

平成22年6月10日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20740293  
 研究課題名 (和文) プチスポット総合研究－太平洋上部マントル不均質性の実態とマグマ生成過程の解明  
 研究課題名 (英文) Multidisciplinary study on petit-spot: Clarification about revelation of heterogeneity in the Pacific upper mantle and magma genesis  
 研究代表者  
 町田 嗣樹 (MACHIDA SHIKI)  
 東京大学・海洋研究所・特任研究員  
 研究者番号：40444062

研究成果の概要 (和文)：本研究では、新種の火山プチスポットから採取された玄武岩について鉱物学的・地球化学的解析を行った。その結果、太平洋全域に及ぶ小規模な上部マントルの不均質性は、過去の大陸プレートを構成していたリサイクル物質に起因し、それらは予想以上に多種に渡ることが明らかになった。また、プチスポット火成活動は、太平洋全域で普遍的な現象であることが証明された。マグマの地球化学的なバリエーションは、起源物質の化学的特徴やマグマ生成から噴火に至る過程が小さな火山毎に異なることを示している。

研究成果の概要 (英文)：Mineralogical and geochemical investigations for basalts from new type volcanoes “petit-spot” were conducted. Investigations clarify that a small-scale heterogeneity of upper mantle, wide-spreading across the Pacific Ocean, was caused by the recycled continental plate materials, that are variable more than expected. Furthermore, it was confirmed that the petit-spot magmatism is a common phenomenon within the Pacific Ocean. Geochemical variations of magma indicate that different source materials and/or isolated process leading from magma genesis to eruption for each small volcano.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 1,900,000 | 570,000 | 2,470,000 |
| 2009年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

研究分野：火成岩岩石学、テクトニクス、地球化学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：テクトニクス、マントル化学、物質循環、マグマ・火成岩

## 1. 研究開始当初の背景

プチスポットは北西太平洋北緯 37.5 度、東経 150 度の海域 (プチスポット海域) で発見された、プレート境界の火山やホットスポットとは関係しない新しいタイプの火山で

ある。プチスポットは既存の火山活動の枠には当てはまらないため、何故この海域下でマグマが生じ、どの様に噴出したのか、を明快に説明するモデルがない。従ってプチスポットの成因を解明するためには、マッピングを

はじめ、様々な観察事実・観測データを収集することが必須である。そこで研究代表者らの研究グループは、様々な地球物理学的・地球化学的・岩石学的手法を用いた総合的な観測プロジェクトを立ち上げ、平成 17 年度に YK05-06 次航海、KR05-10 次航海、平成 19 年度に KR07-06 次航海を行い、「しんかい 6500」や「かいこう 7000II」を用いた潜航地質調査、ドレッジによる岩石採取、地形・重磁力マッピング、シングルチャンネル反射法地震探査、海底電位磁力計を用いた電気伝導度構造探査、を行っている。その中で研究代表者は、プチスポット火山から得られた玄武岩の Sr、Nd、Pb 同位体組成を求め、マグマの成因、起源マントルの特徴、固体地球進化における意義を考察した (Machida et al., 2009)。プチスポットのアルカリ玄武岩は、南半球 (インド洋や大西洋) の中央海嶺玄武岩や海洋島玄武岩と同様の Sr、Nd、Pb 同位体組成 (Dupal 異常: Dupré and Allègre, 1983; Hart, 1984) を示し、EM1 マントル端成分の組成に極めて近い。これは、今まで南半球に固有の同位体異常であると考えられていた Dupal 異常の特徴が、北半球のマントルプルームの影響のないノーマルなマントルで初めて特定された例であり、太平洋型マントルにもリサイクルされたプレート物質による小規模な不均質性が存在することの証拠である。

## 2. 研究の目的

本研究は、プチスポット総合調査・研究の一環として、玄武岩の鉱物学的・地球化学的アプローチからマグマの起源物質を特定し、マグマ生成条件およびマグマ生成率を明らかにしようとするものである。

プチスポットの成因については、Hirano et al. (2006)によって、アウターライズ手前で太平洋プレートが上方に屈曲し始めることで割れ目を生じ、アセノスフェアの溶融体が地表まで運ばれ、火山として噴出したとする説が提唱された。このプレート屈曲起源説は、噴出のメカニズムを説明しようとしているが、溶融のメカニズムについては説明しない。重要な点は、プチスポット海域におけるマグマの噴出とアセノスフェアでの部分溶融をそれぞれ独立な要因に求めていることであり、この点でも従来の火山活動とは異なる。

