

南部カムチャツカ弧,アバチャ火山のかんらん岩捕獲  
岩から推察される火山フロント下マントルの溶融プ  
ロセスと交代作用

|       |                                                                                             |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| メタデータ | 言語: jpn<br>出版者:<br>公開日: 2017-10-05<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者:<br>メールアドレス:<br>所属: |
| URL   | <a href="http://hdl.handle.net/2297/26727">http://hdl.handle.net/2297/26727</a>             |

|             |                                                                                                                                                                                         |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏名          | 石丸 聡子                                                                                                                                                                                   |
| 学位の種類       | 博士(理学)                                                                                                                                                                                  |
| 学位記番号       | 博甲第889号                                                                                                                                                                                 |
| 学位授与の日付     | 平成19年3月22日                                                                                                                                                                              |
| 学位授与の要件     | 課程博士(学位規則第4条第1項)                                                                                                                                                                        |
| 学位授与の題目     | Melting and metasomatism beneath a frontal arc inferred from peridotite xenoliths from Avacha volcano, southern Kamchatka<br>(南部カムチャツカ弧, アバチャ火山のかんらん岩捕獲岩から推察される火山フロント下マンツルの溶融プロセスと交代作用) |
| 論文審査委員(主査)  | 荒井 章司(自然科学研究科・教授)                                                                                                                                                                       |
| 論文審査委員(副主査) | 石渡 明(自然科学研究科・教授), 木原 國昭(自然科学研究科・教授),<br>奥野 正幸(自然科学研究科・教授), 長谷部 徳子(自然科学研究科・助教授)                                                                                                          |

## Abstract

The peridotite xenolith suite from the Avacha volcano, Kamchatka, derived from the mantle beneath the volcanic front of the Kamchatka arc, mainly comprises highly depleted clinopyroxene-poor harzburgites with highly forsteritic olivine (Fo<sub>90-92</sub>) and high-Cr# spinel (0.5-0.7). The Avacha peridotites have experienced metasomatism to various extents, with the formation of metasomatic orthopyroxene replacing primary olivine, by infiltration of SiO<sub>2</sub>-rich agent (Arai *et al.* 2003). The metasomatic orthopyroxenes can be subdivided into two textural types, radially aggregated prismatic grains (opx II-1) and stout grains associated with interstitial glass and metasomatic minerals (opx II-2). Geochemical features of the Avacha peridotites indicate that they have been initially produced by high-degree partial melting assisted by FeO\*- and H<sub>2</sub>O-rich influx, and have been metasomatized by SiO<sub>2</sub>-rich aqueous fluid (opx II-1 formation) and felsic melt (opx II-2 formation). This kind of metasomatism by SiO<sub>2</sub>-rich agents is characteristically observed in peridotite xenoliths from the arc setting. We found tremolite-bearing peridotite xenoliths from Avacha volcano, which have been only rarely documented (e.g. Papua New Guinea and Colorado Plateau). They are possibly fragments of the mantle wedge lithosphere just beneath the frontal arc, and provide us with its particular physical-chemical conditions; low temperature and depletion in magmatic component.

## 1. はじめに

マンツルは地球の約7割を占めるが、その中でもリソスフェリックマンツルは、多くの玄武岩質マグマが生産された場であり、マグマ生成プロセスを考える上でも非常に重要な情報を有している。海嶺や大陸リフト帯などのプレート拡散境界で生成されるマグマのほとんどが苦鉄質であるのに対し、島弧地域などのプレート収束境界で生成されるマグマは苦鉄質から珪長質まで変化に富む組成を持つ。マンツル物質の岩石学的・化学的な性質の研究は、その化学・温度・圧力条件などの様々な情報をもたらし、そこで生成される主要なマグマの成因について制約を与えることが期待される。上部マンツルは主にかんらん石から構成されるかんらん岩からなっているが、そのマンツルかんらん岩は、地上もしくは海洋底にのし上げて露出している貫入岩体、または火成岩中に取り込まれた礫(捕獲岩)として手にすることが出来る。貫入岩体は、捕獲岩として得られるものに比べて低温での変質作用や変成作用を受けているため、初生的な性質を復元することがしばしば困難であり、従って、生成条件が不明

