

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740379

研究課題名(和文) プチスポット総合研究 - アセノスフェア溶融の実態解明とマグマプロセスの包括的理解

研究課題名(英文) Multidisciplinary study on petit-spot: Clarification about revelation of asthenosphere melting, and comprehensive understanding for magma process

研究代表者

町田 嗣樹 (Machida, Shiki)

早稲田大学・理工学術院・助教

研究者番号：40444062

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：北西太平洋で発見された3カ所のプチスポット火山フィールドに対し、採取された玄武岩の既存の全岩主要・微量化学組成、同位体組成、およびAr-Ar年代値のデータセットを包括的に解析した。それにもとづき分類した3種の玄武岩グループについて、複数相飽和実験によりマグマの最終平衡固相および温度圧力条件を決定した。玄武岩グループ毎の噴火場所の時空間変化、最終平衡条件を総合的に考慮すると、プチスポット火山活動は、リソスフェア・アセノスフェア境界に存在する無数のメルト池から供給されたマグマが、プレートの屈曲によりリソスフェア下部に貫入・捕獲され、周囲の岩石と平衡に達した後に噴火したものであることが判明した。

研究成果の概要(英文)：To define petit-spot geology, a comprehensive data set about geochemistry (major and trace elements, and Sr and Nd isotopic compositions) and Ar-Ar age of alkaline basaltic rocks and glasses from three petit-spot volcanic fields in the northwestern Pacific were analyzed. Then, melting experiments for three geochemical types of basalt groups were conducted, to define finally equilibrated solid phases, temperature, and pressure for petit-spot primary magma. The spatiotemporally change of eruption place for each magma group indicates that magma is originated from isolated melt ponds at the lithosphere-asthenosphere boundary (LAB). And, results of melting experiments show that magma from LAB were tapped in lower lithosphere in response to plate flexure, and were finally equilibrated with ambient lithosphere, followed by eruption.

研究分野：地球惑星科学

科研費の分科・細目：地質学

キーワード：プチスポット マグマ生成条件 マグマプロセス アセノスフェア 炭酸塩質メルト

1. 研究開始当初の背景

プチスポットは、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種の火山である (Hirano et al., 2006)。しかし、既存の火山活動の枠には当てはまらないため、何故マグマが生じ、どの様に噴出したのか、を包括的かつ明快に説明するモデルはない。そこで我々は、総合的な観測プロジェクトを立ち上げ、「しんかい 6500」等の潜航地質調査、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、電気伝導度構造探査、広帯域地震計観測を行ってきた。そして、その中で、プチスポットの成因解明について以下の問題点が浮上した。(1) Hirano et al. (2006) で提案されたプチスポット形成モデルは、アウターライズ手前で太平洋プレートが上方に屈曲して生じた割れ目に沿って、アセノスフェアの溶融体が地表まで運ばれ噴出したとする「プレート屈曲起源説」であるが、これ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。また、(2) アウターライズ形成に伴う「プレート屈曲起源説」が全てだとすると、プチスポットはアウターライズに沿って連続的に分布するはずだが、太平洋でのプチスポットの分布は今のところ5つの海域に限定され、少なくとも連続的でない。つまり、溶融メカニズムによる制約がプチスポット成因解明の鍵だと思われる。ただし、(3) Machida et al. (2009) によって玄武岩の Sr-Nd-Pb 同位体組成にもとづき提案された「小規模リサイクル物質溶融モデル」は、溶融メカニズムに対する重大な制約だが定量的でなく起源物質の実態は不明のままである。一方、(4) 電磁気探査 (Baba et al., 2007) および地震波トモグラフィー (Shito et al., 2009) により、プチスポット直下のアセノスフェアにはいわゆる“異常”は無く、深部からの熱い物質の上昇、または水の存在によって溶融しているわけではないことが示された。つまり、物理探査で検出不可能な小規模リサイクル物質の溶融は否定しないが、逆に小規模領域の温度圧力条件は物理探査では制約できないことになる。さらに、(5) 玄武岩の全岩化学組成は、溶融から噴火までのマグマシステムが火山毎に独立している可能性を示すため、1つの典型的な火山の解析のみではプチスポットの全体像は解明できない。

