

令和元年6月20日現在

機関番号：11401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K20921

研究課題名(和文) 灰長石巨晶とその包有物から探る島弧マグマの揮発性成分

研究課題名(英文) Volatile components in island arc magma trapped in anorthite megacrysts

研究代表者

越後 拓也 (Echigo, Takuya)

秋田大学・国際資源学研究所・准教授

研究者番号：30614036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：沈み込み帯深部の未分化なマグマから晶出した灰長石巨晶に捕獲されているメルト包有物に着目し、沈み込み帯深部における揮発性成分の直接的な分析を試みた。EPMAによる定量分析の結果、佐渡島小木半島産灰長石巨晶に見出された苦鉄質メルト包有物中の硫黄はS<sub>03</sub>換算で0.05-0.30 wt%、塩素濃度は0.01-0.12 wt%であった。さらに、Sr同位体組成分析の結果、灰長石巨晶の<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Srは0.70280-0.70340の比較的狭い範囲に収まることが判明した。この結果は、灰長石巨晶が同一起源のマグマから沈み込むスラブ由来の硫黄や塩素などの揮発性成分を取り込みながら晶出したことを示唆する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マグマ中の揮発性成分(水や二酸化炭素、硫化水素、二酸化硫黄、塩素など)はプレートの剛性や噴火現象にとって重要である。しかし、これまでマグマだまり深部における揮発性成分の種類や量を直接分析する方法はなかった。本研究では、マグマだまり深部で成長した灰長石巨晶に着目し、そのメルト包有物を分析することによって深部マグマの揮発性成分量を見積もることに成功した。また、日本海側に位置する佐渡島の灰長石巨晶およびそのメルト包有物を調べることによって、太平洋側から沈み込んだ硫黄や塩素などの揮発性成分が日本海側にまで達していることを初めて明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Mafic melt inclusions in anorthite megacrysts from Japanese island arc were analyzed to examine how much volatile components such as sulfur and chlorine are contained in them. Electron microprobe analysis showed that melt inclusions in anorthite megacrysts from Ogi Peninsula, Niigata contains 0.05-0.30 wt % of S<sub>03</sub> and 0.01-0.12 wt % of Cl. Sr-isotope analysis with MC-LA-ICP-MS revealed that <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr of those anorthite are 0.70280-0.70340 and suggested that they are crystallized from primitive magma without assimilation of crustal components.

研究分野：鉱物学 地球化学 金属鉱床学

キーワード：灰長石巨晶 揮発性成分 島弧マグマ メルト包有物

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

日本列島は複数のプレート境界に位置する弧状列島であり、世界でも有数の地震・火山多発地帯である。日本列島の地下では、海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込んでおり、深く沈み込んだ海洋プレートからは水 (H<sub>2</sub>O)、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>)、塩素 (Cl)、硫黄化合物 (H<sub>2</sub>S や SO<sub>2</sub> など) といった揮発性成分が離脱し、その直上のマントルウェッジに到達する。揮発性成分の抜けた海洋プレートは脆くなり、プレート内地震が起きやすくなる。一方、水やフッ素などの揮発性成分は岩石の融点を著しく下げるため、揮発性成分が付加されたマントルウェッジではマグマ (島弧マグマ) が発生する。このように、沈み込み帯深部における揮発性成分の挙動は地震や火山などの地殻変動に深く関係するため、古くから様々な手法を用いて研究されてきた。しかし、これらの揮発性成分を直接採取したり、地下深部でその場観察することは極めて難しい。そこで、本研究課題では、沈み込み帯深部の未分化なマグマから晶出した Ca-rich 斜長石の巨大斑晶 (灰長石巨晶) に捕獲されているメルト包有物や苦鉄質鉱物に着目し、沈み込み帯深部における揮発性成分の直接的な分析を試みた。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、日本島弧産灰長石巨晶を研究対象として、(a) 揮発性成分を含んだメルト包有物および硫化鉱物の観察と分析、(b) 灰長石巨晶の Sr 同位体組成分析による起源の推定、(c) 灰長石巨晶内部の組織観察による結晶成長機構の考察を行い、沈み込み帯深部で発生するマグマ中の揮発性成分の起源や、それらの揮発性成分がマグマの結晶化に与える影響を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

