

# 火山岩や岩石薄片の観察活動を基軸とした探究的学習プログラム 開発のための基礎的研究

—火山岩の多様な形成過程に着目して—

山崎 博史・松村 篤\*

(2022年12月5日受理)

Basic Study of the Development of Inquiry-Based Learning Programs Based on Observational Activities of Volcanic Rocks and their Thin Sections: Focusing on the Various Formation Processes of Volcanic Rocks

Hirofumi Yamasaki and Atsushi Matsumura

Abstract: Regarding the causes of igneous rock diversity, the emphasis in both Basic Earth Science and Earth Science of high school sciences is on crystallization differentiation, which does not fully reflect the current knowledge of petrology. This makes it difficult to understand theories of other diagenetic processes closely related to actual volcanoes. In addition, to cultivate the “way of seeing and thinking” in science, it is necessary to use scientific methods of inquiry, such as comparing and relating by utilizing the acquired knowledge. In this study, the Abu Monogenetic Volcanoes, formed by magma mixing, were examined for their usefulness as learning materials. The aim is to develop a learning program to understand the formation process of igneous rocks in an exploratory manner. Consequently, it was confirmed that the results of basic learning activities, such as observation of volcanic rocks and their thin sections, can be discussed in relation to rock formation as in previous studies using Usu Volcanoes. This suggests that developing a learning program using volcanic ejecta, the formation process clarified by petrological studies, helps solve problems related to understanding igneous rock diversity in school education.

Key words : igneous rock, crystallization differentiation, magma mixing, learning material

## はじめに

理科においては、課題の把握（発見）、課題の探究（追究）、課題の解決という探究の過程を通じた学習活動を行い、それぞれの過程において、資質・能力が育成されるよう指導の改善を図ることが必要である（文部科学省，2019）。このうちある事象についての課題を発見するためには、その事象に関する基礎的・基本的な知識を有していることが必要であり、既習事項を基に事象を捉えることにより疑問や課題が見出される。すなわち、探求の過程を通じた学習活動は、既習事項の定着とそれを活用することを前提としている、あるいはそれ

を促進すると考えられる。

科学の基本的な概念の一つである「地球」に関する主要な学習項目の火成岩の成因、マグマの多様性形成について、高等学校地学基礎や地学では、現状、結晶分化作用に重点が置かれている（平岡・岡村，2015）。一方、現代岩石学では火成岩の成因はマグマの起源を含め、多様であることが明らかにされている。例えば、多くの安山岩質マグマは、玄武岩質マグマの結晶分化作用ではなく、玄武岩質マグマと珪長質マグマのマグマ混合によって形成される（高橋，2011）。このため、学校教育において現代岩石学の知見が十分には反映されていない