2. 研究の目的

プチスポット総合観測プロジェクトの中で浮上した上記の問題点を解決するには、個々の火山体において独立にマグマ生成の温度・圧力条件を決定したうえで、太平洋全域の各々のプチスポット火山フィールドでのマグマ生成プロセスの定量的な解明、さらには マグマ生成から噴出に至る包括的なプチスポット成因モデルの構築へとフィールドバックさせる必要がある。そのブレイク

スルーは上記 であり、その最善の実験岩石学的手法が「複数相飽和実験」である。

北西太平洋では、プチスポット火山フィールドが3カ所発見されている (図1)。すな

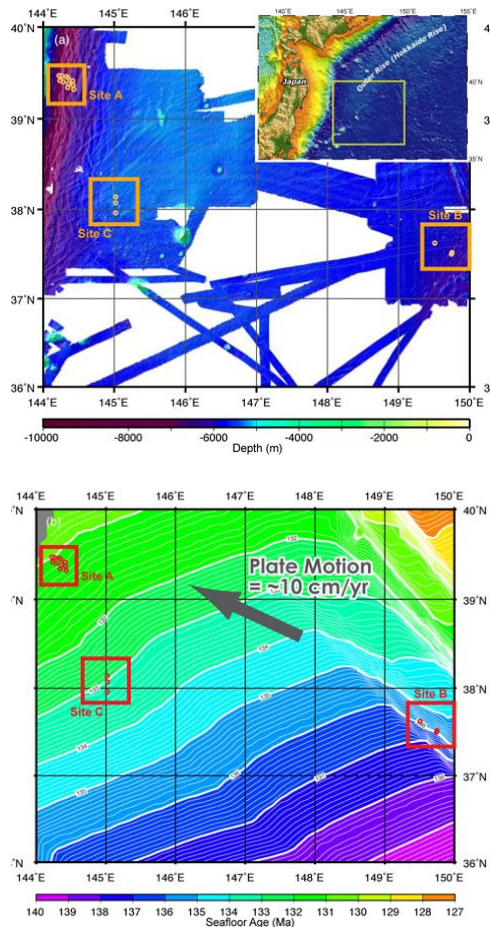


図1. 北西太平洋のプチスポット火山フィールドと海底の年代.

わち、(A) 岩手県沖日本海溝海側斜面で発見された海丘群 (サイト A: かいこう海丘群)、(B) かいこう海丘群から南東に 600km 離れた海域の海丘群 (サイト B: プチスポット海域)、(C) かいこう海丘群から南に 200km 離れた海域の海丘群 (サイト C: チョコチップ海丘群) である。これらの海域では、本研究に先立って鉍物化学組成、全岩主要・微量元素組成、および同位体組成のデータセットが構築されていた。そこで本研究では、これらの3海域のプチスポット火山を念頭に置き、玄武岩に対する複数相飽和実験を行い、マグマが最終的にどのような温度および圧力条件で周囲の固相と平衡に達したのか (最終平衡温度圧力条件) および、その固相がどのような岩石だったのか (最終平衡固相) を決定することを目的とした。

複数相飽和実験を行うにあたり、北西太平洋の上記3海域で活動したプチスポット火山の代表的なマグマの組成は何種類あるの

かを明らかにし、実験対象とする試料を絞り込む必要がある。そこで本研究では、北西部太平洋のプチスポット火山活動の地質学的特徴を明らかにするために、既存の全岩主要・微量化学組成、同位体組成、および Ar-Ar 年代値のデータセットを包括的に解析した。

### 3. 研究の方法

複数相飽和実験では、実験出発物質の組成として、マントルと平衡共存していた時のマグマ組成（初生マグマ組成）を精度良く求めることが結果を大きく左右する。顕微鏡観察の結果、全ての海域で採取された玄武岩の斑晶鉱物はかんらん石のみであることが確認されていた。そこで本研究では、簡便かつ最適の初生マグマ組成推定法である、「かんらん石最大分別法（e.g., Tatsumi et al., 1983）」を採用して、観測された玄武岩組成から結晶分別作用を遡って、Fo=90 のかんらん石と平衡共存する初生マグマ組成を求めた。そして、プチスポットマグマには約 10% の CO<sub>2</sub> および約 1% の H<sub>2</sub>O が含まれていること（Okumura and Hirano., 2013）を考慮し、各主要元素の酸化物、水酸化物、および炭酸塩の試薬を混合し、初生マグマ組成を再現して実験出発物質とした。試薬は、メノウ乳鉢を用いエタノール中で 1 時間以上混合した。

