

機関番号：16301

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540446

研究課題名 (和文) マントルーモホ漸移帯でのマグマプロセス

パキスタンマラカンドオフィオライトの例

研究課題名 (英文) Magma Process at Mantle-Moho Transition Zone:

Case Study at Malakand Ophiolite, Pakistan

研究代表者

佐野 栄 (Sano Sakae)

愛媛大学・教育学部・教授

研究者番号：10226037

研究成果の概要 (和文)：パキスタン北西部に位置するマラカンド超苦鉄質岩体は、インドおよびユーラシアプレートの衝突で形成されたオフィオライト断片であり、島弧下の最上部マントルの特徴を有する。岩体は、非常に枯渇したハルツバーナイトとダナイト、そして小規模クロミタイトから構成される。これら超苦鉄質岩類の岩石鉱物学的、地球化学的検討に基づくと、最上部マントル付近では、メルト浸透流と溶け残りマントル物質との相互作用が効果的に働いていると結論づけられる。

研究成果の概要 (英文)：Malakand ophiolitic peridotite, which is fragment formed by convergence of Indian and Eurasia plates, represents the uppermost mantle beneath an island arc. The main constituents are strongly depleted harzburgite with intercalating dunite, which includes minor chromitite. Based on the field occurrence, petrologic and mineralogic studies and rare earth elements compositions of the ultramafic rocks, an interaction between residual mantle wall rock and the percolating melt around the uppermost mantle is important to consider the magma process.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：岩石鉱物学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：オフィオライト, 地殻・マントル, 希土類元素

## 1. 研究開始当初の背景

ユーラシアプレートとインドプレートの衝突に伴うネオテチス海の収縮に関連するオフィオライトの起源やそこで起こっている火成活動の様子に関する研究はあまり進んでいない。この2つのプレート境界には比較的保存の良いオフィオライト岩体が点在する。中でも、本研究対象としたマラカンド超苦鉄質岩体は、顕著な二次的変質を被って

おらず、最上部マントル付近でのマグマプロセスを検討するのに好都合の対象物である。そのため、本研究では、マラカンド超苦鉄質岩体を題材に、主として、岩石の地球化学的特徴を用いて、最上部マントル付近で起こっているマグマプロセスについて検討を行うこととした。

## 2. 研究の目的

本研究では、上記の背景を踏まえ、以下の3項目を研究目的とした。

(1) マラカンド超苦鉄質岩体を構成する岩石の岩石鉱物学的アプローチによる起源を明らかにする。

(2) ICP-MS を用いた超苦鉄質岩類の微量元素濃度(希土類元素濃度)の精密分析法の確立

(3) 超苦鉄質岩の微量元素濃度に基づく、マラカンド岩体の形成場に関する起源の推定と最上部マントル～モホ漸移帯でのマグマプロセスのモデル化

### 3. 研究の方法

(1) パキスタンオフィオライトに関する先行研究のレビューを行い、マラカンド超苦鉄質岩体の地質学的な位置付けを明確にする。

(2) マラカンド超苦鉄質岩体を構成する岩石試料の記載と EPMA による鉱物化学組成の分析を行い、岩体がどのようなマントルに由来するのか、その起源を推定する。

(3) 超苦鉄質岩類の微量元素濃度の高精度分析技術の開発と岩石試料の分析をおこない、これまで明らかにされていない、マラカンド超苦鉄質岩体の地球化学的データを蓄積する。

(4) 微量元素組成に基づいた、マラカンド超苦鉄質岩体の地球化学的特徴とマグマ組成変化プロセスに関する検討を行う。

### 4. 研究成果

(1) 岩石学的アプローチによるマラカンド岩体の起源について

パキスタンにはインドプレートとユーラシアプレートのプレート境界に沿って、両者の衝突により形成されたオフィオライトが点在する (Fig. 1)。このプレート境界沿いに



Fig. 1 インド-ユーラシアプレート沿いのオフィオライトの分布。紫色がオフィオライト。

産するオフィオライトについては様々な起源が推定されてきているものの詳細な岩石学的・地球化学的検討がなされたものはあまり多くはない。本研究成果では、この一連のオフィオライトのうち、最も北側に位置するマラカンド超苦鉄質岩体について、その岩石学的・鉱物学的特徴について報告を行う。