また、太平洋上部マントルには小規模なリサイクル物質による不均質性が存在し、それがアセノスフェアでのマグマ生成に重大な役割を果たしていることは明らかである (Machida et al., 2009)。ただし、この小規模リサイクル物質溶融モデルは、あくまでも観察事実を整合的に説明するための定性的

なものに過ぎない。

これらの問題を解決するには、岩石学的・地球化学的制約と物理学的制約を包括的に考慮したモデルの構築が必要である。そこで本研究では、玄武岩の全岩主要・微量元素組成および Sr、Nd、Pb 同位体組成分析と、かんらん石斑晶の化学組成分析とを組み合わせ、包括的な化学・同位体組成を明らかにし、その結果の解析から、太平洋上部マントルに存在するリサイクル物質が (1) どの様な物質に由来し、(2) どの様な温度圧力条件でどの程度融解し、(3) どの程度マグマ形成に寄与しているか、を定量的に明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、2. で述べた研究目的を達成するために、顕微鏡観察による基礎的な岩石記載に加え (1) 電子線プローブマイクロ分析装置 (EPMA) を用いたかんらん石の化学組成分析、(2) 蛍光 X 線分析装置 (XRF) を用いた全岩主要元素組成分析、(3) 誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS) を用いた全岩微量元素組成分析、(4) 熱イオン化質量分析計 (TIMS) および多重検出器 ICP-MS

(MC-ICP-MS) を用いた全岩 Sr、Nd、Pb 同位体分析を組み合わせ、プチスポット火山から得られた玄武岩についての包括的な鉱物学的・地球化学的データを得た。

研究対象としたプチスポット火山は、今までに発見されていた二つの火山群 (ア・イ)、および、近年新たに発見されたプチスポット火山に類似する未確認の火山群 (ウ・エ) である。すなわち、(ア) 岩手県沖日本海溝海側斜面で発見された海丘群 (かいこう海丘群)、(イ) かいこう海丘群から南東に 600km 離れた海域の海丘群 (プチスポット海域)、(ウ) かいこう海丘群から南に 200km 離れた海域の海丘群 (チョコチップ海丘群)、(エ) 太平洋南東部チリ海溝沖 (ナスカプレート上) の海丘群 (チリ海域) である。以上のように、全太平洋に及ぶ広域から採取された玄武岩を対象とした。このうち (エ) は、本研究において研究船みらい KR08-06 次航海に乗船し、海丘群での岩石採取を行い、分析・解析を行った。

以上の玄武岩から得られた鉱物学的・地球化学的データの解析法は以下の通りである。

- ①かんらん石斑晶化学組成に基づき、Sobolev et al. (2007)により提唱された手法を応用して、リサイクル物質由来メルトがどの程度プチスポットマグマの生成に寄与しているのかを見積もる
- ②微量元素組成に基づくリサイクル物質溶融モデリングと同位体組成分析の結果によ

り、太平洋上部マントルに存在するリサイクル物質がどのような物質に由来しているのかを推定

③ 予想されるリサイクル物質に関する実験岩石学的研究と主要元素組成との比較により、リサイクル物質の熔融温度圧力条件と部分熔融度を見積もる

#### 4. 研究成果

(1) リサイクル物質由来メルトがどの程度マグマの生成に寄与しているかを見積もるには、かんらん石の Fe/Mn などが有用である (Sobolev et al., 2007)。本研究では、Ni や Mn などの微量元素を、通常のケイ酸塩鉱物分析に用いられる条件とは異なる高い電子線加速電圧と測定時間 (Sobolev et al. (2007) の条件を採用) により測定し、高精度のデータを得る分析ルーチンを確立した。当初、Ni および Mn の高精度分析と同じ分析条件では、MgO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub> などの主要成分の組成を精度良く求めることができなかった。そこで、主要成分の検量に標準かんらん石試料 San Carlos Olivine (Jarosewich et al., 1980) を用いることにより上記の問題を解決し、主要および微量全てを同一条件かつ比較的短時間で分析することに成功した。以上の分析法を用いて、これまでに全岩化学組成の詳細が判明しているプチスポット玄武岩 (Hirano et al., 2006; Machida et al., 2009) のかんらん石結晶を分析した結果、マグマから晶出したかんらん石は、Ni の含有量が高く Mn の含有量が低い (低 Mn/Fe) ことが判明した。そして、Sobolev et al. (2007) により提唱された式にもとづきマグマ生成に対するリサイクル物質の寄与程度を見積もったところ、80-90%以上という結果を得た。以上は、プチスポットマグマの大部分がリサイクルされたプレート物質の熔融によって生成されたものであることを示し、Machida et al. (2009) による Sr, Nd, Pb 同位体組成にもとづく定性的な議論を定量的に裏付けるものである。また、同様な結果は、新たに発見されたプチスポット火山 (「3. 研究の方法」参照) においても得られた。