複数相飽和実験は、京都大学の小木曾哲准教授の研究室にて、1/2 インチ-ピストンシリンダー型高温高压発生装置（PG-100）を用いて行った（図 2）。出発物質は、グラファイトカプセル中に充填し（径 1 mm、深さ約 1 mm の円柱状）そのグラファイトカプセルを Pt カプセルに封入した（図 3）。さらに、タルク、パイレックスガラス、グラファイトヒータ、MgO からなる加熱炉、パイロフィライトスリーブ、および鋼鉄製ベースプラグを用いて加熱し、Pt-PtRh 熱電対を用いて温度の制御を行った（図 3）。上記の出発物質に対して、温度および圧力条件を変えた計 120 回（同条件での再実験も含む）の熔融実験を行った。最初の 3 回の実験では、目的の温度・圧力を 2 時間保持し終了としたが、低温の場合試薬が完全に融解せず未反応のままであることが判明した。そこで、完全な融解が確認され



図 2 . ピストンシリンダー型高温高压発生装置（PG-100）。

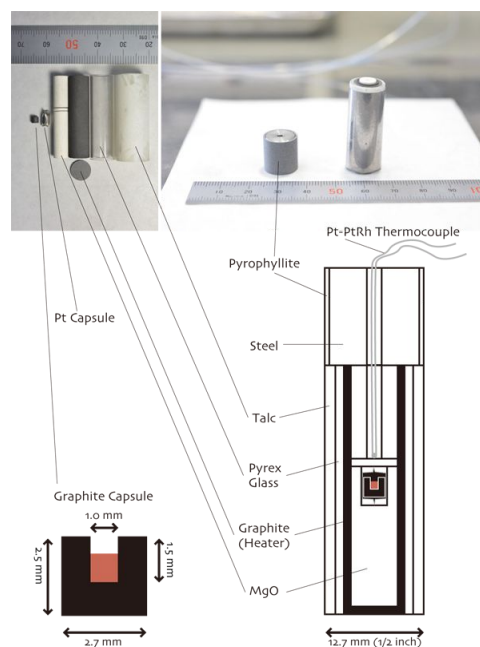


図 3 . 複数相飽和実験に用いた試料組み立て部品とそれらの構成。

た 1400 において 2 時間保持し、その後目的の温度に下げ、さらに 2 時間保持する方法（その間、圧力は目的の圧力で一定）に変更し、その後の実験も全て同条件で行った。

反応後の Pt カプセルは、エポキシ樹脂に埋め研磨し、反応生成物を研磨面に露出させた。反応生成物は、京都大学の電子顕微鏡（SEM）および東京大学大気海洋研究所の電子線マイクロ分析計（EPMA）を用いて観察・分析した。Si, Mg, Fe, Ca および Al についての面分析にもとづいて、マグマ（急冷ガラス）と共存する固相を同定し、観察された全ての相（急冷微細結晶を含む）の化学組成を定量分析した。面分析および定量分析は、波長分散型分光器を用い行い、加速電圧は 15 kV、照射電流は 50 nA（面分析）および 12 nA（定量分析）とした。定量分析値にもとづき、最小自乗法による質量バランス計算を行い、出発物質組成の再現性を検証した。

### 4. 研究成果

#### 4-1. 北西太平洋プチスポット火山の地質学的特徴

##### 4-1-1. プチスポット玄武岩の分類

北西太平洋の 3 つのプチスポット火山フィールドで産出する玄武岩は、特に微量元素組成についての各々のフィールドに共通する地球化学的特徴が認められ、3 つの組成グループに分類される（図 4）。

サイト A と C で活動する **グループ 1 玄武岩 (G1 玄武岩)** は、大イオン半径親石元素 (LILEs) と軽希土類元素 (LREEs) に富み、微量元素スパイダーダイアグラムにおいて U, Th, Nb と Ta の顕著な負の異常、Zr と Hf の若干の負の異常が認められる。

Site A で活動するグループ 2 玄武岩 (G2 玄武岩) は、LILEs と LREEs に富み、U、Th、Nb、Ta、Zr と Hf の顕著な負の異常が認められる。