マラカンド超苦鉄質岩体は、インドプレート上にのし上げた東西 20km、南北 6km の岩体である。この岩体は、ハルツバーガイトとダナイトを主体とし、ダナイトが卓越する部分には、小規模ではあるが多数のクロミタイト鉱床が胚胎する。ハルツバーガイトとダナイトは層状に分布することが多い。岩体南部の Landi Roud 地域ではハルツバーガイトが卓越するが、Fig. 2 に示されるように、ダナイトが不規則な形状でハルツバーガイトに挟まれるように産出する。また、ハルツバーガイトとダナイトの間には、斜方輝石成分に枯渇したハルツバーガイトが特徴的に分布する。一方、岩体北部 (Heru Shah 地域など) には、岩脈状にウェブステライトやウェールライト、ハンレイ岩などが分布する。

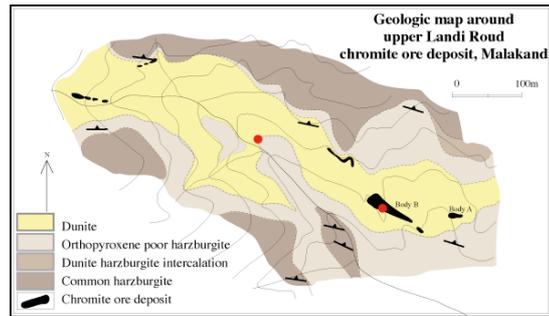


Fig. 2 Landi Roud 周辺の岩相図

ハルツバーガイトは、テクトナイトに特有の、典型的なポーフィロクラスティック組織を示し、ほとんど単斜輝石を含まない。またダナイトはポーフィロクラスティック組織を示すものと等粒状組織を示すものが認められる。クロミタイト鉱床をつくるスピネル中にはしばしば液滴状の形態をした角閃石や単斜輝石が包有される。ハルツバーガイトを構成するカンラン石、斜方輝石、単斜輝石のモード組成は、単斜輝石含量が少ないものの、一般的な海洋地域の溶け残りマントル物質のトレンドとほぼ一致する。

岩体を構成する岩石中の鉱物の化学組成は、場所や岩種により多様性が認められる。カンラン石の Fo 値は 84~98 で、クロミタイトで最も高く、ウェールライトで最も低い。ハルツバーガイトの Fo 値は 91~92 である。ダナイトは 91~94 のより幅広い Fo 値を示す。スピネルは Cr# ( $Cr/(Cr+Al)$ ) が 0.4~0.9 の幅広い組成で特徴付けられる。スピネルの化学組成の多様性はカンラン石と同様に岩体内の場所と岩種に強く依存している。ハルツ

バーサイト中のスピネルの Cr#は、場所により 0.4-0.5 を示したり、0.7-0.75 を示したりする。ダナイト中のスピネルは 0.4~0.9 のより幅広い組成を示す。クロミタイト中のスピネルは場所により Cr#が 0.4~0.5 および 0.6~0.7 の異なる組成幅を示す。スピネルに包含される角閃石は、パーガサイト、マグネシオホルンブレンドなどの Ca 角閃石である。

以上の結果に基づくと、マラカンド超苦鉄質岩体を構成する岩石は、メルト成分に非常に枯渇した溶け残りマントルを主体とすることが推定される。ハルツバーサイト中には、単斜輝石がほとんど含まれておらず、カンラン石の Fo 値は 91-92 と、海嶺下のペリドタイトのものと比較して高く、また、スピネルの Cr#も高い。岩体中にしばしば認められるクロミタイト鉱床をつくるスピネルには含水鉱物が包有される。これらのことから、マラカンド超苦鉄質岩体は、島弧下の最上部マントル~地殻漸移帯に相当することが想定される。

## (2) ICP-MS を用いた超苦鉄質岩類の微量元素濃度の分析法について

本研究期間中に、愛媛大学総合科学支援センターに新型の誘導結合プラズマ質量分析装置が導入された。そのため、機器のセットアップと標準物質を用いた機器性能の確認を行い、本研究遂行のための基盤整備を行った。本研究で扱う溶け残りマントル物質中には極低濃度の微量元素が含まれており、この岩石中の微量元素を精度良く分析するためには、前処理用の清浄な実験室環境が必要となる。従って、本研究期間中には、誘導結合プラズマ質量分析装置のセットアップと前処理用の実験室整備も併せ、地球化学的アプローチの環境整備を行った。

