

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540518

研究課題名(和文) マントルウェッジでの流体交代作用と遷移元素濃集過程

研究課題名(英文) Metasomatism and transitional-elements concentration process by fluids in the mantle wedge

研究代表者

石丸 聡子 (Ishimaru, Satoko)

熊本大学・自然科学研究科・助教

研究者番号：60464046

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：マントルウェッジに由来するかんらん岩やそのアナログ物質と考えられるオフィオライト底部のかんらん岩を採取し、沈み込むスラブから放出される流体の性質と、それによる元素の移動を伴う交代作用について検討をおこなった。火山フロント下の最上部マントルでは普遍的にH<sub>2</sub>O流体が観察され、マントルの改変作用に重要な役割を果たしていることが分かった。また、遷移元素やLIL元素をより溶解する高NaCl濃度の存在を確認した。島弧環境で形成されたオフィオライトや、メタモルフィックソール直上のオフィオライト底部かんらん岩でも、塩素イオンや炭酸イオンを含む水流体による交代作用を確認した。

研究成果の概要(英文)：We examined two mantle-derived peridotites to clarify modification processes by melts or slab-derived fluids: the one is sub-arc mantle xenoliths from the volcanic front and the other is solid intrusive peridotite blocks or basal peridotites of ophiolite above their metamorphic sole. All peridotite xenoliths, we examined, contain H<sub>2</sub>O fluid inclusions with or without CO<sub>2</sub>, and the presence of H<sub>2</sub>O fluids is quite normal beneath the sub frontal arc mantle although there have been quite rare from other mantle xenoliths even from arc setting. Some H<sub>2</sub>O fluid contain high (up to 17 wt%) amount of NaCl eq. content. Such high-NaCl aqueous fluid is quite important for metasomatism due to high solubility of LIL and transitional elements in it.

We also found fluid-related metasomatism in ophiolite, formed at arc setting. The H<sub>2</sub>O fluid was enriched in Si and Al, and transport Cr with some anions. Chlorine ion and/or other anions are quite important for the transportation of transitional metals.

研究分野：マントル岩石学

キーワード：マントルウェッジ 交代作用 地球化学 岩石学

### 1. 研究開始当初の背景

捕獲岩は深部から浅部まで急速に運搬されるため、低温での変質・改変の程度が極めて低く、深部で安定であった時の性質をほぼそのまま保持している。また、捕獲岩を地表にもたらずマグマは比較的年代の新しいものが多く、既知の地質学的背景を反映するマントル物質として、捕獲岩類はほかのマントル起源物質より圧倒的に優れており、固体貫入岩やオフィオライトとともに地球深部物質に関する直接的情報源として極めて重要である。マントル捕獲岩は、大陸リフト帯やクラトン、海洋ホットスポットでは、比較的多く産出しており、これら地域のマントルの物質学的情報は比較的得られやすい(例えば、Nixon, 1987, Mantle Xenoliths)。一方で、地温こう配の高い島弧地域では極めて限られており(例えば、Nixon, 1987)、それら地域から得られた情報が一般性を持つか否かという点においては、特別の評価が必要である。さらに、最も火山活動が盛んな火山フロントにおいて原理的にこの窓は開きにくく(詳細な記載岩石学的研究はこれまで3地点からのみ;例えば、Arai et al., 2003, Is. Arc, 2004, J. Petrol.; McInnes & Cameron, 1994)、実証的マントル物質学は成立しにくいという背景があった。

応募者らは、火山フロント下マントルに由来するマントル捕獲岩について、岩石学的・地球化学的な記載をこれまで集中的におこない、これまで他地域では未検知であったマントル過程を見出した。この現象が島弧マントルで一般性を持つのか否かの検証は、マントルウェッジにおける物質移動を考える上で非常に重要であるが、適切な試料の入手困難さから容易ではなかった。

### 2. 研究の目的

マントルウェッジにおける流体や珪酸塩メルトによる元素移動過程、特に白金族元素を含む遷移元素の移動(除去・濃集)過程の解明を目的とする。遷移元素の移動過程には硫黄の存在度が非常に大きな影響をもつと考えられるため、マントルウェッジ条件下での硫黄の挙動と珪酸塩メルトへの溶解度について再検討をおこなう。

そのために、複数の島弧マントル由来のかんらん岩捕獲岩をもちいて流体や珪酸塩メルトによる交代作用を詳細に検討する。また、捕獲岩から得られるマントルウェッジ最上部の情報に加えて、マントルウェッジのスラブ直上マントルのアナログ物質といえる変成岩に伴うかんらん岩固体貫入岩をもちいて、初生スラブ流体の化学的・物質的性質を捉え、マントルウェッジ全体での遷移元素の濃集過程について検討する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 試料の入手