日本島弧には北海道の倶多楽から鹿児島県の開聞岳まで、数多くの灰長石巨晶の産地がある。これらの中でも太平洋側 (火山フロント側) に位置する八丈島、三宅島、伊豆大島、箱根山に産する灰長石巨晶およびその包有物については多くの先行研究が存在する (e.g., Kimata et al. 1995, Amma-Miyasaka and Nakagawa 2002)。しかし、日本海側 (背弧側) に位置する佐渡島や妙高山に産する灰長石巨晶に関する研究はそれぞれ、山川・茅原 (1968) および 早津 (1974) による記載岩石学的研究にとどまっており、電子線マイクロアナライザ (Electron-Probe-Micro-Analyzer: EPMA) を用いた局所化学分析や詳細な内部組織の観察は行われていない。そこで本研究課題では、日本列島の背弧側に産出する灰長石巨晶に着目し、現地での地質調査およびサンプリング、研磨薄片試料を用いた鉱物組織の観察および EPMA による微小包有物の化学分析を行った。また、斜長石が晶出したマグマの起源や地殻成分の混入の有無を見積もるため、レーザーアブレーションおよびマルチコレクター型プラズマ発光質量分析装置 (MC-LA-ICP-MS) を用いた Sr 同位体組成の分析を行った。

### 4. 研究成果

小木半島産玄武岩に含まれる粒径 1cm 以上の粗粒な斜長石斑晶の化学組成は An 成分が 92-94% の灰長石端成分を含むのに対し、粒径が 100-200 $\mu$ m の長柱状斜長石斑晶は An 成分が 79-84% の亜灰長石に相当し、明確に区別できる。灰長石巨晶の化学組成は中心部から縁辺部に至るまで均質で累帯構造や反応縁はみられない。また、今回調べた灰長石巨晶にはカンラン石包有物は発見されなかったが、直径 1mm 前後の融食形を示す斜長石包有物が多数観察された (Fig. 1)。この斜長石包有物の化学組成がホストである灰長石巨晶と同じ An<sub>92-94</sub> であることから、灰長石巨晶はマグマ溜まり中で融解と析出を繰り返しながら大きく結晶成長した可能性が高い。

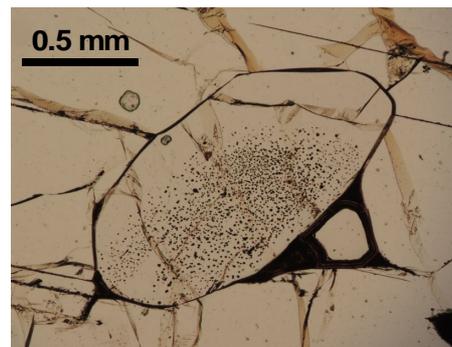


Fig. 1. Rounded anorthite crystal included in anorthite megacryst from Ogi Peninsula, Sado Island, Niigata. This texture suggests that the present anorthite megacryst has grown by repeated resorption-crystallization processes.

他の包有物としては、Fe-Cu-Ni 硫化物および硫黄や塩素などの揮発性成分を含む苦鉄質メルト包有物が観察された。EPMA による定量分析の結果、苦鉄質メルト包有物中の硫黄は SO<sub>3</sub> 換算で 0.05-0.30 wt%、同じく塩素濃度は 0.01-0.12 wt% と判明した (Fig. 2)。特に、塩素濃度に着目すると、島弧玄武岩にみられるメルト包有物の塩素濃度は一般的に 0.05 - 0.2 wt% であり、MORB にみられるメルト包有物の塩素濃度 (< 0.01 wt%) よりも高いことが指摘されており (Wallace 2005)、マグマの生成過程やテクトニックセッティングをより強く反映する指標となる。硫黄や塩素に富む苦鉄質メルト包有物は、太平洋 - オーストラリアプレート境界の背弧海盆であるラウ海盆の海底火山で噴出する玄武岩中のカンラン石斑晶中にも発見されており (Kamenetsky et al. 1997)、これらの揮発性成分は、沈み込むスラブからマントルウェッジに供給されたものと考えられている (e.g., Wallace 2005)。以上の結果は、本研究で調べた灰長石巨晶が、沈み込むスラブから離脱した S や Cl を含む苦鉄質マグマがマグマ溜まりに繰り返し注入したことによるオストワルト熟成 (Ostwald ripening) で成長したことを示唆する。