であることが多い。それに比べ、捕獲岩は規模が小さく、得られる試料間の関係も不明であるものの、地殻での改変が極めて軽微であり、あるマントルの情報(岩石学的・化学的性質)の直積的指示者として捕獲岩は非常に有用であるといえる。

一般に、中央海嶺玄武岩(MORB)に比べて島弧地域の玄武岩には、主要なマグマ成分に乏しいものがあることが知られているが(例えば、Dick & Bullen, 1984; Arai, 1994)、それに対応するマントル物質であるかんらん岩捕獲岩は、他地域(海洋島地域や大陸リフト帯など)に比べて、島弧域での報告は多くない(Nixon, 1987 参照)。南部カムチャツカ弧の火山フロント上に位置するアバチャ火山は約1万年前に活動を始めた成層火山であり、その噴出物は活動を通じてカルクアルカリ的な性質を持つことが知られているが(例えば、Braitseva *et al.*, 1998)、同時に、多量のかんらん岩捕獲岩を含むことが報告されている(例えば、Shcheka, 1976; Arai *et al.*, 2003)。アバチャ火山のかんらん岩捕獲岩は、島弧マントルの研究に最適である。特に、火山フロント下のマントルの物質的情報は限られており、重要である。アバチャ火山のかんらん岩捕獲岩は、様々な程度にSiO<sub>2</sub>に富むメルトもしくはフルイドによって交代作用を受けていることが明らかになっている(Arai *et al.*, 2003)。

本研究では、そのアバチャ火山のかんらん岩捕獲岩について詳細な化学分析を行い、第一にアバチャ火山のかんらん岩捕獲岩に見られる基本的化学的性質が、どのようにして獲得されたかを検討する。第二に、SiO<sub>2</sub>に富む物質による交代作用において形成された、かんらん石を置換して形成されている二次的な斜方輝石は、その形状と鉱物化学組成から2種類に分けられるが、それらの交代作用に関与した物質やその起源について検討する。また、二次的な斜方輝石にはしばしば非常に珪長質なガラスが伴っている(石丸・荒井, 2005)。そのようなガラスは、様々な地域のかんらん岩捕獲岩中からも報告されており、二次的な鉱物の形成に非常に密接に関わっていると考えられ、交代作用に関与した物質の起源を考える上でも非常に重要である。

## 2. 岩石記載

アバチャ火山のかんらん岩捕獲岩は、単斜輝石をあまり含まない(<2 vol.%)スピネルハルツパーナイトが主である。かんらん岩捕獲岩は、時々、単斜輝石を含むホルンブレンダイトによってその一部もしくは全体が覆われており、ホルンブレンダイトの脈がかんらん岩捕獲岩の構造を切って脈状に存在している場合もある。かんらん岩捕獲岩と母マグマとの境界部は明瞭であり、反応組織は見られない。

かんらん岩捕獲岩の多くは粗粒な結晶からなる(>1 mm)プロトグラニューラー組織を示すが、一部、フィリピン、イラヤ火山に特徴的に見られるような極細粒の結晶からなるかんらん岩捕獲岩(例えば、Arai *et al.*, 1996, 2004)も見られる(ここでは詳細に議論しない)。主要構成鉱物にはしばしばキンクバンドが見られ、初生的な斜方輝石や単斜輝石にはそれぞれ離溶ラメラが時々存在するのが観察される。かんらん石を置換する二次的な斜方輝石は、複雑な形状を示すもの(opx II-1)と、半自形でその粒間を埋めるように存在する角閃石や単斜輝石もしくは、非常に珪長質なガラスを伴っているもの(opx II-2)に区別することが出来る。珪長質ガラスは、必ずしも二次的な斜方輝石に伴って居るわけではなく、かんらん石の結晶粒界にフィルム状に産したり、初生的なクロムスピネル中などに包有物として存在しているものも確認される。