超苦鉄質岩に含まれる微量元素濃度を精度良く分析する手法開発の手始めとして、ごく少量の試料で分析できるよう、様々な物質（岩石、鉱物、火山ガラス、水、植物）について分析法を検討した。様々な手法を検討した結果、植物、火山ガラスについては数ミリigramのオーダーでの微量元素濃度の定量を行うことが可能となった。一連の分析手法の検討成果が、以下の「5. 主な発表論文等」に列記されているように、論文として公表された。

## (3) 最上部マントル~モホ漸移帯付近でのマグマプロセスについて

上述のように、ハルツバーサイトおよびダナイト、クロミタイトに含まれるカンラン石とスピネルの化学組成は、場所に依存した多様性が認められる。総じて、岩体南部地域の

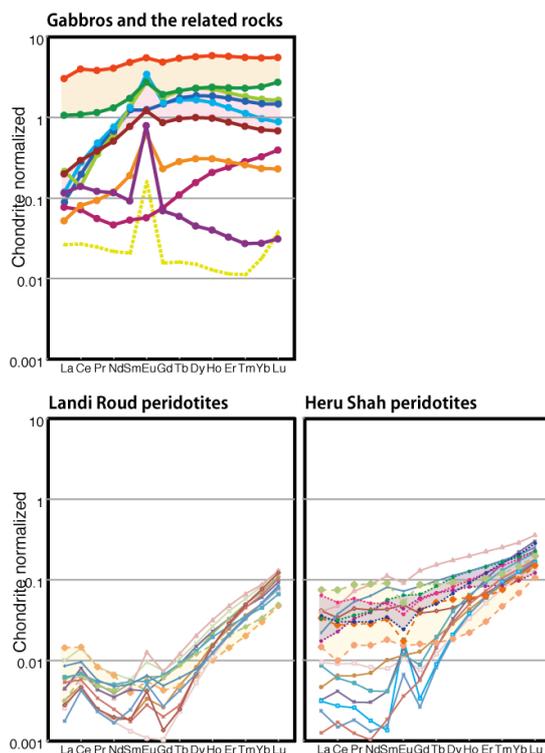


Fig. 3 マラカンド超苦鉄質岩体を構成する岩石の希土類元素パターン。ペリドタイトのうち、実線はハルツバーサイト、波線はダナイト、点線はクロミタイトを示している。

カンラン石の Fo 値は岩体北東部地域のものに比べ高い。スピネルも同様の傾向を示し、岩体南部地域のスピネルの Cr# (Cr/(Cr+Al)) は、北東部地域のものに比べ高い値を示す。また、ハルツバーサイトに含まれる単斜輝石のモード組成は、南部地域で最大 0.3% であり、多くのハルツバーサイトは単斜輝石を含まない。それに対し、北東部地域のハルツバーサイトに含まれる単斜輝石のモード組成は、0.3~1.6% である。以上のことは、岩体南部地域と北東部地域では、溶け残りマントルカンラン岩の枯渇度に相違があることを示している。

岩体を構成する様々な岩石の希土類元素組成を ICP-MS により求めた (Fig. 3)。ハルツバーサイト、ダナイトともにコンドライトで規格化した濃度は極めて低い。岩体南部地域 Landi Roud のハルツバーサイトとダナイトのコンドライトで規格化した La, Gd, Lu 濃度は、北東部地域のハルツバーサイトで  $(La)_N=0.002\sim0.010$ ,  $(Gd)_N=0.001\sim0.008$ ,  $(Lu)_N=0.067\sim0.13$ , ダナイトで  $(La)_N=0.003\sim0.014$ ,  $(Gd)_N=0.004\sim0.006$ ,  $(Lu)_N=0.048\sim0.050$  である。一方、岩体北東部の Heru Shah では、ハルツバーサイトで  $(La)_N=0.001\sim0.042$ ,  $(Gd)_N=0.003\sim0.131$ ,  $(Lu)_N=0.15\sim0.36$ , ダナイトで  $(La)_N=0.015\sim0.075$ ,  $(Gd)_N=0.016\sim0.087$ ,  $(Lu)_N=0.11\sim0.20$  である。さらにダナイトに伴って産出するクロミ