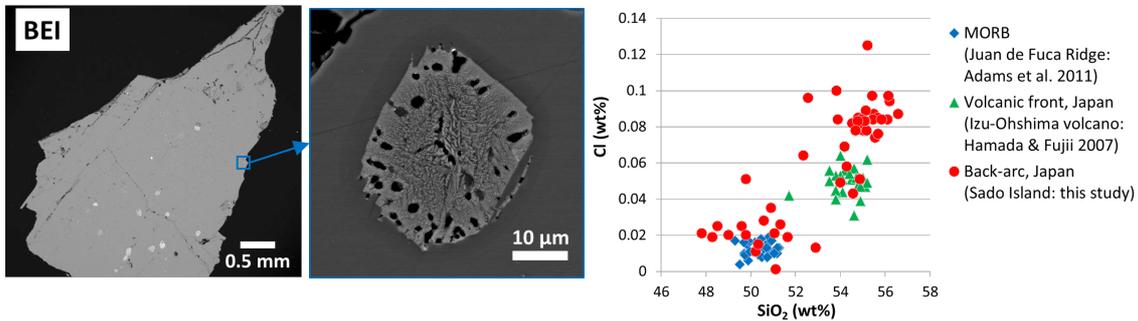


Fig. 2. Occurrence of mafic melt inclusion in anorthite megacryst from Ogi Peninsula Ogi Peninsula, Sado Island, Niigata and SiO<sub>2</sub>-Cl plot for the chemical compositions of those melt inclusions.

南蔵王に位置する不忘山産玄武岩質安山岩に含まれる粒径1cm以上の斜長石斑晶の化学組成はAn 92–94%の灰長石に相当するのに対し、粒径が100–200μmの長柱状斜長石斑晶はAn 56–60%のラブラドライトに相当し、明確に区別できる。灰長石巨晶の化学組成は中心部から縁辺部に至るまで均質性が高いが、最周辺部（幅約100–200μmの領域）では、細かい波動累帯構造がみられ、灰長石巨晶の成長末期では、周囲のマグマ組成が周期的に変化したことを示唆している。この累帯構造について、BSE像における明部と暗部の化学組成を分析した結果、前者がAn 83-86%、後者がAn 75-80%であった。東北日本中南部地域の安山岩質火山噴出物は、高温かつ未分化な苦鉄質マグマと分化の進んだ珪長質マグマの混合によるものが多く（Ban & Yamamoto 2002）、今回観察された波動累帯構造もこうしたマグマ混合が複数回繰り返されたことにより形成された可能性が高い。

東北日本に代表される沈み込み帯の火成活動で、An 成分が 90%を越すような Ca-rich 斜灰長石が結晶するには、5wt%前後の高い含水量を持った玄武岩質マグマが必要と考えられている（Takagi et al. 2005）。さらに、本研究で調べた An 92–94%の灰長石巨晶中心部に磁硫鉄鉱と思われる Fe-Ni 硫化物（Fig. 3）が多数発見されたことから、灰長石巨晶が結晶化したマグマ溜まり深部の未分化な苦鉄質マグマには、H<sub>2</sub>O や S 等の揮発性成分が多く含まれていたと考えられる。

以上の研究成果を踏まえて、沈むこむ海洋プレートから離脱した揮発性成分をより多く含むと考えられる小木半島産灰長石について、MC-LA-ICP-MS を用いた局所的な Sr 同位体組成分析を行い、マグマの起源や地殻成分の混入についての見積もりを行った。分析結果は Fig. 4 に示した通りであり、灰長石巨晶のコア部分からリム部分、および結晶成長中に捕獲されたとと思われる楕円形に融食した灰長石包有物に至るまで Sr 同位体組成に大きな変動はみられず、<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr は 0.70280-0.70340 の比較的狭い範囲に収まることが判明した。この結果は、灰長石巨晶がその核発生から成長を終えるまで、同一起源のマグマから晶出したことを示唆する。また、その低い Sr 同位体組成は堆積岩などの地殻成分の混入が極めて小さいことを示唆し、この灰長石巨晶が純粋に島弧マグマから生成したものであることが明らかになった。

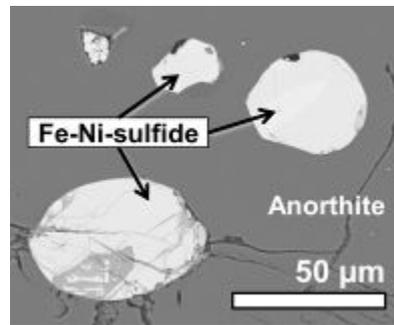


Fig. 3. Backscattered electron image of Fe-Ni-sulfide inclusions in anorthite megacryst from Mt. Fubo, Miyagi.