### 3. 全岩化学組成

主要元素組成と微量元素組成は、それぞれ蛍光 X 線回折装置と ICP-MS 用いて測定を行った。アバチャ火山のかんらん岩捕獲岩はマグマ成分に枯渇しており、その希土類元素パターンは軽希土類 (LREE) から重希土類 (HREE) にかけてゆるやかに増加するか、もしくはほぼフラットである。その主要・微量元素濃度は、かんらん岩のかんらん石や単斜輝石のモードと相関がなく、また、二次的な斜方輝石のモードとも明瞭な相関は見られない。

### 4. 鉱物化学組成

主要元素組成と微量元素組成は、それぞれ EPMA と誘導結合プラズマ質量分析計 LA-ICP-MS を用いて測定を行った。

かんらん岩中のかんらん石やクロムスピネルはそれぞれ高い Fo 値 (= 90-92), Cr# [= Cr/(Cr + Al) 原子比] (= 0.5-0.7) を示し、海洋底かんらん岩に比べてマグマ成分に枯渇した性質を示す (Fig. 1)。しかし、クロムスピネルの Cr# が上昇してもかんらん石の Fo 値がそれほど上がらないなど、通常の融け残りかんらん岩とは異なるトレンドを示す (Fig. 1)。二次的な斜方輝石の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含有量や Mg# [= Mg/(Mg + Fe) 原子比] は、初生的な斜方輝石 (opx I) と差がないが、opx II-1 は、opx I や opx II-2 に比べて一般的に、低い Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> や CaO 含有量を示し、それぞれ区別することが出来る。珪長質ガラスは、クロムスピネル中の包有物として観察されるものとそれ以外で組成が異なる。クロムスピネル中に観察されるものは粒間充填的に存在するものに比べて揮発性成分を多く含み、また、SiO<sub>2</sub> や Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に富み FeO\* (全鉄), MgO, CaO 含有量が低い傾向にある。

単斜輝石や斜方輝石、角閃石の希土類元素パターンは、それぞれ LREE に枯渇した左下がりのパターンを示す。opx II-1 は、HREE のみがかわずかに検出される程度であるが、opx II-2 は opx II-1 に比べて中希土類元素 (MREE) に富み、高い希土類元素濃度を持つ。また、大規模な斜方輝石脈を構成している斜方輝石は LREE に非常に富み、また、それと共存する単斜輝石や角閃石も LREE に富む。珪長質ガラスは、軽希土類に富んだ右下がりのパターンを示すが、その傾きは他地域に報告されているようなガラスのパターンと比べて緩やかである。始原マントルで規格化した単斜輝石と斜方輝石の希土類元素濃度と、かんらん岩主要構成鉱物のかんらん石の Fo 値とクロムスピネルの Cr# の関係を見ると、高い Cr# を持つスピネルと共存する単斜輝石が LREE にエンリッチし HREE に枯渇していることが分かった。また、高い Cr# を持つクロムスピネルと共存する斜方輝石は HREE に枯渇するが、その HREE に枯渇した斜方輝石は低い Fo 値のかんらん石と共存することが分かった。

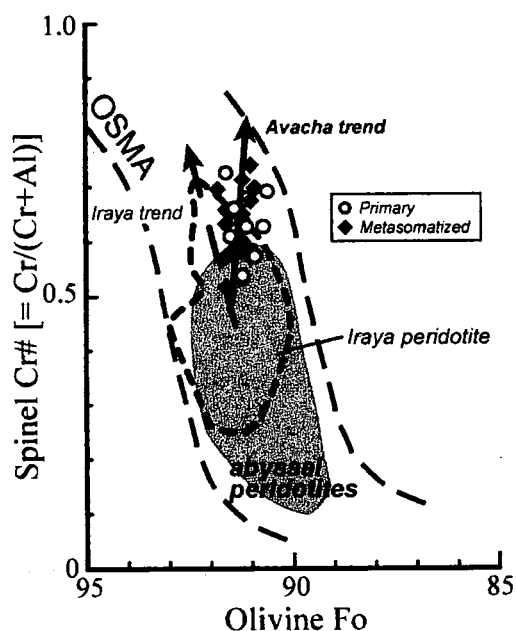


Figure 1. Relationships between the Fo contents of olivine and Cr# of chromian spinel in Avacha peridotite xenoliths. OSMA, olivine-spinel-mantle array, represents the residual trend of spinel peridotites (Arai, 1994b). Shaded area represents abyssal peridotites (Arai, 1994b). Thick broken line encircles the compositional range of coarse-grained peridotites from Iraya volcano, the Luzon Arc, Philippines (Arai & Kida, 2000). The residual trend for the Iraya peridotites (broken line with arrow head) is different from that for the Avacha peridotites (solid line with arrow head).