Site B で活動するグループ 3 玄武岩 (G3 玄武岩) は、Zr と Hf のみに顕著な負の異常が認められる。

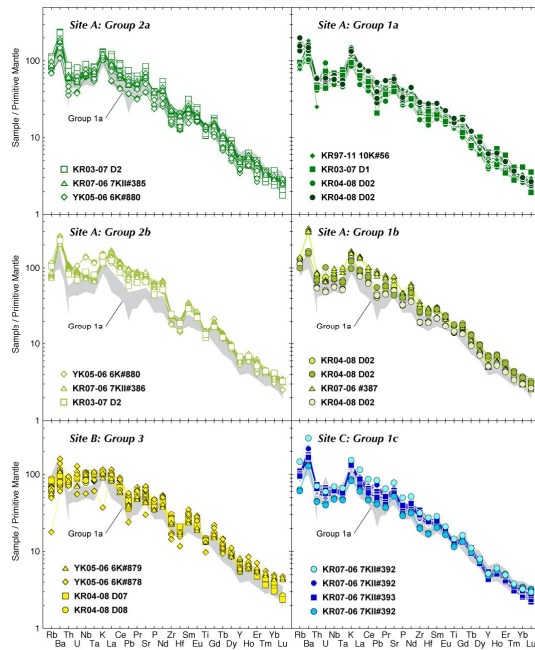


図 4 . 始原的マントル組成で規格化した北西太平洋プチスポット玄武岩の微量元素組成 .

これら 3 つの玄武岩グループは、特にサイト A において、極めて系統的な空間分布をしていることが判明した。つまり、G1 玄武岩および G2 玄武岩は、約 131.075 Ma の海底年代を境とした北側および南側のみに分布する (図 5)。以上をまとめると、G1 玄武岩はサイト C とサイト A 北部のみ、G2 玄武岩はサイト A 南部のみ、G3 玄武岩はサイト B のみにそれぞれ分布している。

さらに、3 つの玄武岩グループの主要元素組成 ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}^*/\text{MgO}$ , および  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) に着目すると、G1 玄武岩および G2 玄武岩は、さらに 3 つないし 2 つのサブグループに細分される (図 6)。G1a および G2a 玄武岩は、G1b および G2b 玄武岩に比べ、等しい  $\text{MgO}$  組成において高い  $\text{SiO}_2$  組成を示す。また、G1a および G2a 玄武岩の  $\text{FeO}^*/\text{MgO}$  および  $\text{Al}_2\text{O}_3$  組成は、等しい  $\text{SiO}_2$  組成において G1b および G2b 玄武岩よりも高い。また、G1c 玄武岩は、G1b 玄武岩に比べやや  $\text{FeO}^*/\text{MgO}$  が低い。

以上の様な共通する主要および微量元素組成の特徴が認められるものの、 $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ , および  $\text{K}_2\text{O}$  組成を考慮すると、マグマの組成は、小さな火山 1 つ 1 つが少しずつ異なる組成であることが判明した。

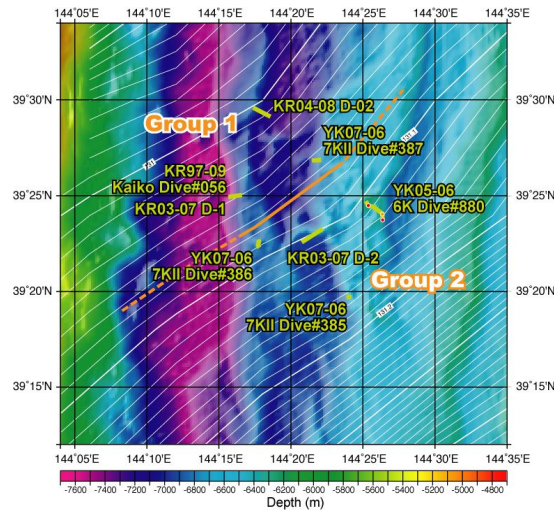


図 5 . Site A における玄武岩グループの分布 . 白いコンターは、Muller et al. (2008) にもとづく海底の年代値を示す .