\* 広島大学大学院人間社会科学科博士課程前期

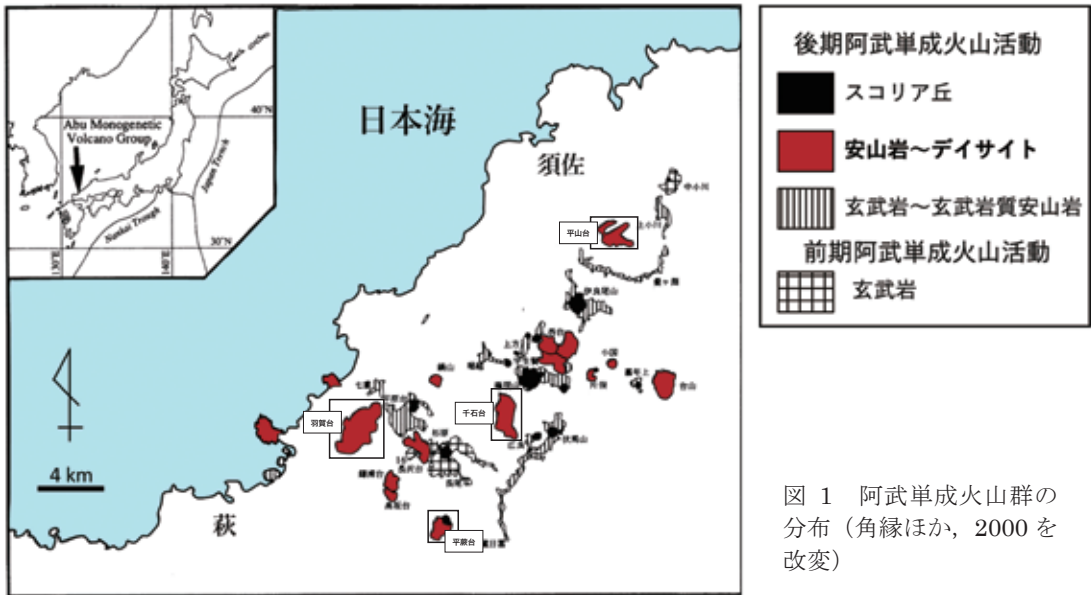


図1 阿武単成火山群の分布（角縁ほか，2000を改変）

いことが課題として指摘されている（平岡・岡村，2015）。一方で，学校教育におけるこのような現状は，結晶分化作用の理解を基礎にして，実際の岩石の観察を通して，その理解とは相容れない事象があることに気づき，その意味を考察するという，探究的な学習活動を展開するための素地を有していると捉えることもできるであろう。

本研究では，火山岩の形成過程（多様化）を題材として取り上げ，阿武単成火山岩群（藤・宇井，1979；Koyaguchi，1986）について，角縁ほか（2000）で示された分布図を基に試料採取を行い，その学習素材としての可能性が検討された。この結果は，観察活動を行い，その結果について既存の知識に新たな情報を加味しながら探究的に考察する学習プログラム開発のための基礎資料となること，また，火成岩多様化の要因に関する学校教育での扱いにおける課題についての示唆を与えることが期待される。

#### 高等学校地学で扱われる火成岩の多様性形成要因

高等学校地学における火成岩多様化の要因に関して，文部科学省（2019）では，マントルが部分熔融して生じたマグマが上昇する過程でマグマが地殻とマントルの境界や地殻内部で停留し，化学組成が変化して玄武岩質マグマや安山岩質マグマがつかれることを取り上げることが考えられ，また，マグマの熱が地殻を熔融して流紋岩質マグマ

が生じること，性質の異なるマグマが混合して，デイサイト質や組成の異なる安山岩質マグマが形成することなど，さまざまな働きによって多様なマグマが生み出されることを取り上げることも考えられる，と解説されている。これらは，高等学校の教科書で扱われる火成岩の多様性の生成説の概要を整理した平岡・岡村（2015）に基づくとして，それぞれ，結晶分化作用，地殻物質の部分熔融あるいは同化作用，マグマ混合に相当すると考えられる。

一方，地学の教科書では，これらの生成説のうち結晶分化作用の解説が主体であり，マグマ混合と同化作用については，結晶分化作用に比べて解説が詳しくなく理解しにくい内容となっていると指摘されている（平岡・岡村，2015）。また，マグマ混合と同化作用について，それらの根拠となる手がかりについて以下のように述べている。

マグマ混合については，不均質なマグマの混合を示す組織や構造，同一岩石中に石英とカンラン石が共存するような非平衡な斑晶組み合わせが手がかりとなる。また，これらの手がかりは，肉眼や薄片観察において比較的その特徴をつかみやすいとも指摘している。同化作用については，マグマが周囲の母岩や外来岩片を取り込んでさまざまな程度に溶かしている様子は，露頭規模や顕微鏡での観察でしばしば見ることができると指摘している。

表 1 マグマ混合の根拠となる岩石の特徴

阿武単成火山群カルクアルカリ安山岩～デイサイトの特徴 (Koyaguchi, 1986)	肉眼や薄片観察で把握可能な特徴 (平岡・岡村, 2015)		本研究で確認できた項目
	不均質なマグマの混合を示す組織や構造	非平衡な斑晶組み合わせ	
① 苦土カンラン石質のカンラン石の存在 (分別結晶作用ではFeに富む)			○
② 不適合な相集合 (石英と苦土カンラン石, An30斜長石とAn60斜長石)		○	○
③ カンラン石斑晶とそれを取り巻く斜方輝石や角閃石の微斑晶	○		○
④ 石英や斜長石の周縁の再吸収または溶解構造	○		
⑤ 苦鉄質斑晶の凝集	○		
⑥ 苦鉄質包有物の存在	○		○
⑦ 単一の溶岩流での斑晶と苦鉄質包有物の不均一な分布	○		

