

論文内容の要旨

論文題目 Experimental study on the differentiation of island arc basalt
(島弧玄武岩の分化に関する実験的研究)

東京大学大学院理学系研究科
地球惑星科学専攻

濱田盛久

1. 研究の目的

島弧マグマには数 wt.%の水が含まれることが特徴として挙げられ、含水量の違いによって相関係や分化トレンドの多様性が生じる。また、島弧は厚い地殻を有しているため、島弧ソレイトでさえ、地殻内での結晶分化作用・マグマ混合などにより、初生マグマからは大きく分化している。結晶分化作用が地殻内のどの深度で卓越するかは、個々の火山における地殻構造によって異なるが、地殻内でのわずかな分化圧力の違いによっても相関係や分化トレンドの多様性が生じる可能性がある。そこで本研究では、未分化な島弧玄武岩の結晶分化作用に及ぼす水と圧力の効果について実験的研究を行う。また得られた実験結果を基に、伊豆弧北部の火山(富士火山と伊豆大島火山)を例として、マグマの結晶分化作用に及ぼす水と圧力の効果について定量的に議論する。

2. 未分化な島弧玄武岩マグマ(Mg#=60)の分化に及ぼす

水、圧力、酸素雰囲気の効果

本研究では、含水量 0.7-2.7wt.%の未分化な島弧玄武岩(Mg#=60)を試薬で合成し、島弧の火山フロントにおける地殻内圧力(2-7kb)下で融解実験を行った。実験中の酸素雰囲気は~NNO+1バッファーである。実験の結果、2kb では、カンラン石+斜長石に支配される結晶分化作用が得られた。2kb から 4kb へ圧力が上昇すると斜方輝石・単斜輝石の晶出温度が急激に($\geq 20^{\circ}\text{C}/\text{kbar}$)上昇し、結晶分化作用に及ぼす影響が大きくなる。その結果、(カンラン石+斜方輝石+斜長石+単斜輝石)に支配される結晶分化作用が得られた。7kb では、いずれの含水量の下でもカンラン石は晶出せず、斜方輝石がリキダス相となり、斜方輝石+単斜輝石 \geq 斜長石による結晶分化作用が得られた。いずれの圧力条件においても、含水量の増加に伴いリキダスの低下、磁鉄鉱の早期晶出などが観察され、2.7wt.% H₂O の条件ではリキダスに近い温度で晶出を開始した。その結果、液は H₂O \leq ~1.6 wt.%の条件では、圧力が高くなるほど、輝石の晶出の効果により SiO₂ 量の増加が抑え

られたソレイト系列の分化トレンドを描くが、 $H_2O \sim 2.7$ wt.%の条件では、磁鉄鉱の晶出に強く影響されて、 FeO^*/MgO 比が増加せずに SiO_2 量の増加が促進されるカルクアルカリ系列の分化トレンドを描くことが分かった。

本実験は $\sim NNO+1$ バッファーの酸素雰囲気の下で行われたが、これまでの研究から島弧マグマの酸素雰囲気は $NNO \sim NNO+2$ バッファーであると報告されている。従って、本実験結果を実際のマグマ溜まりでの結晶分化作用に応用して議論するためには、酸素雰囲気が ± 1 log unit 変化する場合の相関係数の変化、とりわけ磁鉄鉱の晶出温度の変化(1 log unit 上昇すると磁鉄鉱の晶出温度が約 $30^\circ C$ 上昇する、と仮定)を考慮する必要がある。磁鉄鉱の晶出に強く影響されてカルクアルカリ系列の分化トレンドが実現する時のバルク含水量は、分化圧力に関わらず酸素雰囲気の変化に応じて $2 \sim 4$ wt.%である。この含水量を $3 (\pm 1)$ wt.%と置き換えて一般化する事が可能である。同様に含水量 0.7 wt.%、 1.6 wt.%の実験結果は、それぞれ含水量 $\sim 1 (\pm 1)$ wt.%、 $\sim 2 (\pm 1)$ wt.%と置き換えて一般化することができる。

3.伊豆弧の火山(富士火山と伊豆大島火山)の

マグマ含水量・分化圧力についての考察

富士火山は、伊豆大島火山をはじめとする他の島弧火山と同様、ソレイト系列の分化トレンドを形成するが、その噴出物のほとんど全てが玄武岩であるという際立った特徴を持っている。すなわち富士火山では、玄武岩マグマは、 SiO_2 量がほとんど増加せずに FeO^*/MgO wt.%比が減少し、液相濃集元素が増加する。地震学的研究や岩石学的研究から、富士火山における主要な結晶分化作用は地下 $15-20$ km ($3-4$ kb)の深度にあるマグマ溜りで進行しており、伊豆大島火山をはじめとする他の島弧火山の地下 10 km 以下(~ 2.5 kb 以下)での結晶分化作用よりも $1-2$ kb 高压で起こっていると考えられている。2.の実験結果に基づくと、バルク含水量 ≤ 2 wt.%の島弧玄武岩マグマは $3-4$ kb の圧力下では輝石を主体とする結晶分化作用を導き、 SiO_2 量がほとんど増加しない富士火山の分化トレンドを再現することが可能である。一方、伊豆大島火山をはじめとする伊豆弧の火山の多くは、 SiO_2 量の増加にともなって K_2O 量や FeO^*/MgO 比が緩やかに増加する典型的なソレイトの分化トレンドを描く。この分化トレンドは2.の実験結果に基づくと カンラン石や斜長石を主体とする低圧($P \leq 2$ kb)・低含水量($H_2O \leq 2$ wt.%)の条件下で再現することが可能である。