#### 4-1-2 . 玄武岩グループの化学組成バリエーションの起源

前章で述べたように、3 種類の玄武岩グループは、U、Th、Nb と Ta の負の異常および Zr と Hf の負の異常の有無によって区別することができる。ここで、これらの負の異常の程度は、 $\text{Ba}/\text{Nb}$  または  $\text{Sm}/\text{Hf}$  によってそれぞれ示すことができ、これらの値は、マグマの LILEs 濃集度または LREEs 濃集度に相当する。G1 および G2 玄武岩の  $\text{Ba}/\text{Nb}$  は、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  または  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  と明瞭な負または正の相関を示す (図 7)。しかし、G2 および G3 玄武岩の  $\text{Sm}/\text{Hf}$  はこれらの同位体組成との相関は認められない。よって、放射性起源同位体および LILEs に富む起源物質が、様々な程度でマグマ生成に寄与し、その寄与程度の差がプチスポット玄武岩の組成バリエーションを制御

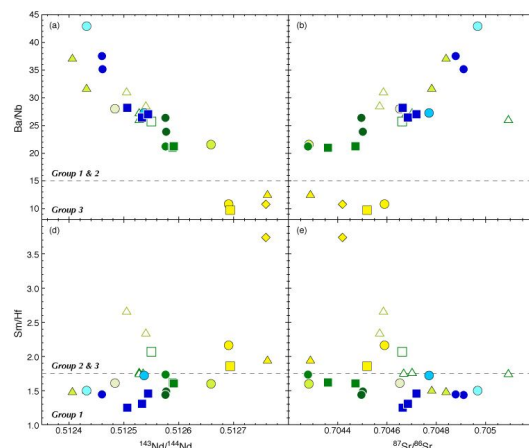


図 6 . 北西太平洋プチスポット玄武岩の  $\text{Ba}/\text{Nb}$  および  $\text{Sm}/\text{Hf}$  と、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  または  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  との関係 .

していることが明らかである。

#### 4-2. 複数相飽和実験にもとづくマグマ生成条件の決定

本研究では、サイトBの隣接する2つの海丘に対する実験に引き続き、サイトAの3つの海丘に対する実験を行った。図10に示すように、それぞれ以下の通り複数相飽和点を決定することができた。

Site B

D08-002: 2.1 GPa, 1280 °C, ol・opx

6K#879-R3A: 2.1 GPa, 1280 °C, ol・2px

Site A

10K#56-R001: 1.4 GPa, 1275 °C, ol・opx

7KII#387-R05: 1.7 GPa, 1250 °C, ol・2px

7KII#386-R14: 2.1 GPa, 1255 °C, ol・2px

ここで ol, opx, 2px は、メルトと最終平衡共存した固相であり、それぞれカンラン石、斜方輝石、単斜輝石および斜方輝石である。

Site B の2つのマグマに対する複数相飽和点の圧力は、地下 40 から 65 km の深さに相当する。ここで、北西太平洋 (WP2) のリソスフェア-アセノスフェア境界の深さが 82 km であること (Kawakatsu et al., 2009, Science) を考慮し考察すると、プチスポットマグマは、リソスフェア下部において周囲のカンラン岩と最終平衡にあったこととなる。ただし、飽和した固相の組み合わせの違い (D08-002 試料では複数相飽和相に cpx が含まれない) から、平衡共存したカンラン岩の鉍物量比は、火山毎に異なる。

以上の結果は、研究実施計画の段階では見込んでいなかった大きな成果であり、「プチスポットはアセノスフェア上部 (約 90 km 以深) に存在するマグマが噴出し生じた火山である」とする従来の仮説 (Hirano et al., 2009, Science) に反する結果である。ここで、初生マグマの CO<sub>2</sub> 含有量 (Okumura and Hirano, 2013) および最終平衡残存固相を考慮すると、プチスポットマグマの起源物質は炭酸塩質カンラン岩であると考えられる。ただし、Falloon and Green (1989) などの実験結果や Stein and Stein (1992) のリソスフェアの温度構造を考慮すると、プチスポットマグマが最終平衡にあったリソスフェア下部では、炭酸塩質カンラン岩は融解していない (Hirschmann, 2010)。つまり、実験結果の解釈として、

(a) プチスポットマグマはリソスフェアの融融 (加熱 or 減圧による) に由来する、

(b) アセノスフェアのマグマが噴出前に一度リソスフェア下部に留まり周囲の岩石と平衡に達した後噴出した、

という2つが成り立つ。Falloon and Green (1989) の炭酸塩質カンラン岩のソリダス分布から、減圧融融させるためには深部マントル物質の大規模な上昇を想定せねばならない。しかし、Site B 直下のマントルトモグラフィの結果 (Sito et al., 2009) では、温度異常や深部マントル物質の上昇は認められない。よって、解釈 (a) は否定される。