### 阿武単成火山群

山口県萩市・阿武町には第四紀火成活動で形成された小規模な単成火山が複数存在し、阿武単成火山群と呼ばれている (Koyaguchi, 1986; 角縁ほか, 2000, 図 1)。阿武単成火山群は活動時期の異なる個別のマントルダイアピルに由来し、火山活動は前期と後期に区分されている (角縁ほか, 2000)。前期は 2~1.5 Ma のアルカリ玄武岩の活動であり、後期は約 0.8 Ma~数万年前のアルカリ玄武岩と 0.4 Ma 以降のカルクアルカリ安山岩～デイサイトの活動で特徴付けられる。

これらのうち後期阿武単成火山群のカルクアルカリ安山岩～デイサイトは、 $FeO^*/MgO$  vs  $SiO_2$  図において  $SiO_2$  の増加とそれに伴う  $FeO^*/MgO$  比が一定であり、このことは玄武岩からの斑晶 (カンラン石・輝石) の分別結晶作用では説明ができない (Koyaguchi, 1986)。安山岩～デイサイトの成因はアルカリ玄武岩マグマと珪長質マグマの混合と推定され、また、珪長質マグマの成因として下部地殻の溶融が考えられている (Koyaguchi, 1986)。下部地殻溶融の考えについて、角縁ほか (2000) は、アルカリ玄武岩とカルクアルカリ安山岩～デイサイトの活動の時間差との関連の考察も含め、詳細に検討している。

カルクアルカリ安山岩～デイサイトがマグマ混合により生成したと考えられる主な根拠として表 1 に示した事項が指摘されている (Koyaguchi, 1986)。これらの事項には、標本サイズの岩石で認められる特徴 (①~⑥) と岩体全体に渡る検討結果に基づく特徴 (⑦) が含まれる。

### 探究的な学習と火成岩の多様性

地学の学習における探究の過程を通じた活動について、様々な作用を受けてきた結果としての事

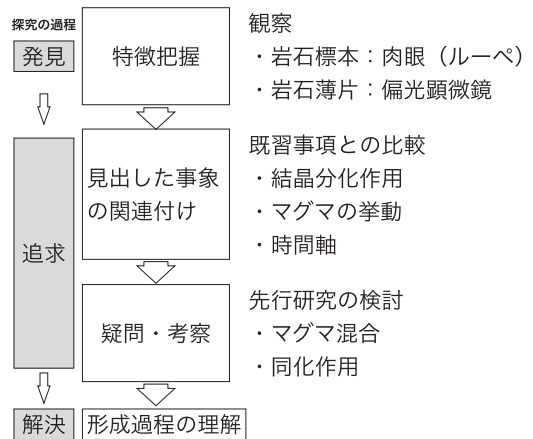


図 2 想定される火成岩の多様化の要因を考察する探究的学習活動

物を観察対象とし、観察により見出した特徴をもとに受けてきた作用を考察するという活動が想定される。例えば、火成岩の形成過程を扱う場合、岩石組織の把握、岩石組織の特徴とマグマの温度変化との関連付け、マグマの温度変化とその要因としてのマグマの動き・地質学的な場の移動との関連付けと段階的に捉え、火成活動に関わる事象を論理的に関連づけて把握するという、通時的な見方に基づく活動である (山崎ほか, 2020; 武永ほか, 2022)。

火成岩の多様性は、起源物質が溶融してマグマとなり、溶融したマグマが固化するといった一連の過程の中で様々な要因が関与することによって形成される (例えば, 小出, 2015)。起源物質としてマントルや下部地殻が想定され、起源物質の溶融条件・溶融様式・溶融の程度の違いにより生じるマグマは多様化する。またマグマの組成は冷却

過程の中で単独で分別結晶作用により変化する（結晶分化作用）とともにマグマ混合や同化作用により多様化する。このような過程の結果として多様な火成岩が生じる。

高等学校地学でこのような火成岩の多様化を扱う場合においても探究的な学習活動を想定することができる（図2）。すなわち、岩石を観察してその特徴を把握し、その特徴が示す事項を時間的・空間的なつながりを意識しながら考察するという学習活動である。なお岩石の特徴把握については岩石の肉眼（ルーペ）観察および岩石薄片の偏光顕微鏡観察が主体となる。岩石学において通常検討される化学組成については、先行研究からの情報として利用することはできるであろうが、学習活動の中で化学分析を行うことは困難と考える。また、見出したいいくつかの特徴を関連付けて考察するとき、基本となる考えと比較・照合することにより活動を容易に進めることが可能と考える。基本となる考えとして、高等学校の教科書で中心的に解説されている結晶分化作用が挙げられる。結晶分化作用の理解を基礎として、観察結果が冷却過程における結晶分化作用による斑晶の組み合わせと整合的か否かを検討する。斑晶組み合わせが整合的でない場合、あるいは斑晶の形態・周縁部の状態が晶出後の液相との反応を示す場合、結晶分化作用のみでは説明できないことへの気づきに繋がるのが期待される。

