プチスポット形成過程と沈み込むリソスフェアへのインプット

平 野 直 人*

Geochemical/Petrological Interactions between Subducting Lithosphere and Petit-spot Magmas

Naoto HIRANO*

[Received 20 May, 2016; Accepted 31 October, 2016]

Abstract

Geoscientists, who previously had limited direct knowledge of the petrological/geochemical mantle below oceanic regions, were largely restricted to areas near mid-ocean ridges, back-arc spreading centers, and hotspots. Petit-spot lavas and xenoliths provide direct information on the asthenosphere and the lithosphere of subducting plates because the magma that erupts from petit-spot volcanoes originates from the asthenosphere and ascends along the concavely flexed zone prior to the outer-rise along the trench. Such volcanoes have been reported at subduction zones worldwide (e.g., the Japan, Chile, Java, and Tonga trenches). The isotopic composition of petit-spot lavas indicates a heterogeneous asthenosphere, and geobarometric analyses of xenoliths show a higher geothermal gradient in the lithosphere than that predicted previously by the GDH1 model, meaning that conventional theory about the subducting lithosphere needs to be revised in the light of recently obtained petit-spot data. Melt fractionation is thought to occur in the middle lithosphere, given that bulk compositions show fractionation trends in the absence of phenocrysts, in spite of raising lherzolitic xenoliths from ~45 km depth. The most important indicators of petit-spot input to the lithosphere are high levels of carbon dioxide (CO₂) in petit-spot magma, which might explain the low seismic velocity and high electrical conductivity of the oceanic asthenosphere just below the subducting oceanic plate. Because carbon-rich melt ascends through the lithosphere to the seafloor as a petit-spot, it is likely to metasomatize the lithosphere just prior to its subduction.

Key words : lithosphere, petit-spot, alkali-basalt, Pacific plate, carbon dioxide, mantle xenolith

キーワード : リソスフェア, プチスポット, アルカリ玄武岩, 太平洋プレート, 二酸化炭素, マントル捕獲岩

I. はじめに

プレートテクトニクスの概念に基づく固体地球の化学組成を解明する研究, とくにマントル組成を解明するおもな研究は, 拡大境界・収束境界・ホットスポットの地殻変動場で行われている。な

ぜなら, マントルが溶融した産物である溶岩試料がその対象だからである。このことは, ホットスポット火山が発生する場所を除けば, マントル組成をみる窓の場所がプレート境界に限定されてきたこと意味している。もちろんこれら以外に, マントル物質を直接みることができる場所として,

* 東北大学東北アジア研究センター

* Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University, Sendai, 980-8576, Japan

トランスフォーム断層帯に露出する“abyssal peridotite” (Dick, 1989; Warren, 2016) や、マグマ供給率が低い低速拡大軸で発生する“oceanic core complex” または“megamullion” (Dick *et al.*, 2008; Ohara, 2015) も存在する。これらは直接マントル情報をもたらしているが、いずれもプレートの拡大境界に近い場所に限られ、得られる情報としてはモホ面直下のごく浅いマントルでしかない。以上のような情報を統合すると、マントルは地球の全体積の 80% 以上を占めているに関わらず、これまでその化学組成を知る研究は、地球表層の全面積のうち、非常に偏った場所、浅い場所でしか研究できなかったといえる。太平洋プレート上だけをみても、トランスフォーム断層帯を伴う東太平洋海膨 (East Pacific Rise) を除くほとんどの部分の情報が得られていないことがわかる (図 1)。マントルの研究対象として、その溶融物も含めると、太平洋プレートでは東太平洋海膨産の中央海嶺玄武岩 (MORB: mid-ocean ridge basalt) 以外に、12 (または 13) のホットスポット火山 (Clouard and Bonneville, 2001) もその対象となるが、それでもやはり地域は偏ってしまう (図 1)。その意味で東北日本沖のプチスポット火山の場所は、どの中央海嶺およびホットスポットからも遠く離れており、そこから得られる地球内部の情報は貴重である (図 1)。さらに、Hirano *et al.* (2016) では、フレンチポリネシア (French Polynesia) 海域内のいくつかの場所で、海底の小規模溶岩流や小海丘群の存在を報告し (図 1)、それらのプチスポットの可能性と、ホットスポット火山から離れた場所での地球内部情報を得るための岩石試料採取の重要性を指摘している。