## 5. 結晶粒界における元素の濃集

一般的に、単斜輝石を多く含むレールゾライトなどの全岩微量元素特性は、それらの元素が濃集しやすい単斜輝石によって決定される (Salters & Shimizu, 1988)。しかし、単斜輝石に乏しいアバチャ火山のかんらん岩捕獲岩は、インコンパティブルな全岩微量元素濃度が低い、それらの濃度は単斜輝石によって支配されないことが分かった。そこで、主要鉱物以外の相について、その微量元素濃度を LA-ICP-MS を用いて直接的に決定した。かんらん石の結晶粒界は、周囲のかんらん石に比べて Sr や K などの LILE 元素や LREE が濃集していることが確かめられ、Suzuki (1987) や、Hiraga *et al.* (2002, 2003, 2004) らの、結晶粒界に LILE 元素が濃集するという結果と一致した。

## 6. 議論・結論

### 部分熔融

かんらん岩中のかんらん石の Fo 値やクロムスピネルの Cr# と同様に、単斜輝石や斜方輝石の HREE は部分熔融程度の指標となるが、アバチャ火山のかんらん岩捕獲岩は、高い Cr# を持つクロムスピネル、高い LREE と低い HREE 濃度の単斜輝石、低い HREE 濃度の斜方輝石と、比較的低い Fo 値のかんらん石を含むが、これらの特徴は低いかんらん石の Fo 値を除き、アバチャ火山のかんらん岩捕獲岩が高い部分熔融の融け残り岩であることを示す。しかし、クロムスピネルの Cr# と単斜輝石の LREE と HREE がそれぞれ正の相関と負の相関を示すことと、斜方輝石の HREE とかんらん石の Fo 値が正の相関を示すことから、アバチャ火山のかんらん岩捕獲岩は、LREE と FeO\* に富むフルイドの浸入によって促進された部分熔融によって形成されたと考えることが出来る。

### 交代作用

アバチャ火山のかんらん岩捕獲岩には、様々な度合いにかんらん石を置換する斜方輝石が存在することから、その形成には SiO<sub>2</sub> に過飽和な物質の関与が考えられる。二次的な斜方輝石の化学的性質や組織から、それぞれの形成に関与した物質は異なっていると推測することが出来る。opx II-1 は、その複雑な形状や、低い MREE-HREE 濃度などから、SiO<sub>2</sub> を含む H<sub>2</sub>O を主体としたようなフルイドと、かんらん石との反応によって形成されたと考えられる。H<sub>2</sub>O は SiO<sub>2</sub> を主体とするようなメルトに比べて粘性が低く浸透性が高く、また、SiO<sub>2</sub> を相当量含むことが出来 (例えば、Nakamura & Kushiro, 1974; Mysen, 2002, Mysen & Wheeler, 2000; Mysen & Armstrong, 2002; Mysen & Shang, 2003), HREE に著しく乏しい (例えば、Bizimis *et al.*, 2000) ため、opx II-1 の形成に関与した物質として適当である。

opx II-2 は、opx II-1 に比べて MREE に富むことや CaO などが高いこと、また、単斜輝石や角閃石を伴っていることから、opx II-1 に比べてマグマ成分に富んだフルイドもしくは、SiO<sub>2</sub> に富むメルトの関与によって形成されたと考えられる。opx II-2 に伴う珪長質ガラスの微量元素パターンは、かんらん岩を捕獲して地表にもたらしたアバチャ火山の噴出物と非常に類似している。しかし、かんらん岩捕獲岩と母岩との境界部には反応組織は認められないことと、ホルンブレンダイト (捕獲岩を含む火山岩に先行したマグマからの直接の沈積、もしくはかんらん岩とその先行したマグマとの反応によって形成された) 中の鉱物と、opx II-2 に伴う単斜輝石や角閃石の微量元素パターンは一致しない。そのため、opx II-2 はかんらん岩が捕獲岩としてマグマに取り込まれた後に、そのマグマとの反応によって形成された可能性は否定出来る。おそらく、opx II-2 は含水条件下でかんらん岩の部分融解によって生成されるような