(2) 本研究では、研究船よこすか YK05-06 次航海と研究船かいいい KR07-06 次航海において「かいこう海丘群」および「プチスポット海域」より得られた玄武岩に加え、KR07-07 次航海において新たに発見された火山フィールドである「チョコチップ海丘群」より得られた玄武岩に対して化学組成分析を行った。そして、既存のデータを合わせて、北西太平洋の3つのプチスポット火山フィールドの地球化学データセットを構築し、化学的

特徴の地域性を検討した。その結果、明らかになった事実は以下の4点である。

① かいこう海丘群の玄武岩は、主要元素の組成変化トレンドが異なる2種類のグループに分けられる。すなわち、等しい MgO 含有量に対して SiO<sub>2</sub> 含有量が高い High-Si グループと低い Low-Si グループである。両グループは、SiO<sub>2</sub> に対する Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の組成変化トレンドも異なる。

② プチスポット海域の玄武岩は、Low-Si グループに対応し、チョコチップ海丘群の玄武岩は、High-Si グループに対応する。

③ 一方、微量元素組成の特徴に注目すると、3つの火山フィールドの玄武岩は、液相濃集度の高い元素の濃度が非常に高いという共通点がある。ただし、それらの元素のうち Ba などの大イオン半径親石元素 (LIL 元素) の濃度の特徴の違いによって、2つのグループに分類できる。かいこう海丘群とチョコチップ海丘群の玄武岩は、LIL 元素が特に濃度が高く、相対的に U, Th, Nb, Ta の濃度が低い。それに対し、プチスポット海域の玄武岩は、LIL 元素の顕著な濃集は認められない。

④ 上記③の大局的な特徴の違いの他に、各火山フィールド内では、わずかな組成変化がある。LIL 元素濃集度のプロキシである Ba/Nb は、同位体組成 (特に <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd) との線形相関が認められる。また、等しい Ba/Nb または <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd であっても、部分熔融度のプロキシである La/Lu が火山毎に異なる場合が多い。以上の結果は、火山毎に起源物質の LIL 元素濃集度が異なる場合があると同時に、起源物質の特徴が同じでも部分熔融度は火山毎に異なることを示している。さらに、かいこう海丘群では、同じ火山の中で起源物質の特徴または部分熔融度が異なるマグマが共存する例も認められる。

③の結果は、北西太平洋で活動する多数の火山群は、起源物質の違いで大きく2種類に分類されることを示す。ただし、④の結果より火山毎に、起源物質のわずかな組成の違いがあり、同時に部分熔融度も異なる場合があること、が定性的に示された。また、①および②の結果は、リサイクル物質の熔融温度圧力条件が、噴出場によって異なることを示唆している。以上をまとめると、プチスポットは、起源物質の性質とマグマ生成から噴火に至る過程が小さな火山毎に異なり、独自のマグマシステムを形成する、個性豊かな火成活動であることが明らかになった。興味深い点は、かいこう海丘群は、様々な生成過程によって作られたマグマが密集しているということ

である。

また、チリ海溝沖の太平洋で発見した複数の海丘より得られた玄武岩の化学組成分析の結果、これらの海丘がいずれもブチスポット火山であることが確認され、マグマの化学的特徴は北西太平洋のブチスポット海域の玄武岩に対応することが判明した。つまり、ブチスポット火山活動は、少なくとも太平洋では普遍的な現象であると同時に、小規模マントル不均質が太平洋全域に及ぶことが証明された。