プチスポットは、何もないと思われていたプレート内、しかも沈み込む古い北西太平洋プレート上の深海底で発見された新種の火山である。得られた溶岩の起源マントルについては、その化学組成からプレート直下のアセノスフェアの溶融物であることがもっとも考えやすいことと、ホットスポットやマントルブルームといった、ある特殊なマントルの影響は存在していないことがわかっている

(Hirano *et al.*, 2006)。溶岩の組成は、プレート直下のアセノスフェアの情報を多く残している可能性が高い。さらに、噴出した溶岩は、海洋地殻からマントルにかけてそれぞれ捕獲岩または捕獲結晶を含有している (Hirano *et al.*, 2004, 2006; Harigane *et al.*, 2011; Yamamoto *et al.*, 2009, 2014)。地球内部の物質を採取するという視点に限れば、深海掘削を行うまでもなく岩石試料が得られたことになる (平野ほか, 2010)。この「何もない」はずであった古い海洋プレート上の深海底から溶岩と捕獲岩両者が得られたことによってみえてきたことは、沈み込むプレートのマントルはこれまで単純化して想像されていた「古い海洋地殻とかつて中央海嶺で枯渇したマントル」とは異なっているという可能性である。もしプチスポットマグマ活動が、沈み込むプレートの化学組成や構造を改変している場合、全固体地球サイクルの再考が必要となってくる。そこで本論文では、プチスポットが存在する古い太平洋プレート下で想定されるマントルの構造や化学組成を紹介する。

II. プチスポットの普遍性

はじめに「プチスポット」を認定する要因として、メルト上昇が単一のプレート中に発生した応力場の変化に起因するものであることと、マグマ源として直接ホットスポットやマントルブルームの影響がないと予想される場所であることとする。それに基づく、プチスポット火山の活動範囲はとても広い。沈み込むプレート上以外に、別の理由で発生したプレート屈曲場でも報告されている。また、付加体にとり込まれたもの、大陸内の引張場まで含め、以下に示すようにここ数年世界各地から同類の火山が続々と報告されている (図 1)。

1. トンガ海溝海側斜面 (Hirano *et al.*, 2008)
2. チリ海溝海側斜面 (Hirano *et al.*, 2013)
3. 北米 Basin and Range (Valentine and Hirano, 2010)
4. グリーンランド南方海域 (Uenzelmann-Neben *et al.*, 2012)
5. コスタリカ付加体 (Buchs *et al.*, 2013)

図 1 太平洋プレート全域の海底地形図（上図）および北西太平洋、東北日本沖の海底地形図（下図）。上図において太線は中央海嶺、星印はホットスポットの位置を示す（Clouard and Bonneville, 2001）。二重丸はすでに報告されている、または存在が推測されているプチスポット火山の位置を示している。下図は、上図中の点線で示した四角部分の拡大地形図であり、プチスポットが発見されている場所を赤い星印で示している。

Fig. 1 Bathymetric map of the Pacific Plate (upper figure) and the NW Pacific off NE Japan (lower figure). In the upper figure, solid lines and stars show mid-oceanic ridges and hotspots (Clouard and Bonneville, 2001), respectively. Double circles indicate reported or potential petit-spot volcanic fields. The spread bathymetry of the dotted square is illustrated by the lower figure where red stars correspond to the sites of petit-spot monogenetic volcanos.