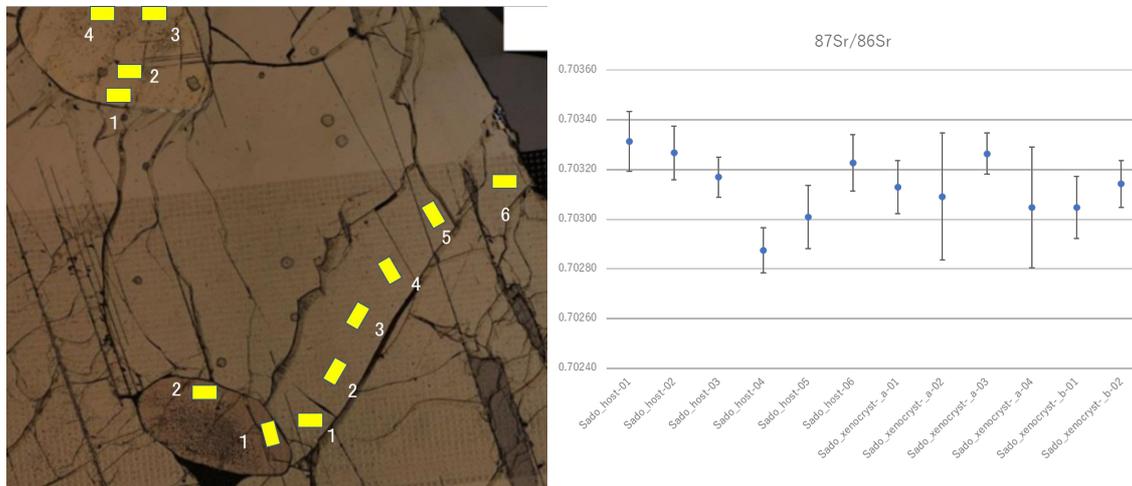


Fig. 4. Analytical points of Sr-isotope ratio by MC-LA-ICP-MS for anorthite megacryst from Ogi Peninsula Ogi Peninsula, Sado Island, Niigata and the result for each analytical points.

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計4件)

- (1) Nergui Sarangua, Yasushi Watanabe, Takuya Echigo and Mihoko Hoshino  
"Chemical Characteristics of Zircon from Khaldzan Burgedei Peralkaline Complex, Western Mongolia"  
Minerals 2019, 9(1), 10, <https://doi.org/10.3390/min9010010> (2018, Dec)
- (2) 越後拓也・齋藤 庸一郎・木股三善・清水雅浩・西田憲正・滝沢茂  
"新潟県阿賀町の流紋岩質溶結凝灰岩に産する球晶の鉱物学的特徴とその形成機構"  
岩石鉱物科学, 47 巻, 69-81 頁 (2018 年 6 月)
- (3) Yasushi Watanabe, Yoshiaki Kon, Takuya Echigo, Atsushi Kamei  
"Differential Fractionation of Rare Earth Elements in Oxidized and Reduced Granitic Rocks:  
Implication for Heavy Rare Earth Enriched Ion Adsorption Mineralization"  
Resource Geology, vol.67, pp. 35-52 (2017, Jan)
- (4) Ayumi Miyasaka, Mitsuyoshi Kimata, Mihoko Hoshino, Takuya Echigo, Masahiro Shimizu,  
Norimasa Nishida  
"Manganese contents in volcanic pyroxenes in island arcs: case study from the South Yatsugatake  
Volcanic area, Japan"  
Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen, Vol. 193(3), p. 311-323 (2016, Aug)