Site A における G1 玄武岩の2つのマグマに対する実験結果より、カンラン岩が最終平衡固相であるという G3 玄武岩 (Site B) との共通点は認められるが、両者の複数相飽和点はより低圧低温である。G1 玄武岩は G3 玄武岩に比べると SiO<sub>2</sub> 含有量が高い。つまり、初生マグマの SiO<sub>2</sub> 含有量が増加すると最終平衡圧力が減少するという一般的な傾向が見出される。

#### 4-3. 新しいプチスポット形成モデル

##### 4-3-1. 玄武岩グループの空間分布と化学組成との関係

海底の年代と、その場に噴出したプチスポット玄武岩の Ba/Nb および Sm/Hf との関係 (図8) を見ると、海底の年代が古い場合、G3 玄武岩が活動している。G1 玄武岩は、133 Ma よりも若い海底に広く分布しているが、その中で約 131.1 Ma の海底上には G2 玄武岩が限定的に分布している。以上の観察事実は、マグマ起源物質が地域的に異なることを示す。さらに、海域内の Ba/Nb 組成の変化 (特に Site A) に着目すると、空間的に連続な Ba/Nb 組成の増減が認められる。Ba/Nb と <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd との明瞭な相関を考慮すると、Ba/Nb 組成の連続的な変化は、個々の独立した火山毎にマグマ起源物質の LILEs 濃集度が、系統的に空間変化していることを意味する。

##### 4-3-2. マグマ噴出場の時間変化

同一の玄武岩グループに着目し、火山直下

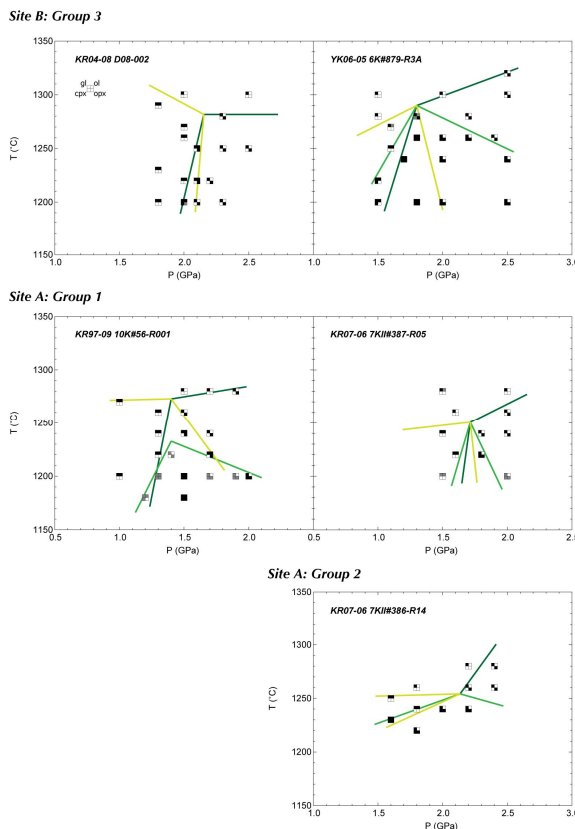


図7. 複数相飽和実験の結果。

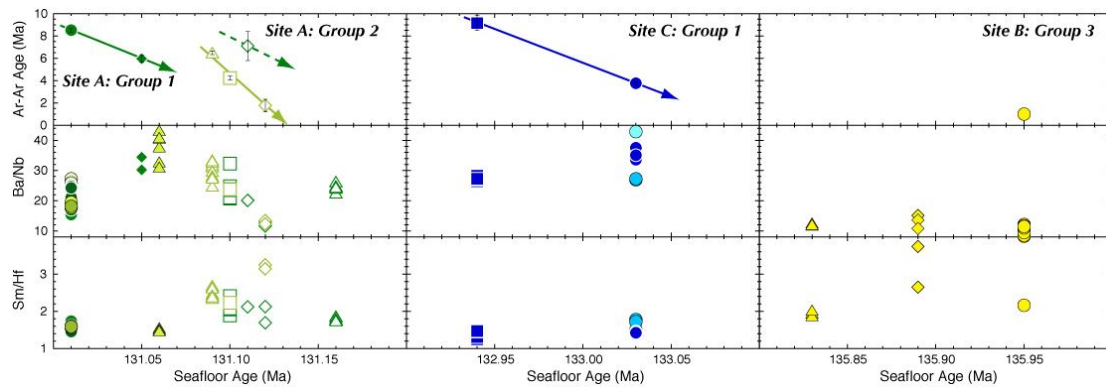


図8 . 北西太平洋プチスポット玄武岩の噴出 Ar-Ar 年代、Ba/Nb、および Sm/Hf と、噴出場の海底の年代との関係 .