6. ジャワ海溝海側斜面・クリスマス島 (Taneja *et al.*, 2015)
 7. フレンチポリネシア周辺海域 (Hirano *et al.*, 2016)
- これらのうち、3 と 5 以外は深海底のものであ

り、3 は海域のプレート屈曲とは異なる大陸域の引張場に成因を求め、5 は付加体中のアルカリ玄武岩が他の堆積岩との層序や年代に比べて特異であることがプチスポットと定義される根拠となっている。また、1 と 7 は得られた岩石からプチス

ポット火山類似のものと確認されたわけではなく、これらは海底音響観測から得られる音響反射強度の特徴からプチスポットが存在する可能性が高い場所を示したものである。この音響測深でのみ確認されているものを含め、噴出場の火山体が確認されているものは1～3, 6, 7であるが、いずれも海丘または火山丘として、Hirano *et al.* (2008) で北西太平洋のプチスポット火山で示されたような1 km³ 以下の小規模な火山体、またはその程度の規模である数百 m 高、数 km 径の火山体が報告されている(6の産状はより古い火山体中の岩脈と凝灰岩のみ)。

さらに、4と5と7は沈み込む海洋プレートのアウターライズ屈曲に起因する火山活動では説明できないプレート内に位置する(または復元される)。とくに4は、グリーンランドの氷床融解が周囲の海洋プレートに歪みを誘発させ、火山活動が発生すると述べている。つまりプレート屈曲はマグマ上昇を促すにすぎず、沈み込むプレートのアウターライズ屈曲以外のプレートの応力場の変化によって、プチスポット火山が大いに発生する可能性を示唆している。例えばHirano *et al.* (2006) では、ハワイ諸島の北方数百 km に位置するノースアーチ(North Arch)火山群(Clague *et al.*, 1990) (図1)に産するアルカリ玄武岩も一種のプチスポット火山であることを示唆している。ただし、ノースアーチ火山や同様のアルカリマグマを活動させているハワイの再生期(rejuvenated stage)火山の成因については、やはりホットスポットの存在に根拠を求める考えが多いが(例えば, Ribe and Christensen, 1999; Yamamoto and Morgan, 2009; Ballmer *et al.*, 2011), 起源物質にハワイブルームの関与を認めるもののリソスフェアの屈曲に主眼を置いている説もあり(Bianco *et al.*, 2005), ブルームの関与を求める説がある以上、プチスポットとまったく同類とはいきれない。また、サモアホットスポット直上に存在する現在成長中のVailulu'u 火山(Hart *et al.*, 2000) から300～400 km 西方に離れた西サモア(Western Samoa) (図1)で活動する強アルカリマグマの火山の成因について、

プレートの凸屈曲のヒンジ線に沿ったマグマ上昇に起因することがすでに80年代に提案されている(Natland, 1980) (図2)。このようなマグマは、トンガ海溝軸がプレート進行方向に屈曲する地点に近いSavai'i 島ほど大量に噴出し(Konter and Jackson, 2012), Savai'i 島周辺海域深海底にも多く分布することから(Hill and Tiffin, 1993), トンガ海溝軸屈曲に関連するプレート屈曲に起因する火山活動であるとする研究例が多い(Hill and Tiffin, 1993; Konter and Jackson, 2012; Hirano *et al.*, 2006) (図2)。これらもまた、プチスポット火山に類似する火山であるといえる。

以上述べたように、ハワイやサモアなどとは異なる本来何もないと思われていた沈み込む古い太平洋プレート上で発見されたことを契機に、現在世界各地からプチスポット火山が報告されつつある。この現状を考慮すると、プレートが屈曲する場所ではアセノスフェアを起源とするアルカリマグマが上昇し、いつでもプチスポット火山が発生するというような、普遍的な地学現象である可能性がきわめて高い。どこにでもあるにも関わらずこれまでみつからなかった理由は、既述のようにプチスポットはいずれも1 km³ 以下程度の火山体であり、広範囲の海底をカバーする衛星重力観測から見積もられた海底地形では確認できないほどの規模の小さな火山体であるため、海底の場合はその存在を検知できていなかったただけだと捉えるべきである。一方、そのような火山を生み出す沈み込むプレート側の岩石構造や化学組成は、プチスポットマグマの寄与(インプット)が生じている可能性が大にある。次章からは詳細について議論を進める。