### 〔学会発表〕(計17件)

- (1) Adi Sulaksono, Yasushi Watanabe, Antonio Arribas, Takuya Echigo, Reza A. Furqan, Clyde A. Leys  
"Evolution of the oxidation state of sulfur in the Grasberg porphyry copper-gold deposit, Papua, Indonesia"  
MGEI "Southwest Pacific Resources 2018", (December 2018 in Makassar, Indonesia)
- (2) Sulaksono, A., Watanabe, Y., Echigo, T., Arribas, A.  
"Sulfate reduction promoted by magnetite formation in the Grasberg porphyry Cu-Au deposit, Indonesia"  
資源地質学会第 68 回学術講演会 (東京大学, 2018 年 6 月)
- (3) Simusokwe, M., Echigo, T., Watanabe, Y.  
"Lithology, alteration and mineralization of Target H area, Mumbwa Iron-Oxide Copper-Gold district, Zambia"  
資源地質学会第 68 回学術講演会 (東京大学, 2018 年 6 月)
- (4) 鈴木照洋, 渡辺寧, 越後拓也  
"秋田県北部発盛地域水沢鉱床における黒鉱中の金銀鉱物の産状."  
資源地質学会第 68 回学術講演会 (東京大学, 2018 年 6 月)
- (5) 北村未佳, 渡辺寧, 越後拓也  
"ウォーターバグ白金族鉱床の構成岩石および白金族鉱物"  
資源地質学会第 68 回学術講演会 (東京大学, 2018 年 6 月)
- (6) 金澤季生, 渡辺寧, 越後拓也  
"愛知県豊田市北部地域における瀬戸陶土層の岩相と構成鉱物."  
資源地質学会第 68 回学術講演会 (東京大学, 2018 年 6 月)
- (7) 越後拓也・西間木志野・星野美保子・木股三善・清水雅浩・齋藤静夫・西田憲正  
"灰長石巨晶の包有物から探る島弧マグマの揮発性成分：佐渡島小木半島産灰長石巨晶を例として"  
日本鉱物科学会年会 2017 年年会 (2017 年 9 月 14 日 (木) 愛媛大学)
- (8) 越後拓也 (日本鉱物科学会研究奨励賞第 22 回受賞 受賞講演)  
"有機鉱物の生成機構およびナノ鉱物の表面構造と反応性に関する研究"  
日本鉱物科学会年会 2017 年年会 (2017 年 9 月 12 日 (火) 愛媛大学)
- (9) Sarangua, N., Watanabe, Y., Echigo, T. and Hoshino, M. "Chemical characteristics of zircons from the rare metal deposit in the Khaldzan Burgedei peralkaline complex, western Mongolia"  
SEG2017 Beijing (September 2017 in Beijing, China)
- (10) Sulaksono, A., Echigo, T. and Watanabe, Y.  
"Oxidation state of hydrothermal fluids in the Grasberg porphyry Cu-Au+/-Mo deposit, Indonesia"  
SEG2017 Beijing (September 2017 in Beijing, China)
- (11) Simusokwe, M., Echigo, T., Watanabe, Y.  
"Geology and mineralization of Target H area, Mumbwa IOCG district, Northwest Zambia."  
資源地質学会第 67 回学術講演会 (東京大学, 2017 年 6 月)
- (12) Sulaksono, A., Echigo, T., Watanabe, Y.

- “Anhydrite and Cu mineralization in the Grasberg porphyry Cu-Au+/-Mo deposit, Indonesia”  
資源地質学会第 67 回学術講演会 (東京大学, 2017 年 6 月)
- (13) 越後拓也・西間木志野・木股三善・清水雅浩・斎藤静夫・西田憲正・星野美保子  
“佐渡島小木半島産灰長石巨晶の成長機構：包有物が示唆するオストワルト熟成”  
日本鉱物科学会年会 2016 年年会 (2016 年 9 月 25 日 (日) 金沢大学)
- (14) Takuya Echigo, Shino Nishimaki, Mitsuyoshi Kimata, Masahiro Shimizu, Shizuo Saito, Norimasa Nishida, Mihoko Hoshino  
“Mineral and melt inclusions in anorthite megacrysts in Japanese island arc: clues to the magma reservoir processes”  
The 26th Goldschmidt Conference (July 1st, Fri, 2016 in Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan)
- (15) Sarangua, N., Watanabe, Y., Echigo, T.  
“Rare metal mineralization of the Khaldzan Burgedei peralkaline complex, western Mongolia”  
Rare Earths 2016 in Sapporo (June 2016 in Sapporo, Japan)
- (16) 佐藤颯哉, 渡辺寧, 越後拓也  
“チリ共和国エルサルパドル斑岩銅鉱床における石英脈形成と金属鉱化作用”  
資源地質学会第 66 回学術講演会 (東京大学, 2016 年 6 月)
- (17) 越後拓也・斎藤 庸一郎・木股三善・清水雅浩・西田憲正・滝沢茂  
“溶結凝灰岩における球晶の形成機構：揮発性成分が誘発する脱ガラス化作用”  
日本地球惑星科学連合 2016 年大会 (2016 年 5 月 26 日 (木) 幕張メッセ)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ <https://sites.google.com/site/takechigo/home>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※ 科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。