SiO<sub>2</sub>に過飽和なメルト(例えば, Hirose, 1997)と, それと平衡にないかんらん岩(例えば上部)との反応によって形成されたと考えることが出来る。これは, 他の島弧地域で報告されている交代作用と類似しており, また, それによって形成された二次的な斜方輝石やそれに伴う珪長質ガラスの成因とも矛盾しない。

従って, 島弧下マントルは, 沈み込むスラブ由来の物質(スラブそのものの部分融解メルトや, 堆積物メルト, スラブの脱水によって放出されたH<sub>2</sub>Oなど)によって様々な度合いに交代作用を受け, 斜方輝石に富むようになっていると考えられる。このことは, Nakamura & Kushiro (1974) で予想されており, Kelemen *et al.* (1992, 1998)などで議論されている。

#### トレモライトの存在

交代作用を受けたアバチャ火山のかんらん岩捕獲岩の一部には, トレモライトを含むものがあるが, 高温( $\geq 1000$  °C)のマントル中ではトレモライトは不安定である。トレモライトを含むアバチャ火山のかんらん岩捕獲岩中は, しばしば高い単斜輝石のモードを示し, また, 高いMg#のかんらん石, 斜方輝石, 単斜輝石, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に富むスピネル(Cr# = 0-0.2)と共存している。このことは, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>やCaO, SiO<sub>2</sub>に富む物質による交代作用を示唆している。アルミスピネルの存在は, トレモライトが存在することと矛盾するが, トレモライトが交代作用後に後退的に温度が低下することで形成されたとすれば説明出来る。トレモライトを含むかんらん岩捕獲岩の存在は非常に稀であるが, パプアニューギニアのリヒール火山(交代作用を受けたかんらん岩捕獲岩; Franz *et al.*, 2002)やコロラド高原(捕獲結晶; Smith, 1979)からの報告があるのみである。これらはいずれも低温のマントル物質であることを示し, 島弧下マントル, 特に火山フロント直下マントルは豊富なH<sub>2</sub>Oなどによって交代作用を受けており, 低温であることを示している。

## 学位論文審査結果の要旨

石丸聡子さんの提出論文および、平成19年2月6日の口頭発表の結果をもとに審査委員会を開催し、以下の結論を得た。石丸さんは、カムチャツカ火山弧のアバチャ火山において得られるかんらん岩捕獲岩を岩石学・地球化学的に詳細に検討し、以下のような重様な知見を得た。(1) かんらん岩は、枯渇度が高いハルツバーナイトであり、フラックスの流入に伴う部分熔融の溶け残り岩である。(2) かんらん石が斜方輝石に置換されるような交代作用を受けているが、斜方輝石の形状と組成により、交代作用を二種類に分けることが可能である。一つはシリシク・メルト (アダカイト的性質)、他はシリカを含む流体 (水に富む) によるものであろう。(3) かんらん石の粒界をLa-ICP-MSにより直接分析することにより、粒界成分がLILEやLREEに富むことがわかった。これは上記(2)とは異なるクリプティックな交代作用による。本研究は、今まで詳細な地球化学的性質が不明だった高枯渇度のマントルかんらん岩の成因を明らかにしたものである。さらに、活動的な島弧のフロント部分の上部マントルの熔融作用および交代作用をマントル物質から直接的に解明することに成功した。本研究の成果の、マントル岩石学への貢献は極めて大きいと判断される。よって、本審査委員会は全会一致で、本論文が石丸聡子さんに博士(理学)の学位を与えるのにふさわしいものと判断する。