(3) 過去のプレートのリサイクリングにおいて一般的な概念は、沈み込んで地球深部にもたらされた海洋プレート（主に海洋性地殻）がマントルブルームによって運ばれる、というものである。そこで本研究では、最初のアプローチとして、沈み込んだ海洋性地殻の微量元素組成を仮定した熔融モデリングを行い、ブチスポット火山の初生マグマが再現できるかを検証した。ここで、沈み込んだ海洋性地殻の微量元素組成は、変質海洋性地殻 (Kelley et al., 2003) が沈み込みに伴い低圧および高圧で2段階の脱水を経験した (Machida et al., 2008) ことを仮定して、流体-固相分配係数 (Kessel et al., 2005) にもとづき求めた。また、微量元素モデリングでは、Kogiso and Hirschmann (2006) によるエクロジヤイトの実験岩石学の結果にもとづき様々な熔融温度圧力条件とそれに対応した部分熔融度と熔融固相のモードを仮定し、バッチ融解を仮定した。一方、代表的なブチスポット火山の初生マグマの微量元素組成は、研究成果(1)で求められたかんらん石組成と、かんらん石-メルト分配係数 (Bédard, 2005) にもとづき求めた。モデリング結果と初生マグマ組成とを比較した結果、脱水作用を被った海洋性地殻のリサイクリング(再熔融)では、本研究で明らかになったブチスポットマグマの化学組成の特徴、つまり、Ba・Rbといった脱水した流体に濃集しやすい元素やNb・Ta・U・Thなどの液相濃集度の高い元素に極めて富んでいるという観測事実(研究成果(2))を説明することができない。以上の結果から、可能性の高いマグマ起源物質は、流体に濃集しやすい元素をはじめとした微量元素に富んだ大陸プレート由来の物質、すなわち大陸下部地殻 (e.g., Rapp and Watson, 1995) もしくは交代作用を受けたリソスフェアマントル (e.g., Pilet et al., 2008) であると予想される。研究成果(2)で述べたように、ブチスポットマグマの起源物質には地域性があり、地域内でも組成バリエーションが存在する。大陸下部地殻や大陸下リソスフェアマントルは、様々なマグマプロセスや交代作用

を受けて形成されることを踏まえると、上記の地域性や地域内バリエーションは容易に説明しうるが、全ての火山に対して統一的かつ定量的に起源物質を特定するには至らなかった。ただし見方を変えると、太平洋上部マントルの小規模な不均質性 (Machida et al., 2009) が、予想以上に多種のリサイクル物質に起因するという実態が明らかになったと捉えることができる。これらの成果は、全地球の物質循環を理解するうえで重大な制約を与える。特に、沈み込んだ海洋性地殻のリサイクリングが否定されたことは意義深い。今後、これまでに明らかにされている大陸地殻の形成・発展プロセスや、大陸下マントルの改変作用を考慮して、具体的な起源物質の岩石学的特徴を火山毎に特定する必要がある。

## 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2件)

- ① 平野直人, 阿部なつ江, 町田嗣樹, 山本順司, ブチスポット火山から期待される海洋リソスフェアの包括的理解と地質学の新展開 -超モホール計画の提案-, 地質学雑誌, 116(1), 2010, 1-12., 査読有
- ② Machida, S., N. Hirano, J.-I. Kimura, Evidence for recycled plate material in Pacific upper mantle unrelated to plumes, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 73, Issue 10, 2009, 3028-3037., 査読有

[学会発表] (計5件)

- ① 町田嗣樹, 平野直人, 木村純一, プルームに関連しない太平洋上部マントル中のリサイクルされたプレート物質の証拠, 2009年度日本地球化学会第56回年会, 2009年9月15-17日, 広島大学.
- ② Machida, S., N. Hirano, Y. Kato, N. Abe, Geochemical Variation of Alkaline Basalts from Petit-spot Volcanoes in the Northwestern Pacific, American Geophysical Union 2009 Fall Meeting, San Francisco, USA, 14-18 December, *Eos Trans. AGU*, 89 (53), Fall Meet. Suppl., Abstract, 2009, V43F-2202.
- ③ Machida, S., N. Hirano, J.-I. Kimura, Petit-spot, A Unique Window for Viewing Earth Recycling, American Geophysical Union 2008 Fall Meeting, San Francisco, USA, 14-19 December, *Eos Trans. AGU*, 89 (53), Fall Meet.

Suppl., Abstract, 2008, V43F-2202.

- ④ 町田嗣樹, 平野直人, 木村純一, ブルームに関連しない太平洋上部マントル中に小規模リサイクル物質が存在する証拠, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008 年 5 月 25-30 日, 幕張メッセ.
- ⑤ 高橋亜夕, 平野直人, 町田嗣樹, 岩森光, プチスポットマグマ生成における地球化学的数値シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008 年 5 月 25-30 日, 幕張メッセ.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

町田嗣樹 (MACHIDA SHIKI)

東京大学海洋研究所・特任研究員

研究者番号: 40444062