III. アセノスフェアとプチスポット

本論冒頭で示したように、われわれが直接岩石として採取できるマントルは場所が限られ、その深さもごく浅部でしかない。このような地球内部のマントルをみる手段として、地震波速度構造や電気伝導度といった地球物理観測データがあげられる。中央海嶺を除く海洋プレートでは、太平洋

図2 サモアホットスポット列の再生期火山のモデル図。Natland (1980) を改編。再生期火山の噴出物は、Savai'i 島のほぼ全域、Upolu 島の北東部を除いたほぼ全域、Tutuila 島の一部（南端部）を覆う（Konter and Jackson, 2012）。また、Savai'i 島南方からトンガ海溝海側斜面手前にかけて複数の海底溶岩が報告されている（Hill and Tiffin, 1993）。

Fig. 2 Tectonic model of Samoan rejuvenated volcanoes, modified from Natland (1980). The rejuvenated volcanoes are thought to receive magma that ascends along fractures in the Pacific Plate due to fracturing to the south, along the northern Tonga trench axis, which coincides with areas of petit-spot volcanoes. Rejuvenated lavas are currently erupting at Savai'i, Upolu, and Tutuila islands. Only a few of such lavas have been reported on Tutuila Island, whereas lavas cover almost all of Savai'i and Upolu islands (Konter and Jackson, 2012). Submarine lavas have been reported in offshore areas south of Savai'i Island (Hill and Tiffin, 1993).

プレート直下のマントル（アセノスフェア）は数十から百 km ほど深部であり、地震波の到達速度が遅くなる「低速度層」として知られ（例えば、Gaherty *et al.*, 1996）、電気伝導度が高い特徴もある。つまり上位の岩盤プレートとは対照的に延性的に振る舞う柔らかい場所である。

1) 海洋プレート下のアセノスフェア

観測されるアセノスフェア物性の原因としては、圧力に伴う鉱物の物性の変化とする説（物性説）と、マントル部分溶融に原因を求める溶融説の2つがあげられる。溶融説は、プレートテクトニクスが提唱された1960年代以降唱えられ（例えば、Wyllie, 1988）、その後の高圧実験や理論計算の進展に伴い、溶融を必要としない物性説が唱えられてきた（例えば、Karato, 1990; Karato and Jung, 1998）。しかし、実際のアセノスフェアの構成物（岩石や水、二酸化炭素など）の詳細がまったくわかっていないためにさまざまな実験結果が存在することや、アセノスフェアの物性は再現できても、リソスフェアとアセノスフェアの

間の不連続境界の再現ができないことなどから、両説の結論はいまだ得られていない。

このように、アセノスフェアは火山活動や地震活動などの地殻変動を司るプレートテクトニクスの根幹概念であるにも関わらず、その成因という根本概念が未解決のままである。ここ10年間のNature誌とScience誌だけをみてもしばしば議論されている（Wang *et al.*, 2006; Yoshino *et al.*, 2006; Mierdel *et al.*, 2007; Gaillard *et al.*, 2008; Kawakatsu *et al.*, 2009; Rychert and Shearer, 2009; Conrad *et al.*, 2011; Sakamaki *et al.*, 2013; Sifré *et al.*, 2014; Beghein *et al.*, 2014 など）。これらのうち岩石学の分野では、かんらん石の物性を測定したもの（Wang *et al.*, 2006; Yoshino *et al.*, 2006）や、マントルの主要鉱物の1つである斜方輝石の水素溶解度に注目したもの（Mierdel *et al.*, 2007）、メルトの物性そのものに注目したもの（Sakamaki *et al.*, 2013）などがある。実にさまざまな視点からアセノスフェアが議論されているが、かんらん石のみならず複数の鉱

物や水・炭素を含めた組成変化に対応しきれていないことや、陸部が少ない太平洋海域では物理観測が難しいことなど、いまだ問題が多い。アセノスフェアの成因に関する問題解決のためには、これら熔融説と物性説両者ともに、より実際のマントルを模した複数相を考慮したアセノスフェアの再現や、加えて炭素や水素の影響をみる必要性、プレート直下の急激な地震波速度の低下が観測されるグーテンベルグ不連続面の再現、などが今後重要になっていくだろう。