マントルウェッジ上部の試料としては、こ

れまで応募者らがおこなってきた研究にもちいてきた、カムチャツカ弧の火山フロント下マントルに由来するかんらん岩捕獲岩に加えて、ルソン-台湾弧の火山フロントに位置するイラヤ火山のものを現地調査により採取し、研究にもちいた。

また、初生スラブ流体の性質を捉えるために、オマーンオフィオライト底部の蛇紋岩化したかんらん岩や、島弧環境下で形成されたと考えられているトルコのメルシンオフィオライト、極域ウラルに露出するライズ・オフィオライトの変成かんらん岩などにおいて現地調査をおこない、試料を採取した。

#### (2) 試料の処理と機器分析

本研究の目的を達成するため、既存の試料に加え、新たに採取した試料に関して岩石薄片を作成し、偏光顕微鏡などを用いて岩石学的記載や流体包有物の基本的性質の解析をおこなった。特に、以下の分析機器を主に用いて研究を進めた。

- 電子線マイクロアナライザー (EPMA)
- レーザーアブレーションシステムを装備した ICP-MS (LA-ICP-MS) (金沢大学理工学域自然システム学系に設置)
- 顕微ラマン分光装置 (京都大学自然科学研究科、金沢大学理工学域自然システム学系、熊本大学理学部に設置)
- 加熱冷却ステージ (京都大学自然科学研究科および熊本大学理学部に設置)

### 4. 研究成果

マントルウェッジ上部での流体による交代作用を検討するために、カムチャツカ弧の火山フロントに位置する3つの火山(アバチャ火山、ベズミヤニ火山、シベルツチ火山)、および、ルソン-台湾弧の火山フロントに位置するイラヤ火山に産するマントルかんらん岩を採取し解析をおこなった。

その結果、メルト成分に枯渇したハルツバーナイトおよび、シリカに富むメルトによって改変を受けた交代岩が採取され、火山フロント下の溶け残りのマントルかんらん岩では記載岩石学的・地球化学的性質が共通していることがわかった。また、流体包有物に着目すると、全ての産地のかんらん岩の構成鉱物中に、 $H_2O$  流体が確認された。

カムチャツカ弧のマントルかんらん岩では、その流体包有物相は、南部では $H_2O$  が主体であるのに対し、中部ではかなりの $CO_2$  流体包有物も確認された。中部に産するかんらん岩捕獲岩中には、マントル中でのメルトや流体との交代作用によって形成されたと考えられる多量の金雲母(および角閃石)が存在しており、カムチャツカ弧の最上部マントルでは $H_2O$  流体による交代作用が大規模に起きていることが確認された。また、 $CO_2$  流体の存在度が中部では高いことは、スラブからマントルへ浸入した流体の組成が異なることを示唆し、これはかんらん岩中の斜方輝石の微量元素組成からも確認された。ルソン-台

湾弧に位置するイラヤ火山のかんらん岩捕獲岩中の包有物では、多量のメルト包有物に加えて、少量ではあるが H<sub>2</sub>O と CO<sub>2</sub> 流体が確認された。塩濃度 (NaCl 含有量) の高い H<sub>2</sub>O 流体は、金属元素や LIL 元素をより溶解しやすい性質を持つため、元素運搬に重要な役割を果たすと考えられている。かんらん岩中に記録された交代作用の程度と、それに関与した流体の性質の関係を検討するため、それぞれの H<sub>2</sub>O 流体包有物について、加熱冷却ステージをもちいて NaCl 濃度を測定した。アバチャ火山のかんらん岩では非常に高い塩濃度 (最大 17wt%) を示すものが存在し、交代作用の低いかんらん岩では塩濃度が高く、交代作用の高いかんらん岩では塩濃度が低い傾向が見られた。これは、あらかじめ予想していた結果とは全く逆の傾向である。この結果については、全岩および流体包有物の微量元素組成を更に検討して考察を奨める必要がある。イラヤ火山の捕獲岩中の流体包有物は、ピナツボ火山で報告されているもの (Kawamoto et al., PNAS) と同等かやや低い塩濃度を示した。岩石学的特徴と塩濃度との関係については、まだ詳細に葉奨められていないため、今後の課題である。