#### 火成岩多様化に関する学習素材としての 阿武単成火山群

高等学校地学での火成岩の多様化に関する探究的な学習の流れ（図2）における岩石の特徴把握に関連して、阿武単成火山群のうち後期火山活動を特徴付けるカルクアルカリ安山岩～デイサイトに区分される岩石（図1の平山台、千石台、平蕨台、羽賀台に分布）の特徴を検討した。検討内容は、岩石標本の肉眼（ルーペ）観察および岩石薄片の偏光顕微鏡観察により、マグマ混合を示唆する判定項目に従った（表1）。

- ①苦土カンラン石質カンラン石の存在：偏光顕微鏡観察において無色・自形・劈開がないもしくは不明瞭なカンラン石を苦土カンラン石と判定した。平山台に分布する安山岩で確認された。その他、②③（後述）と重なるが、千石台、平蕨台、羽賀台の安山岩で確認された。
- ②不適合な相集合（石英と苦土カンラン石）：非平衡な斑晶組み合わせ（平岡・岡村，2015）に相当

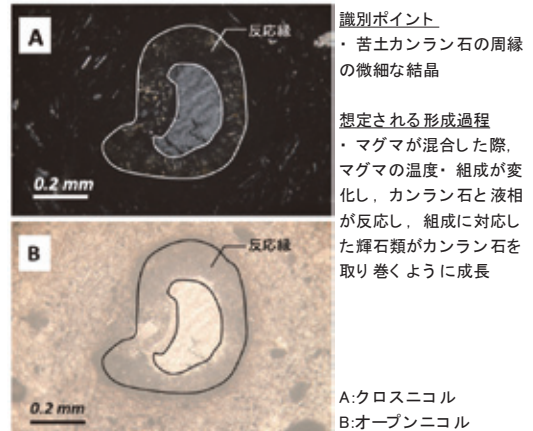


図3 輝石類の反応縁を持つ苦土カンラン石斑晶

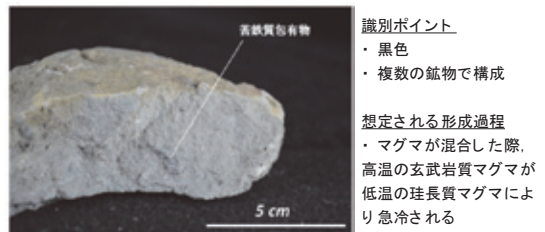


図4 黒鉄質包有物

する。石英は平山台の安山岩では希であるが、千石台、平蕨台、羽賀台の安山岩では普通に、あるいは多量に認められる。苦土カンラン石は全ての場所で確認できた。

- ③カンラン石斑晶とそれを取り巻く斜方輝石や角閃石の微斑晶（図3）：不均質なマグマの混合を示す組織や構造（平岡・岡村，2015）に相当する。千石台、平蕨台、羽賀台の安山岩で確認された。
- ④石英や斜長石の周縁の再吸収または溶解構造：不均質なマグマの混合を示す組織や構造（平岡・岡村，2015）に相当する。本研究では確認できなかった。
- ⑤黒鉄質斑晶の凝集：不均質なマグマの混合を示す組織や構造（平岡・岡村，2015）に相当する。本研究では確認できなかった。
- ⑥黒鉄質包有物の存在（図4）：不均質なマグマの混合を示す組織や構造（平岡・岡村，2015）に相当する。千石台と平蕨台の安山岩で確認された。
- ⑦単一の溶岩流での斑晶と黒鉄質包有物の不均一な分布：不均質なマグマの混合を示す組織や構造（平岡・岡村，2015）に相当する。岩体の広い範囲の検討結果に基づいて判定する基準であり、本