2) プチスポットマグマと炭素

このような状況のなかで、最近になって炭素の存在によりアセノスフェアを説明する研究が多いことにも注目したい (Gaillard *et al.*, 2008; Sifré *et al.*, 2014)。東北日本沖プチスポット玄武岩溶岩の最大の特徴として、深海にもかかわらず溶岩が著しく発泡していることがあげられる。これは、チリ沖で発見されたプチスポット溶岩にも同様である (Hirano *et al.*, 2013)。深海底の高い静水圧下において MORB (Mid-Oceanic Ridge Basalt: 中央海嶺玄武岩) や OIB (Oceanic Island Basalt: ホットスポットに代表される海洋島玄武岩) や島弧など、これまで地球上で知られていたマグマの揮発成分量では、通常はマグマから離溶できず、発泡しない。ましてや東北日本沖プチスポット火山は水深 6000 m にも達する。つまりマグマは 6 kbar の静水圧下での高い飽和度を上回る揮発成分 (H_2O や CO_2 など) 量含有していたことを意味する。そのような深海底で溶岩が著しく発泡する理由は、揮発成分のなかでもより溶解度が低い CO_2 が原因とされる (Dixon, 1997)。Okumura and Hirano (2013) は、東北日本沖プチスポットマグマの揮発成分の実測値や発泡度に基づいて Papale *et al.* (2006) による平衡脱ガス過程を考慮した。その結果、脱ガス前には 10 wt% 程度の CO_2 と 1 wt% 程度の H_2O を含有していることが判明した。これは今まで知られていた世界の多くの火山のマグマよりも多い異常な CO_2 量である。

この炭素を含むアセノスフェアの溶融物がプレート屈曲に起因して深海底に上昇したものが

プチスポット火山であるとする、プチスポット火山がもたらした溶岩は、われわれ人類がはじめて手にするアセノスフェアの物的証拠である。ここ数年のプチスポット溶岩または捕獲岩を用いた研究をあげると、その起源はアセノスフェアであることが現実味を帯びてくる。Machida *et al.* (2015) は、東北日本沖の複数のプチスポット火山の化学組成にもとづいてグループ分けを行い、それらの噴出年代が各グループ内において東側にずれて順に噴出していることから、プレート運動とは若干のズレが生じて複数のメルト集積域から各グループのマグマがそれぞれ噴出していることを見いだした。これはプレート直下に存在する例えばメルト池のようなものが引きずられていることを想像させる。さらに Yamamoto *et al.* (2014) は、東北日本沖プチスポット火山から得られたマントル捕獲岩から見積もられる地温勾配を用いた計算結果によって、少なくとも本海域下でのアセノスフェア熔融を支持している。高濃度の炭素を含んだプチスポット溶岩は、アセノスフェアからもたらされている可能性が高い。

IV. リソスフェアの応力場とマグマの上昇過程

一方で、アセノスフェアから上昇したプチスポットのマグマは、リソスフェア内を速やかに上昇してきたわけではないこともわかっている (Valentine and Hirano, 2010; Hirano, 2011)。

1) マグマ溜まりの必然性

東北日本沖プチスポット火山の溶岩の主要元素組成 (Hirano *et al.*, 2006) のうち、マグネシウム (Mg)-鉄 (Fe) 比とケイ素 (SiO_2)、およびチタン (TiO_2) の各相間について図 3 に示した。この図では、各単成火山ごとに異なるレジェンドでプロットされているが、各マグマの分化指標としての $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 比に対し、 SiO_2 および TiO_2 が火山ごとに線形に変化しているトレンドが読みとれる。既述のように Machida *et al.* (2015) では、Hirano *et al.* (2006) の時点で採取されていなかった福島沖のプチスポット単成火山群 (Site C; Hirano *et al.*, 2006, 2008) (図 1) のプチスポット火山の溶岩試料もとり入れ、微量

図3 北西太平洋，東北日本沖で得られたプチスポット溶岩の主要成分組成 (Hirano *et al.*, 2006). $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 比に対する SiO_2 (上図) と TiO_2 (下図) の変化を示す. 各単成火山ごと異なるプロット図形で示しているが，マグマ分化トレンドは火山ごとに独立していることがわかる. 各レジェンドが示す単成火山の場所は Hirano *et al.* (2006) 中の Fig. S2 を参照されたい.

