアクリルパイプ (直径 6 mm, 長さ 200 mm)、ポケット (60 mm × 10 mm × 40 mm)、アクリルパイプ (直径 6 mm, 長さ 200 mm) をこの順に取り付けた装置を用いた。実験では、上部容器内に異なる物性を持つ 2 種類の液体を密度成層させる。上部に liquid 1 (低粘性 (μ_1)・低密度 (ρ_1) で赤色に着色)、下部に liquid 2 (高粘性 (μ_2)・高密度 (ρ_2) で無色透明) となるように液体を満たし、重力によって降下させる。この装置は天然のマグマシステムと上下が逆になっているが、液体の密度を $\rho_2 > \rho_1$ と設定することで、天然で苦鉄質マグマに働く重力の効果、実験では liquid 1 に働く浮力の効果と置き換えることができ、天然を再現した装置といえる。実験開始前には、ポケット・パイプ内を liquid 2 で満たしてある。実験で使用した液体は水 (1000 kg/m³, 0.001 Pa s)、洗濯糊 (ポリビニルアルコール, 1020 kg/m³, 0.59 Pa s)、水飴-水混合液 (1340-1480 kg/m³, 0.56-150 Pa s)、グリセリン-水混合液 (1210-1250 kg/m³, 0.07-0.93 Pa s) である。また、実験で行ったレイノルズ数の範囲は $Re = 10^{-3}$ - 10^3 である。実験の結果、ポケットに注入

した liquid 1 の形態は 2 種類のタイプに分類できた。1 つ目のタイプはポケット内で liquid 1 が扁平な円盤 (oblate-disk shape) を形成する場合である。この場合、liquid 1 と liquid 2 は分離した状態を維持したままポケットを通過し、下部のパイプに吸い込まれていく。この場合、混合は生じていないといえる。一方、2 つ目のタイプはポケット内で liquid 1 が浮き上がる場合 (flotation shape) である。この場合はポケット内での liquid 1 の形態の違いから、さらに 2 つのサブタイプ (spread sub-type, lobe sub-type) に分類できる。Flotation shape では、liquid 1 がポケットに注入した際、ポケットの入り口付近に停滞し、その後、水平方向に拡がり、ポケット内の liquid 2 を取り込みながら上昇する。パイプからは密度の大きい liquid 2 も同時に供給され、liquid 2 はある程度溜まった後に、水平方向に拡がる liquid 1 を引き延ばしながら、塊となって降下する。この現象が繰り返され、liquid 1 と liquid 2 の連続的な層が形成され、mingling の様相を示す。Spread sub-type と lobe sub-type は基本的には同様の現象を示すが、lobe sub-type の方がポケットの中部まで沈みこんだ後に不均質になる。また、lobe sub-type での液体のレイノルズ数は非常に小さい。Oblate-disk shape と flotation shape の形態の違いは、ポケットの入り口で密度の不安定な層が形成し、Rayleigh-Taylor 不安定が生じるか、または liquid 1 が liquid 2 の粘性力によって下部のパイプに吸い込まれてしまうかという問題で判断することができる。その関係を今回、粘性力と重力の項による無次元数 $P (= \mu_2 U / (g \Delta \rho a b / \pi))$ を導入し分類した。ここで、 U は速度、 g は重力加速度、 $\Delta \rho$ は液体の密度差、 a, b はポケットの底面のサイズである。その結果、およそ $P < 0.1$ の条件で flotation shape となり、2 つの液体の混合が生じる可能性がある。これらの形態の違いはポケットに注入する際の liquid 1 のレイノルズ数 (Re_1) に依存せず、低レイノルズ数での混合が可能である。

今回、このアナログ実験の結果を雲仙普賢岳 1991–1995 年噴火のマグマ混合過程に適用し、マグマ混合のメカニズムを検討した。雲仙普賢岳 1991–1995 年の噴火では、噴火期間中ほぼ同じ化学組成のデイサイト (SiO_2

$= 64.5\text{--}66.0$ wt.%) が噴出した。岩石学的な研究によって、このデイサイトは高温マグマと低温マグマが混合することによって形成したことが明らかとなったが、混合のメカニズムに関する議論はこれまで十分には行われていない。地球物理学的な観測から雲仙普賢岳の地下には 4 つのマグマポケットの存在 (A: 0.6–1.3 km; B: 4.0 km; C: 6.8–7.0 km; D: 15 km) が確認されている。地球物理学的および実験岩石学的な研究から高温マグマは地下 15 km のマグマポケット D、そして低温マグマは地下およそ 7 km のマグマポケット C に存在すると考えられている。各端成分マグマの物性 (密度・粘性率) を推定し、高温マグマが D から上昇し、C に注入するとき、および C で成層マグマ溜まりを形成し、その後同時に火道を上昇する場合のマグマのレイノルズ数を求めたところ 0.1 のオーダーとなった。したがって、火道内でマグマが不安定になることによる混合は生じない。一方、C から高温マグマと低温マグマが同時に火道を上昇し、地下 4 km のマグマポケット B に注入したとき、 $P < 0.1$ の条件を満たす。したがって、2 種類のマグマが B に注入した際、マグマに不安定が生じ管状流が崩壊し、マグマポケット内で混合が促進した可能性がある。

