

共同研究成果報告書

火山活動評価のためのマグマ滞留時間の 推定手法に関する研究

原子力規制委員会 原子力規制庁

共同研究相手先 国立大学法人北海道大学
国立研究開発法人日本原子力研究
開発機構

令和6年2月

1. 研究目的

原子力施設に影響を及ぼす可能性のある火山活動の長期的な予測には不確実性を伴う。その主な理由は、過去の火山活動における噴火に至る地下マグマの挙動（マグマの進化過程）についての情報が少なく、噴火の規模や様式との関係についての理解が不十分であることが挙げられる。過去のマグマの進化過程としてマグマの位置（深さ）及びマグマの滞留（蓄積）時間スケール（マグマ蓄積開始から噴出までの時間）を推定することで、休止期間の長い火山活動の長期的な予測の不確実性を低減できる可能性がある。本研究では、火山活動を予測するための重要な指標となるマグマ滞留（蓄積）の時間スケールを推定する手法の構築を目的としている。

2. 研究内容

マグマの滞留（蓄積）時間スケールを推定するためには、マグマ蓄積中に生成した結晶の生成年代値を推定し、噴火年代値との差分から推定する手法が用いられる。その結晶の生成年代を推定するに当たっては、結晶中に存在する不純物の元素拡散プロファイルから推定する手法と結晶中の放射性核種の濃度から推定する手法が用いられる。本研究は、上記目的を達成するための試みとして、この2種類の手法に関する既往知見を基に、これらの手法についてケーススタディを実施し、適用条件を明確にするとともに課題を抽出する。

3. 実施方法

本研究では、マグマ滞留（蓄積）時間スケールを推定する手法として上記の元素拡散法と放射性核種を用いた手法を実試料に適用し、ケーススタディを実施する。

（1）元素拡散法に関する検討

元素拡散法は、マグマ蓄積中に結晶中に記録された元素の拡散プロファイルと実験的に求めた元素拡散速度から結晶が高温状態であった時間スケールを推定する手法である。結晶中の元素プロファイルの測定法としては、電子線を固体試料表面に照射し、ミクロンオーダーの局所元素分析を行う電子線マイクロアナライザ（Electron Probe Micro Analyzer：EPMA）を用いる方法がある。そこで、鉱物中の累帯構造（結晶生成過程において不純物等の影響により観察される不連続的な縞状の構造）を高精度・高空間解像度で観察できるカソードルミネッセンス法（Cathodoluminescence：CL法）を使用することとし、北海道大学が所有するEPMAに装着可能なカソードルミネッセンス検出器を導入した。

（2）放射性核種を用いる手法の検討

放射性核種を用いる手法は、結晶中の放射性元素の放射壊変で生成する核種を分析し結晶生成年代値を推定するものである。ここでは、U-Th系列の放射非平衡を利用し、ジルコン等のU含有量が多い結晶中に含まれる、 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 、及び $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ 比を測定し時間スケールを推定する。本研究では、 ^{232}Th に比べて含有量の少ない ^{230}Th 濃度を測定するため四重極マスフィルター（Retarding Potential Quadrupole フィルター：RPQplus フィルター）を北

海道大学が所有・運用しているマルチコレクター型誘導結合プラズマ質量分析装置（MC-ICP-MS）に導入した。

（３）適用性検討

前記の（１）及び（２）の検討結果を基に、マグマ滞留時間スケールの推定における適用条件を明確にするとともに課題を抽出した。

4. 研究実施分担

項目	原子力規制庁	北海道大学	日本原子力研究開発機構
(1) 元素拡散法に関する検討	○	◎	○
(2) 放射非平衡を用いる手法の検討	○	○	◎
(3) 適用性検討	◎	○	○

○：担当、◎：主担当

5. 共同研究参加者

区分	氏名	所属部局・職名（平成 30 年度時点）	本研究における役割
原子力 規制庁	安池由幸	技術基盤グループ地震・津波研究部門 専門職	研究の統括
	廣井良美	同グループ 技術研究調査官	ケーススタディに基づく手法の 適用性検討
北海道 大学	中川光弘	大学院理学院 教授	研究の統括
	栗谷 豪	大学院理学院 准教授	ICP-MS による U-Th 分析手法の 確立
	吉村俊平	大学院理学院 助教	カソードルミネッセンス法の確 立
	松本亜希子	大学院理学院 技術職員	FE-EPMA および ICP-MS の維持・ 管理
日本原 子力研 究開発 機構	武田聖司	安全研究・防災支援部門安全研究セン ター廃棄物安全研究グループリーダー	研究の統括
	三輪一爾	同グループ 研究員	前処理および元素分離手法の検 討、ケーススタディ
	島田亜佐子	同グループ 副主任研究員	