Fig. 3 Major element compositions of petit-spot lava, NW Pacific off NE Japan (Hirano *et al.*, 2006). Upper and lower figures show SiO_2 and TiO_2 vs. $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$, respectively. A magma fractionation trend is recognized for each monogenetic volcano. The sites of monogenetic volcanoes for each legend are available in Fig. S2 in Hirano *et al.* (2006).

元素や同位体組成をさらに詳細に吟味し，プチスポット火山全体の時空変化を議論しているが，これらおよび図3からいえることは，各マグマは火山ごとに独立したマグマ分化トレンドを示し，どのマグマも少なくともかんらん石斑晶を晶出させていることである。 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 比がさらに低い一部のものは，単斜輝石斑晶も晶出させている可能性がある (図3)。ところが，溶岩の岩石記載では，かんらん石捕獲結晶の記載はあるものの，斑晶の記載は一切認められない (Hirano

et al., 2004, 2006; 平野ほか, 2010)。つまり，リソスフェアを上昇するマグマは，その途中で斑晶を晶出させ，例えばマグマ溜まりを形成し，その斑晶を落としてから上昇する過程が必要となる。

このマグマ溜まりの場所 (マグマが分化する場所) は，マグマ上昇途中のリソスフェア内かもしくは，海底噴出時 (または貫入時) の溶岩のなか (Shimura and Ozawa, 2006; Fujiwara *et al.*, 2007; Kuritani *et al.*, 2010) が考えられる。しかし，日本海溝軸部に近い Site A のプチスポット単成火山群 (図1) で観察された溶岩シルから得られた岩石試料において，Shimura and Ozawa (2006) や Kuritani *et al.* (2010) に示されたような斑晶の集積や結晶度の変化はみられない。岩石はいずれも均質で，非晶質部を伴う微細なインターサタル組織である (Hirano *et al.*, 2001, 2004, 2006)。このため，噴出後の海底でのマグマ分化過程はなく，マグマ上昇時リソスフェア内でのマグマ分化が想定される。どこかの深さでマグマ溜まりを形成していたことになる。

2) マグマ溜まりの深さ

しかし，安易にマグマ溜まりを想定することは難しい。なぜなら，マントル起源の捕獲岩や捕獲結晶が多数存在するからである。当然ながら，マグマ溜まりでかんらん石斑晶を落とすような液相が分化する過程では，かんらん石と輝石で構成されるマントル捕獲岩やかんらん石捕獲結晶も同時にそこで排除されなくてはならない。斑晶がとり除かれたマグマ溜まり形成深度より浅部で捕獲岩や捕獲結晶がとり込まれたと考えなければならない。

Site A および Site B (図1) で得られたマントル捕獲岩中の二酸化炭素包有物のラマンスペクトルシフトが反映する包有物中の二酸化炭素密度によって見積もられる捕獲岩の捕獲深度によると，もっとも深い捕獲深度をもつものは約 1.3 GPa を示し，これはおよそ 45 km の深さに一致する (Yamamoto *et al.*, 2014)。この深さは，本海域の太平洋プレートの厚さをおよそ 100 km と想定すると，ちょうどリソスフェア中部の深度に位置する (Revenaugh and Jordan, 1991;