研究では検討できなかった。

マグマ混合について岩石学の専門家により指摘された7つの判定項目(Koyaguchi, 1986)のうち、本研究では過半数の4項目を4つの分布域全てにおいて確認できた(表1)。このとは先行研究の結果を比較的容易に再確認できることを示唆している。また、薄片作製が困難である場合でも本研究で確認できた4項目のうち2項目(②⑥)は岩石の肉眼(ルーペ)観察により確認可能である。以上のことから、阿武単成火山群の安山岩はマグマの多様化を探究的に学習するための素材としてのポテンシャルが高いと考える。

### 火成岩多様化の要因に関する学校教育での扱いにおける課題について

現状、地学の教科書では火成岩多様性生成説のうち結晶分化作用の解説が主体であり、マグマ混合と同化作用については、結晶分化作用に比べて解説が詳しくなく理解しにくい内容となっている(平岡・岡村, 2015)。このことに対して、平岡・岡村(2015)は、有珠火山の岩石試料を例に、学校教育での学習活動内容を考慮した上で、マグマ混合により生じたとする近年の岩石学的検討結果を追認できることを示している。一方、今回、阿武単成火山群についても、マグマ混合由来の岩石の存在が、岩石試料の肉眼(ルーペ)観察により、あるいは薄片観察も含めるとより容易に確認されることが示された。

このように、実際の火山岩を学習素材としてその岩石学的研究成果を追認する活動は、結晶分化作用に偏重した学習を改善することへの示唆を与える。すなわち、多くの安山岩質マグマは、玄武岩質マグマの結晶分化作用ではなく、玄武岩質マグマと珪長質マグマのマグマ混合によって形成される(高橋, 2011)との指摘に基づくと、実際の火山岩の多くは結晶分化作用のみでは理解し得ない特徴を有していることが予想される。従って、岩石学的検討により成因が明らかにされている実際の岩石を肉眼(ルーペ)観察、あるいは岩石薄片の観察を行い、その特徴を既習事項と比較・検討し、結晶分化作用の説明とは相容れない特徴があることに気づくという学習モデル(図2)は、身近にある実際の安山岩を素材としても適応できる可能性がある。今後、この学習モデルの適用の検討や改良により、マグマの多様化についての生

徒の理解の深化に繋げていきたい。

### 引用文献

- 藤 一郎・宇井忠英(1979):阿武単成火山群の地質. 火山, 第2集, 24, 93.
- 平岡瑞恵・岡村 聡(2015): 高校地学で扱われる火成岩とその多様性の説明に関する問題点—北海道有珠火山を題材とした学習プログラム—. 地学教育, 68, 29-39.
- 角縁 進・長尾隆志・長尾敬介(2000):阿武単成火山群のK-Ar年代とマグマ活動史. 岩石鉱物科学, 29, 191-198.
- 小出良幸(2015):火成岩のマグマ生成における化学的に多様性の形成について. 札幌学院大学人文学会紀要, No.98, 1-39.
- Koyaguchi, T. (1986): Textual and compositional evidence for magma mixing and its mechanism, Abu volcano group, Southwestern Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 93, 33-45.
- 文部科学省(2019):高等学校学習指導要領(平成30年告示)解説 理科編 理数編. 実教出版, 東京, 368p.
- 高橋正樹(2011):理科教書における火成岩分類の問題点. サイエンスネット, 40, 10-13.
- 武永有岐子・杉田泰一・山崎博史・松浦拓也(2022):火成活動を通時的に理解するための中学校理科の探究的学習プログラムの開発-単元計画の工夫と生徒実験を活用したW型問題解決モデルの適用-. 地学教育, 74, 75-88.
- 山崎博史・武永有岐子・杉田泰一(2020):大学生や高校生は火成岩の形成を通時的に捉えているか?-火成岩に関する教科書の記述内容と質問紙調査結果の検討-. 地学教育, 72, 93-105.

### 付記

本稿は第一著者(山崎)が指導した第二著者(松村)の卒業研究を基に新たに執筆したものである。萩ジオパークの白井孝明氏には国定公園である萩市笠山での岩石採取許可申請手続きのサポートをしていただいた。現地調査や室内作業において江川宣氏ほかの地学研究室の学生の皆さんにご協力いただいた。なお、本研究の一部はJSPS科研費19K02708, 19K03144, 22K02946, 22H01011の助成を受けた。記して感謝申し上げます。