本研究により、成層したマグマ溜まりから苦鉄質マグマと珪長質マグマが同時に火道を上昇した場合、マグマポケットの効果によって、ポケット内で不安定な層が形成し、低レイノルズ数でもマグマ混合が生じる可能性が明らかとなった。したがって、マグマポケットの存在は、マグマ混合を促進させる一つの要因になりうる。

氏名	佐藤 鋭一		
論文 題目	Magma mixing processes in island arc volcanoes (島弧火山におけるマグマ混合過程の研究)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	佐藤 博明
	副査	教授	乙藤 洋一郎
	副査	教授	宇都 浩三
	副査	准教授	岩山 隆寛
	副査	准教授	鎌田 桂子
要 旨			

本論文は、島弧火山のマグマ成因に重要であると考えられているマグマ混合過程について、その具体的なプロセスを主にアナログ実験により検討したものである。マグマ混合過程が火成岩の生成に重要な役割を担っていることは、100年以上前に気付かれていたが、1970年代に入って電子線プロンプマイクログラフ装置の普及で造岩鉱物の局所化学分析が可能となり非平衡斑晶の存在等、マグマ混合の証拠が具体的に示されるようになった。また、全岩化学分析が機器分析により迅速、正確、大量に行なえるようになったことも相まって、ハワイ溶岩をはじめ、海嶺玄武岩、島弧火山岩でマグマ混合の端成分が具体的に検討されるようになった。一方、混合過程については1980年代に、流体実験と簡単な理論的考察から検討が行なわれた。1990年代以降は計算機実験、局所同位体分析、種々の速度計の適用などにより、より具体的な端成分マグマの決定、マグマ混合過程の時間スケール等の推定が行なわれるようになってきた。しかしマグマシステムの何処でどのような過程で混合が生じるかという問いについては十分な検討がすすんでいない。本論文は、特にマグマポケットに於けるマグマ混合過程を流体実験を中心とした手法で検討し、天然への応用を考察している。

全体は5章に分かれており、第1章は全体の構成について述べている。

第2章は、これまでのマグマ混合に関連する論文のレビューを行っている。特に島弧火山に特徴的な、低温低密度の珪長質マグマと高温高密度の苦鉄質マグマの混合に関して、まず、岩石学的なマグマ混合のこれまでの研究を纏めている。マグマ混合の証拠として挙げられているのは、縞状軽石、苦鉄質包有物、などである。次にマグマ混合過程の生じる場をマグマ溜まりと火道に分けてそれぞれに関する論文の批判的なレビューをおこなっている。マグマ溜まり内の混合は4つの場合が挙げられている。一つ目は、マグマ溜まりに高温マグマが比較的高速で注入される場合で、高レイノルズ数で溜まりの液の粘性が小さい場合は乱流混合が生じる (Campbell & Turner, 1985, 1986)。しかし高レイノルズ数でも島弧火山のように周囲の液の粘性が高い場合には混合は抑えられる。二つ目は、成層マグマ溜まりで、高温の苦鉄質マグマが冷却に伴い結晶作用を生じ揮発性成分に飽和後発泡して密度逆転が生じる場合である。これは Eichelberger (1980), Huppert et al. (1982, 83) 等により検討されたもので、より低圧 (浅所) で苦鉄質マグマの含水量が高い場合にそのような機構が有効と考えられる。この機構の場合、Rayleigh-Taylor 不安定が生じるが、温度差による結晶作用と粘性変化についての検討は今後の課題としている。三つ目の機構として Snyder & Tait (1996) は成層マグマ溜まりで低温マグマの熱対流により高温マグマが低温マグマに引きずられて混合を生じる過程をアナログ実験で示した。境界層で Kelvin-Helmholtz 不安定が生じて混合すると思われるが、天然で噴火初期に少量の混合マグマが噴出する場合に適用されるとしている。四番目の混合機構は、Kouchi & Sunagawa (1982, 1983) により示された強制対流による混合である。下部がデイサイト、上部が玄武岩の円柱を強制的に高温で回転させるとレイノルズ数は小さいにも関わらず混合が生じることが示された。しかしこの系では密度不安定での混合も考えられ、そのような視点からの解析が必要であることが指摘されている。火道内混合については、高レイノルズ数での混合機構 (Koyaguchi, 1985; Blake & Campbell, 1986; Freundt & Tait, 1986) と低レイノルズ数・閉じた系での混合機構 (Koyaguchi & Blake, 1989) について論じている。後者は極小規模噴火を除いて閉じた火道系は考え難く、また前者はドーム噴火等の低レイノルズ数での混合は説明できず、島弧マグマの混合過程として不十分であることを