Gaherty *et al.*, 1996)。つまり、プチスポット火山のマグマ溜まりはこの深度より深い場所で形成されていることになる。

Valentine and Hirano (2010) は、北米中西部の Basin and Range アルカリ単成火山のマグマが分化せずに直接噴出しているのに対し、北西太平洋、東北日本沖のプチスポットは、火山ごとにさまざまな分化トレンドを経験していることを指摘し、この両者の違いをマグマ上昇時のリソスフェアの応力場の違いのひとつの原因としている (図 4)。なぜなら Basin and Range は、リソスフェア上部下部全域にわたって引張場にあるのに対し、プチスポットを形成したアウターライズ手前の太平洋プレート (図 1 の Site B) は、下部の引張場に対して上部は圧縮場となり (Hirano *et al.*, 2006; Hirano, 2011)、両者マグマ上昇時の想定応力場が両地域で異なるからである (図 4)。リソスフェア下部では、最小圧縮応力方向がアウターライズ屈曲ヒンジ線に平行であるのに対し、リソスフェア上部では、その方向は同ヒンジ線に垂直となる。つまり、リソスフェア中部で最小圧縮応力場が 90 度回転することを意味し、これが原因でマグマの上昇がいったん留まると述べている。

以上のことから、かんらん石斑晶を晶出させ、マグマの分化を引き起こしたマグマ溜まりは、凹屈曲するアウターライズ手前の上部リソスフェアと下部リソスフェアの応力場境界 (リソスフェア中部) に想定することがもっとも考えやすい。Yamamoto *et al.* (2014) で示された最深の捕獲岩の深度がリソスフェア上部の底面付近であること、Valentine and Hirano (2010) が想定した応力場転換深度、それらすべての条件が一致するリソスフェア中部でマグマ溜まりが発生し、マグマ分化が生じたと考えられる。

V. プチスポットによるリソスフェアへのインプット

プチスポットは、ホットスポットが存在せずマグマ発生の積極的な原因を考え難いことを前提に、アセノスフェア起源のメルトによって形成さ

れたことが提案された (Hirano *et al.*, 2006)。この考えを成り立たせる状況証拠として、溶岩の希ガス同位体組成が OIB のそれではなく MORB の同位体組成に一致することと、溶岩の希土類元素組成がざくろ石安定領域のマントル溶融を示すことがあげられる。すでに述べたように、マントル捕獲岩から想定される地温勾配からは、アセノスフェア起源のメルトが示唆されている (Yamamoto *et al.*, 2014)。

炭素に富むアセノスフェア起源のメルトがプチスポットマグマとして上昇した場合、リソスフェアの上部下部全域にわたりメルトが通過したことになる。当然ながら、何らかのプチスポットマグマ-リソスフェア相互作用がプレートが沈み込む手前で発生し、マグマによるリソスフェアへ物質的なインプットが予想される。Hirano *et al.* (2004) では、Site A (図 1) で得られたかんらん石捕獲結晶中の包有物について、ネガティブ結晶に代表される単体の CO₂ 包有物グループに加え、ホストマグマに影響されたおもに不定形のメルト包有物も多く存在していることを示している。プチスポットマグマに影響を受けた捕獲結晶と同様に、マグマ上昇時のリソスフェア上部の火道付近の鉱物そのものにも影響を与えていることは大いに考えられる。Yamamoto *et al.* (2009) は、東北日本沖プチスポット溶岩に包有されるかんらん岩 (スピネルレルゾライト) 捕獲岩の真空破碎抽出による希ガス同位体組成を報告している。これによると、より最近活動したプチスポット火山にとり込まれた捕獲岩は、それ以前に活動したプチスポット火山のマグマによる影響を受けて希ガス同位体組成が変動していることを示している。現在、三陸沖の北西太平洋プレート上 (Site A; 図 1) で判明しているプチスポット火山の活動年代の範囲である 10 Ma 以降の期間 (Hirano *et al.*, 2006, 2008; Machida *et al.*, 2015) の各マグマ上昇がリソスフェアに与えたひとつの交代作用といえよう。