マントルウェッジ下部において、スラブから供給される初生流体の性質を検討するために、オフィオライト底部のかんらん岩などをもちいて研究をおこなった。オマーンオフィオライト底部のかんらん岩には、比較的高温で形成されると考えられる角閃石が形成され、水流体によって運搬されやすい元素の濃集が認められた。また、極域ウラル地域のライズ・オフィオライト中に存在するルビーを含む優白色脈の成因について検討した。この優白色脈中には高 Cr 含有量のクロムスピネルが多量に存在していることから、脈の形成には塩素イオンや炭酸イオンを含む H<sub>2</sub>O 流体が関与したと結論づけた。

マントルウェッジ全体像を捉えるまでにはまだ至っていないが、火山フロント直下マントルにおける様々な流体交代作用の検知と、それに関与した流体の性質を確認することができた。また、初生スラブ由来流体による交代作用を検知することで、マントルウェッジの下部から上部までの流体の移動とそれに伴う元素の運搬作用について、包括的な理解をするためのデータを揃えることができた。今後は、これらを用いて、マントルウェッジでのスラブ由来流体による一連の現象の理解を深める。

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

1. Ishimaru, S., Arai, S., Miura, M., Shmelev, V.R. and Pushkarev, E.,

Ruby-bearing feldspathic dike in peridotite from Ray-Iz ophiolite, the Polar Urals: implications for mantle metasomatism and origin of ruby, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 査読有, 110, 2015, 76-81.

doi: 10.2465/jmps.141021

2. Pirnia, T., Arai, S., Tamura, A., Ishimaru, S. and Torabi, G., Sr enrichment in mantle pyroxenes as a result of plagioclase alteration in lherzolite, *Lithos*, 査読有, 196-197, 2014, 198-212.

doi: 10.1016/j.lithos.2014.03.008.

3. Tamura, A., Morishita, T., Ishimaru, S. and Arai, S., Geochemistry of spinel-hosted amphibole inclusions in abyssal peridotite: insight into secondary melt formation in melt-peridotite reaction, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 査読有, 167, 2014, 974.

doi: 10.1007/s00410-014-0974-x.

4. Negishi, H., Arai, S., Yurimoto, H., Ito, S., Ishimaru, S., Tamura, A. and Akizawa, N., Sulfide-rich dunite within a thick Moho transition zone of the northern Oman ophiolite: implications for the origin of Cyprus-type sulfide deposits, *Lithos*, 査読有, 164-167, 2013, 22-35.

doi: 10.1016/j.lithos.2012.11.024.

5. Arai, S., Ishimaru, S. and Mizukami, T., Methane and propane micro-inclusion in titanoclinohumite-bearing dunites from the Sanbagawa high-P metamorphic belt, Japan: hydrocarbon activity in a subduction zone and Ti mobility, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, 353-354, 2012, 1-11.

doi: 10.1016/j.epsl.2012.07.043

〔学会発表〕(計 18 件)

1. 石丸 聡子, 荒井 章司, 三浦真, Shmelev, V.R., Ray-Iz オフィオライトに見られるルビーを含む優白色脈の記載岩石学, 日本鉱物科学会 2014 年年会, 2014 年 9 月 19 日, 熊本大学 (熊本県熊本市)
2. 荒井 章司, 三浦真, 石丸 聡子, Shmelev, V.R., 北極圏ウラル・オフィオライト調査, 日本鉱物科学会 2014 年年会, 2014 年 9 月 19 日, 熊本大学 (熊本県熊本市)
3. 三浦真, 荒井 章司, 石丸 聡子, Shmelev, V.R., 北極圏ウラル, ライズ・オフィオライトにおける超高压クロミタイトの岩石学的特徴, 日本鉱物科学会 2014 年年会, 2014 年 9 月 19 日, 熊本大学 (熊本県熊本市)
4. 小林 真大, 角野 浩史, 長尾 敬介, 石丸 聡