4.島弧火山フロントにおける Ca に富む斜長石

とソレイト系列分化トレンドの成因についての考察

島弧の火山フロントの玄武岩中に普遍的に観察される Ca に富む斜長石($An \geq 90$)の成因として、 $\sim 5-6$ wt.%の水が必要という主張が実験岩石学の観点からなされている。一方、2.の実験結果からは、ソレイト系列の分化トレンドの成因という観点から比較的低い含水量($Mg\# \sim 60$ のマグマに

換算して $H_2O \leq \sim 2$ wt.%) が導かれている。本研究では、伊豆大島火山の Ca に富む斜長石中のメルト包有物の分析を行い、斜長石がどんな組成・含水量のマグマから晶出したのかを検討した。また、分化トレンドの成因との整合性について検討した。

EPMA(電子線プローブマイクロアナライザー)による主成分元素の分析により、幅広い分化の程度 ($30 \leq Mg\# \leq 45$) の液組成が得られた。メルト包有物の Ca/Na 値は約 3 であり、伊豆大島火山の液組成を代表すると考えられる無斑晶質溶岩の Ca/Na 値とほぼ同一である。したがって、Ca に富む斜長石は外来結晶ではなく、Ca に富むマグマも晶出には関与していないと推定される。一方 FTIR (フーリエ変換赤外分光計) を用いて分析により得られたメルト包有物の含水量は 0.2-2.6wt.% であった。

Ca に富む斜長石の成因を定量的に理解するため、本研究では、斜長石-メルト間の Ca/Na 分配係数を温度、圧力、メルト組成 (Al/Si 比)、含水量の関数として定式化を行った。この元素分配関係を利用してメルト包有物のオーバーグロースを補正し、斜長石晶出時のメルト組成・含水量を推定した。その結果、Ca に富む斜長石は ~ 3 -6wt.% の水を含む玄武岩メルトから晶出したと推定された。メルト包有物の分析により得られた 0.2-2.6wt.% という含水量は、 ~ 3 -6wt.% という理論値よりも少なく、しかもバリエーションが生じている。その理由として、マグマ上昇に伴う減圧時にメルト包有物の内圧が外圧に比べて高まり宿主鉱物に微小なクラックが生じることによって、溶存していた揮発性成分がリークした可能性が考えられる。

メルト包有物の描く組成バリエーションは、 SiO_2 量の増加に伴って TiO_2 量が減少、 FeO^*/MgO 比が増加しないなどの点で、液組成を代表すると考えられる無斑晶質溶岩の全岩化学組成が描くソレイト系列の典型的な分化トレンドとは異なっている。この組成バリエーションは、Ca に富む斜長石を晶出したマグマ ($30 \leq Mg\# \leq 45$) が磁鉄鉱も同時に晶出していた可能性を支持する。それは、バルク含水量 $\geq \sim 3$ wt.% である $Mg\# \sim 60$ の島弧玄武岩マグマは、磁鉄鉱を結晶分化作用の早期に晶出するという 2. の実験結果とも整合的である。島弧の火山フロントにおいて、全岩化学組成分析から普遍的に得られるソレイト系列の分化トレンドは、地殻深部での結晶生成時には ~ 6 wt.% 以上の水を含んでいた玄武岩マグマが、地下浅部まで上昇し脱ガスしながら低含水量・低圧下で結晶分化作用を被った結果であると解釈できる。メルト包有物の含水量の分析値 (0.2-2.6wt.%) や、Ca に富む斜長石の成因から推定される含水量 (~ 3 -6wt.%) にバリエーションがあるのは、減圧・脱ガスの結果、マグマ中の含水量にバリエーションが生じていたためであろう。

一方、富士火山においては、地下 15-20km (3-4kb) の深度にあるマグマ溜りから直接噴出したと推定される 1707 年噴火の噴出物 ($Mg\# \sim 46$) のメルト包有物の分析、実験岩石学的研究から、噴火直前のメルトの含水量は 3-4wt.% であったと推定されている。これは、 $Mg\# \sim 60$ のマグマがバルク含水量 $\leq \sim 2$ wt.%、圧力条件が 3-4kb の下で SiO_2 量がほとんど増加しない富士火山の分化トレ

ドを再現することが可能という2.の実験結果とは、結晶分化作用の進行に伴うメルト中の含水量の増加を考慮すれば整合的であると考えられる。

以上述べたように本研究は、圧力-温度-メルト含水量空間内での島弧玄武岩の相関係・分化トレンドを実験的に明らかにすると同時に、その知見を島弧のメルト包有物の組成トレンドや揮発性成分量、ホスト鉱物-メルト包有物間の元素分配を利用したメルト包有時の含水量の推定などと組み合わせることにより、伊豆弧北部の火山(富士火山と伊豆大島火山)を例として、島弧玄武岩マグマの結晶分化作用に及ぼす水と圧力の効果について定量的に考察した。また、分化トレンドの再現、Caに富む斜長石の成因という観点から、伊豆大島火山のマグマ含水量は、初生的に富士火山よりも多い可能性について言及した。