タイトの珪酸塩基質部は(La)<sub>N</sub>=0.010~0.033, (Gd)<sub>N</sub>=0.012~0.067, (Lu)<sub>N</sub>=0.081~0.23である。

ハルツバーガイト, ダナイトともに, 総じて, “スプーン型”あるいはU字型のREEパターンを示し, さらに極度にMREE~HREEに枯渇している。これは, ガーネット安定領域からスピネル安定領域における多段階での大規模部分溶融イベントを経験した後の溶け残り物質であることを意味し, LREEがMREEに比べて相対的にエンリッチしていることは, その後のメルトの通過に伴う溶け残りマントルとメルトとの相互作用に起因するものと思われる。また, 一部にCr#が0.9に達するスピネルが存在することはある種のボニナイトマグマが関与していることを示唆する。

ハルツバーガイト, ダナイトおよびクロミタイトの珪酸塩基質部の希土類元素組成に基づき, マラカンド超苦鉄質岩体におけるマグマプロセスを検討した。岩体北東部地域のハルツバーガイトにおいて, その枯渇度と岩石に含まれる単斜輝石のモードとの間に規則性は認められない。すなわち, もっともREEに枯渇したハルツバーガイトが高い単斜輝石モードを有したり, 反対に, 最も枯渇していないREEパターンを示すハルツバーガイトにおいて単斜輝石のモード組成が低い結果を示したりする。詳細に検討すると, ハルツバーガイトには, U字型のパターンを示すものとHREEからLREEに向かい単調に規格値が減少する直線的なパターンを示すものが存在する。よりREE濃度の高いハルツバーガイトほど左下がりの直線的なパターンを示す。さらに, ダナイトは相対的にHREEに枯渇しLREEに富んでいる。また, クロミタイトの珪酸塩基質部のREEパターンはハルツバーガイトとダナイトの中間的性質を示している。以上のREEパターンの多様性を“plate model”の適用により説明を試みた。その結果, 最上部マントル付近である種のメルト浸透流と溶け残りマントル物質との相互作用で一連のREEパターンの多様性を説明できることが明らかとなった。

## 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 Nguyen Thi Hoang Ha, Masayuki Sakakibara, Sakae Sano and Mai Trong Nhuan (2011) Uptake of metals and metalloids by plants growing in a lead-zinc mine area, Northern Vietnam. *Journal of Hazardous Materials*, 186, 1384-1391. (査読有り)

- ② Nguyen Thi Hoang Ha, Masayuki Sakakibara, and Sakae Sano (2011) Accumulation of Indium and other heavy metals by *Eleocharis acicularis*: An option for phytoremediation and phytomining. *Bioresource Technology*, 102, 2228-2234. (査読有り)

- ③ Nguyen Thi Hoang Ha, Masayuki Sakakibara and Sakae Sano (2009) Phytoremediation of Sb, As, Cu, and Zn from Contaminated Water by the Aquatic Macrophyte *Eleocharis acicularis*. *Clean-Soil, Air, Water*, 37, 720-725. (査読有り)

- ④ Nguyen Thi Hoang Ha, Masayuki Sakakibara, Sakae Sano, Rie S. Hori and Koichiro Sera (2009) The Potential of *Eleocharis acicularis* for Phytoremediation: Case Study at an Abandoned Mine Site. *Clean-Soil, Air, Water*, 37, 203-208. (査読有り)

- ⑤ 榊原正幸, 中村千怜, 岩崎仁美, 池田倫治, 佐野 栄, 檀原 徹 (2009) 愛媛県野村町北部の中期更新世平野火山灰のFT年代および岩石学的研究. *火山*, 54, 241-251. (査読有り)

[学会発表] (計3件)

- ① Sakae Sano (2010) Petrology and geochemistry of Malakand ophiolitic complex, Pakistan. 20<sup>th</sup> General Meeting of the International Mineralogical Association, Budapest. 2010年8月24-27日

- ② 佐野 栄 (2010) マラカンド (パキスタン) 超苦鉄質岩体の岩石学的・地球化学的検討 (その2). 日本地質学会 (富山) 2010年9月18日

- ③ 佐野 栄 (2009) マラカンド (パキスタン) 超苦鉄質岩体の岩石学的・地球化学的検討. 日本地質学会 (岡山) 2009年9月5日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐野 栄 (SANO SAKAE)

愛媛大学・教育学部・教授

研究者番号: 10226037