- 子, 荒井 章司 他, ハロゲンと希ガスをト  
レーサーとした水の沈み込み過程の解明,  
2014 年日本地球化学会年会, 2014 年 9  
月 18 日, 富山大学 (富山県富山市)
5. 石丸 聡子, 荒井 章司, 田村 明弘, オマ  
ーンオフィオライト底部かんらん岩に記  
録された交代作用: スラブマントル相互  
作用のアナログ, 日本鉱物科学会 2013 年  
年会, 2013 年 9 月 13 日, 筑波大学 (茨  
城県つくば市)
  6. 小林 真大, 角野 浩史, 長尾 敬介, 石丸  
聡子, 荒井 章司 他, マントルウェッジか  
んらん岩に捕獲された沈み込み起源のハ  
ロゲンと希ガス, 2013 年日本地球化学会  
年会, 2013 年 9 月 11 日, 筑波大学 (茨城  
県つくば市)
  7. Ishimaru, S., Arai, S. and Tamura, A.,  
Metasomatism recorded in the  
peridotite overlying metamorphic sole of  
the Oman ophiolite: an analog of  
mantle-wedge events. Goldschmidt2013,  
2013 年 8 月 29 日, フィレンツェ (イタ  
リア)
  8. Kobayashi, M., Sumino, H., Nagao, K.,  
Ishimaru, S., Arai, S., et al., Subducted  
halogens and noble gases in the mantle  
wedge peridotite. Goldschmidt2013,  
2013 年 8 月 29 日, フィレンツェ (イタ  
リア)
  9. Tamura, A., Morishita, T., Arai, S. and  
Ishimaru, S., Geochemistry of  
spinel-hosted amphibole inclusions in  
abyssal peridotite: embedded evidence  
for melt-peridotite reaction process?  
Goldschmidt2013, 2013 年 8 月 27 日, フ  
ィレンツェ (イタリア)
  10. Kobayashi, M., Sumino, H., Saito, T.,  
Nagao, K., Ishimaru, S., Arai, S., et al.,  
Slab-derived halogens and noble gasses  
in mantle peridotites from subduction  
zones, IAVCEI2013, 2013 年 7 月 21 日,  
かごしま県民交流センター (鹿児島県鹿  
児島市)
  11. Ishimaru, S., Kawamoto, T., Kumagai,  
Y., Arai, S. and Yamamoto, J.,  
Metasomatism within the mantle  
wedge inferred from NaCl equivalent  
content of aqueous fluid inclusions in  
sub-arc mantle peridotites from the  
Kamchatka arc, IAVCEI2013, 2013 年 7  
月 20 日, かごしま県民交流センター (鹿  
児島県鹿児島市)
  12. 小林 真大, 角野 浩史, 齋藤 健彦, 長尾  
敬介, 石丸 聡子, 荒井 章司 他, アジア  
東縁の沈み込み帯に産するマントル肝が  
ん岩中の間隙水起源ハロゲンと希ガス, 日  
本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013  
年 5 月 23 日, 幕張メッセ (千葉県千葉市)
  13. Ishimaru, S., Arai, S. and Tamura, A.,  
Clinopyroxenite dike crosscutting  
banded peridotites just above  
metamorphic sole in the Oman  
ophiolite: early cumulates from the  
primary V3 lava, EGU General  
Assembly 2013, 2013 年 4 月 11 日, ウィ  
ーン (オーストリア)
  14. 石丸 聡子, 荒井 章司, オマーンオフィ  
オライト底部の変形レールゾライトに貫  
入した単斜輝岩脈: 最後に活動したメルト  
起源? 日本鉱物科学会 2012 年年会, 2012  
年 9 月 21 日, 京都大学 (京都府京都市)
  15. 石丸 聡子, 熊谷 仁孝, 川本 竜彦, 他,  
火山フロント下マントル由来かんらん岩  
中にトラップされた H<sub>2</sub>O 流体の塩濃度:  
マントル交代作用との関係, 2012 年度日  
本地球化学会年会, 2012 年 9 月 12 日,  
九州大学 (福岡県福岡市)
  16. Ishimaru, S. and Arai, S., Enrichment  
of fluid-mobile elements in basal  
peridotites above the metamorphic sole  
of Oman ophiolite, AOGS2012, 2012 年 8  
月 15 日, シンガポール (シンガポール)
  17. 石丸 聡子, 荒井 章司, 田村 明弘, 他,  
カムチャツカ弧, 火山フロント下マントル  
由来かんらん岩捕獲岩の特徴, 日本地球惑  
星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 24  
日, 幕張メッセ (千葉県千葉市)
  18. Ishimaru, S., Arai, S., Tamura, A., et al.,  
Toward a general view of mantle  
peridotite beneath the volcanic front:  
peridotite xenoliths from Bezymyanny  
volcano (central Kamchatka), EGU  
General Assembly 2012, 2012 年 4 月 23  
日, ウィーン (オーストリア)
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
石丸 聡子 (ISHIMARU, Satoko)  
熊本大学・大学院自然科学研究科・助教  
研究者番号: 6 0 4 6 4 0 4 6
- (2) 研究分担者  
荒井 章司 (ARAI, Shoji)  
金沢大学・自然システム学系・特任教授  
研究者番号: 2 0 1 0 7 6 8 4