氏名	佐藤 鋭一		
論文 題目	Magma mixing processes in island arc volcanoes (島弧火山におけるマグマ混合過程の研究)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	佐藤 博明
	副査	教授	乙藤 洋一郎
	副査	教授	宇都 浩三
	副査	准教授	岩山 隆寛
	副査	准教授	鎌田 桂子
要 旨			

述べている。以上のように、従来提案されたモデルでは島弧マグマで一般的に認められるマグマ混合過程については十分に説明できず、今回、火道内にポケットが存在する場合のアナログ実験を実施することとした。

第3章は本論文の中心をなすもので、マグマポケットが存在する場合のマグマ混合条件をアナログ実験を基に検討している。最初に従来のマグマ混合に関する研究の概要について述べ、島弧火山の非爆発性噴火のような低レイノルズ数、開いた系での適当なマグマ混合モデルが必要とされている経緯を記している。次に、実験手法について、まず流体材料としての水-鉛系、水-グリセリン系の密度と粘性係数の組成依存性の測定結果を示している。実験装置はアクリル板で製作した上部容器 (60×60×80mmH)、パイプ (内径 6mm)、ポケット (60×10×40mmH)、下部パイプ (内径 6mm) を直列に繋げたもので、上部容器に2種の液体を置き重力で落下させて2液の混合過程を記録・解析するものとなっている。この系は Koyaguchi & Blake 等により用いられたものと同様、天然のマグマ系を上下を逆にした以外は同じ条件を与える。この論文では、それぞれ異なる液体の組み合わせを用いた10回の実験について記載・解析を行っている。実験結果を低密度・低粘性の液体 (着色有) のポケット内での形状に基づいて、Oblate-disk型とFlotation型に区分し、さらにFlotation型はSpread-typeとLobe-typeに細分した。Oblate-disk型の場合は管流はポケットに於いて拡大するが、下方のパイプに流入すると元通りの管流に戻り、2つの液は殆ど混合しない。一方Flotation型の場合はポケット中で重力不安定により何らかの形で液体の伸長・変形が生じ、2つの液は粗混合する。Spread-typeの場合、上方から流入した液1は入口の10mm程度下方で側方に拡大し、そこでRaileigh-Taylor不安定により上に位置する重い液2が液1層を落下することを繰り返す。これにより液1は引き伸ばされ境界面積は増大する。一方、Lobe-typeの場合は、流入した液1はポケットの中央上部に溜まった後に側方にLobe状に突き出し、その後上昇する。このようなLobeの突出が中心の液1の両側に繰り返り、全体として重力不安定による流体の混合が促進される。これらの液1の形状の違いについて、まずOblate-disk型とFlotation型の違いについては、浮力と粘性力の比を用いてその違いの原因を示している。つまり、浮力に対して粘性力が比較的大きい場合は、マグマポケットでも管流が保持されOblate-disk型になる。一方、粘性力に対して浮力が比較的大きいと管流が保持されず、Flotation型になる。実際には、液1の形状には上方パイプからの流入速度や下方パイプへの流出速度、それと関連してポケットの高さ、等のパラメータが関与するが、主要なパラメータとして粘性力と重力の比をとった無次元数を用いると今回の実験結果が整理されることが示された。即ち、 $P = \mu U / (g \Delta \rho a b / \pi)$ の値でみると、実験結果でOblate-disk型は $P > 0.1$ の場合に生じており、Flotation型は $P < 0.1$ で表される。Flotation型のなかでSpread-typeとLobe-typeの違いについては、レイノルズ数が10以上の場合前者に、1以下の場合に後者となることが示された。これらの基準は今回の実験系について得られたもので、厳密には流入量やポケットサイズに依存するが、相対的な基準として天然に適用できると考えられる。

第4章では、天然への適用例として雲仙岳1991-1995年噴火について適用し、地盤変動から見積もられた4つの連結したマグマポケットの変形量からポケットサイズを見積もり、一方、岩石学的な情報からマグマ混合の端成分マグマの組成、密度、粘性を見積もり、上記パラメータPを見積もった結果、火道中では低レイノルズ数で混合は生じないが、ポケットでは $P < 0.1$ で十分に管流不安定が生じることが示された。

第5章は全体のとりまとめをおこなっている。

本研究は、従来十分検討が行なわれてこなかった低レイノルズ数でのマグマ混合の新たな機構を提案しており、島弧マグマ成因論に重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって本論文は、学位申請者の佐藤鋭一は、博士 (理学) の学位を得る資格があると認める。