6. 研究実施工程

年 度 項 目	平成 29 年度				平成 30 年度			
	上期		下期		上期		下期	
(1) 元素拡散法に関する検討								
① カソードルミネッセンス検出器導入								
② 分析手法の確立								
③ ケーススタディ								
(2) 放射非平衡を用いる手法の検討								
① RPQplus フィルターの導入								
② 分析手法の確立								
③ ケーススタディ								
(3) 適用性検討								
① 適用範囲の検討								
② 課題抽出								

7. 成果概要

元素拡散法のケーススタディとして、十和田火山のカルデラ形成噴火である噴火エピソード L (約 15,500 年前) の噴出物から石英、直方輝石、単斜輝石、イルメナイト、マグネタイト等の鉱物を分離し、輝石温度計と鉄チタン鉱物温度計によりマグマ蓄積時の温度条件を推定した。その結果、温度は、830～850 °C の範囲であった。次に、石英の CL 法による EPMA 観察を行い累帯構造の有無及び Ti のラインプロファイルを測定した。石英結晶の累帯構造付近の Ti プロファイルから結晶生成年代の分析を行った。Ti の拡散速度は、Cherniak et al. から、 $DTi8301^{\circ}C=6.27 \times 10^{-21} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ 、 $DTi850^{\circ}C=1.40 \times 10^{-20} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ とした。マグマでの滞留の時間スケールは、温度 830 °C の場合は、約 50～100 年、温度 850 °C の場合は、約 20～50 年と見積もられた。なお、得られた温度条件を基に地質圧力計を用いてマグマの圧力条件を推定した。その結果、圧力は 1.5～1.6 kbar 程度 (マグマ溜まりの深度約 5 km に相当) と推定され、従来の研究で得られてきたカルデラ噴火を生じるマグマ溜まりの深度 (約 4～10 km) と整合した。

放射性核種を用いマグマ滞留の時間スケールを推定する手法のケーススタディとして、約 50,000 年前に噴出した大山倉吉軽石 (DKP) から分離したジルコン、輝石、斜長石及び角閃石の $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ 及び $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 同位体比を RPQ フィルター装着の MC-ICP-MS により測定し、結晶生成年代値を推定した。その結果、ジルコンについては、分離した量が少なく $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ 及び $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 同位体比の測定データが得られなかったが、輝石、斜長石及び角閃石については $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ 、 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 同位体比が得られた。これらの同位体比に基づき結晶生成年代を求めた結果、輝石、斜長石及び角閃石の 3 点のデータから得られた年代値は約 27,000 年前と噴出年代より若い値となり、マグマ滞留の時間スケールは得られなかった。

参考値ではあるが、輝石及び角閃石の 2 点では、約 61,000 年前となった。分析データが大きくばらついている主要因は、分析した結晶の U 及び Th が均質でなかったことに起因していると考えられる。

上記の 2 手法についての適用条件としては、元素拡散法は比較的簡便に結晶生成年代を推定することができ、分析対象の結晶や累帯構造を示す場所を選択することで、結晶生成段階から噴火直前の時間スケールまで推定することができる。例えば結晶のリム選択することで、噴火直前のマグマ内で生じた変化からの短い時間スケールを、結晶中心部の累帯構造を選択することで生成段階からの長期的なマグマ滞留の時間スケールを推定することが期待できる。一方、元素拡散速度は温度依存性があり、結晶生成時のマグマの温度条件と、温度変化の有無について仮定することで、結晶中の元素プロファイルの分析精度より、これらの仮定で生じる不確実性が大きくなることから、温度条件とマグマ滞留中の変化を拘束することが課題となる。

放射性核種を用いる手法については、十分なデータが得られなかったためマグマ滞留の時間スケールを推定する手法としての適用条件の明確化はできず、課題抽出には至らなかった。しかし、 ^{238}U 含有量の高い結晶を用い ^{230}Th の質量分析計でのカウント数を稼ぐことが出来れば、結晶年代値を得ることが出来ると考えられる。ただし、U 及び Th が均質な結晶を選別することは難しいため、結晶毎の生成年代を推定するための $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 同位体比の分析が可能なシステムを構築する必要がある。

引用文献

1. Cherniak, D.J., Manchester, J.E., Watson, E., “Zr and Hf diffusion in rutile”, Earth Planet. Sci. Lett., No.261, pp.267-279, 2007.

8. 公表成果一覧

1. 広井良美、安池由幸、「十和田火山八戸噴火のマグマ溜まりの温度圧力条件の推定」、日本火山学会 2019 年秋季大会講演予稿集、p. 42、令和元年