の海底年代とその場のマグマ噴出年代との関係 (図8) をみると、より古いマグマは、より若い海底の上に噴出していることが分かる。ここで、プチスポット火山周辺の太平洋プレート年代は、北西方向つまりプレート運動方向に向かって若くなる (図1)。よって、海底年代と噴出年代の関係は、プチスポットマグマの噴出場が時間と共にプレート運動とは逆向きに移動したことを示す。

Hirschmann (2010) や Sifré et al. (2014) などによって、アセノスフェア中には定常的に炭酸塩質メルトが存在することが示された。そして、プチスポットマグマの供給源と想定されているリソスフェア-アセノスフェア境界 (LAB) では、アセノスフェア中のメルトが集積しメルト池を作る (Sakamaki et al., 2013)。ここで、プレート運動に伴ってメルト池が移動すれば、その様な誘発されたメルト池の移動速度は、プレート運動速度よりも遅くなるはずである。つまり、「プチスポットマグマは、プレート運動により引きずられ、わずかに遅く動いている各々のメルト池に由来する」というモデルで、玄武岩グループ毎の噴出場の時空間変化は説明できる。そして、複数相飽和実験結果の解釈 (b) を考慮すると、メルト池由来のマグマは、リソスフェア下部に捕獲され、周囲の岩石 (主にカンラン岩) と平衡に達した後に噴出したと考えられる。

最後にメルト池の移動速度について考察する。例えばサイト A のにおいて G1b 玄武岩が、6.5 Ma に噴火してから 1.8 Ma に噴火するまで、サイト A は約 470 km 北西へ移動する。同様に、サイト C のにおいて G1c 玄武岩が、9.2 Ma に噴火してから 3.8 Ma に噴火するまで、サイト C は約 540 km 北西へ移動する。いずれの海域でも、これらの火山は 5 マイル (約 8 km) の範囲内に分布しているので、プレートの引きずりによって動くメルト池のスピードは、プレート運動速度に対して数%遅いだけであると結論づけられる。

## 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 1 件)

Hirano, N., S. Machida, N. Abe, T. Morishita, A. Tamura, and S. Arai, 2013, Petit-spot lava fields off the central Chile trench induced by plate flexure, *Geochem. J.*, 47, 249-257.

(学会発表) (計 5 件)

町田嗣樹, 小木曾哲, 平野直人、複数相飽和実験によるプチスポットマグマ生成条件の決定、2012 年度日本地球化学会第 59 回年会、2012 年 9 月 11 日~2012 年 9 月 13 日、九州大学

平野直人, 町田嗣樹, 阿部なつ江, 森下知晃, 田村明弘, 荒井章司、チリ海溝のプチスポット火山、2012 年度日本地球化学会第 59 回年会、2012 年 9 月 11 日~2012 年 9 月 13 日、九州大学

Machida, S., N. Hirano, Y. Kato, A. Tamura, S. Arai, Geochemical variations of basalts from petit-spot volcanoes in the northwestern Pacific, The Goldschmidt Conference, 2013 年 8 月 25 日~2013 年 8 月 30 日、イタリア・フィレンツェ

町田嗣樹, 平野直人, 小木曾哲、北西太平洋に存在するプチスポットマグマの成因を実験岩石学で制約しようプロジェクト: 第 1 弾、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、2013 年 5 月 19 日~2013 年 5 月 24 日、幕張メッセ

平野直人, 中西正男, 阿部なつ江, 町田嗣樹、フレンチポリネシア海域の海底火山探索、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、2013 年 5 月 19 日~2013 年 5 月 24 日、幕張メッセ

## 6 . 研究組織

(1) 研究代表者

町田 嗣樹 (MACHIDA, Shiki)

早稲田大学 創造理工学部 環境資源工学科・助教

研究者番号: 40444062