以上、本章および IV 章で述べた内容から、すでに報告されている少なくとも北西太平洋プレートについてのリソスフェアへの物質的・化学的イン

プットを以下に列挙する。

1. リソスフェア中部のプチスポットマグマ溜まり・かんらん石集積岩 (Valentine and Hirano, 2010)
2. 高地温勾配から想定されるリソスフェアの熱改変 (Yamamoto *et al.*, 2014)
3. ホストマグマが形成したマントル結晶中のメルト包有物と同等の交代作用 (Hirano *et al.*, 2004)
4. マグマ上昇時リソスフェアの希ガス同位体組成変化 (Yamamoto *et al.*, 2009)
5. プチスポットメルト上昇時に多量に含まれる炭素のリソスフェアへのインプット

脱ガス前のプチスポットマグマの CO_2 量は 10 wt% にも及ぶが、実際の試料の分析値は、もっとも CO_2 が残存していると予想される急冷ガラス部で約 1 wt% であった (Okumura and Hirano, 2013)。つまり、9 wt% 程度の CO_2 は脱ガス以外にも、リソスフェアとの交代作用で失われた可能性は高い (図 4)。

リソスフェア上下部でメルト上昇過程が異なることが考えられる。それらの両者でリソスフェア交代作用の様相が違うことも想定される。日

本海溝に沈み込む太平洋プレートの弾性厚 (T_e : elastic thickness) は、付近のアウトーライズ地形と重力異常に基づき、いずれも 65 ~ 70 km の厚さに見積もられている (Wessel, 1992; Watts and Zhong, 2000)。この深度より上部が弾性リソスフェアであり、いわゆる地震活動が発生し得るような岩盤の物性厚となる。マントル捕獲岩が捕獲され得る深度にはほぼ同等と考えられる。一方で、前章でも述べたが北西太平洋海域の太平洋プレートの厚さはおよそ 100 km と観測されている (Revenaugh and Jordan, 1991; Gaherty *et al.*, 1996)。この約 70 km 以深、100 km までの深さの弾性的ではないリソスフェアはどのようなになっているのか？ これはアセノスフェア同様わかっていないが、弾性的に振る舞う部分のリソスフェア (約 70 km 以浅) より浅い部分でプレートの亀裂に沿ってマグマが上昇していることは想定できる。しかしアセノスフェア起源のメルトがそれ以深の深さでどのように上昇したか？ ひとつの可能性として、弾性的に振る舞う上部リソスフェアでは、メルトの “channelized flow” が、そうでない下部リソスフェアでは “porous flow” がそれぞれ優勢なメルト上昇であることが考えら

図 4 プチスポット火山の形成モデル。アウトーライズ手前で形成されたプチスポット火山以降のリソスフェアでは、交代作用やマグマ集積岩などの存在が想定される。

Fig. 4 Model of the formation of petit-spot volcanoes. Prior to subduction, the lithosphere is subjected to metasomatism or mineral-forming reactions.

れる。これら“channelized flow”と“porous flow”では、マントルとメルト間の反応形態が異なり (Daines and Kohlstedt, 1994), 弾性的なリソスフェア上部と弾性ではないリソスフェア下部では、異なった交代作用をもたらしている可能性がある。それらの過程でプチスポットマグマ自身の組成も変化していることも考えられ、とくに porous flow 時には交代作用の効果がより大きいことが予測できる。少なくとも捕獲岩が得られている 45 km 以浅では、上記に列挙した 3 の反応と同等の交代作用を被っていることが推測できる (図 4)。

Machida *et al.* (2009) は、プチスポットマグマの起源がアセノスフェアでありながら特異な同位体組成 (EM1) である理由を、微小部分溶融の結果であると結論している。つまり、プチスポット火山はアセノスフェアの特異な組成を選択的に抽出し、リソスフェアにもたらしているともいえる。言い換えると、溶岩に特徴的な高濃度の液相濃集元素および炭素は、プチスポットマグマ活動によって MORB 組成の地殻と枯渇マントルに支配的なリソスフェアに付加されているといえる。プチスポット火山が世界中各地の沈み込むプレート上で発生していて、それらから放出される二酸化炭素量は、全地球の火山の放出量を考慮にするほど無視できない量であるが (Okumura and Hirano, 2013), これと同様にプチスポットメルト上昇による炭素やマグマ組成そのものに汚染されるリソスフェアもまた、全固体地球の物質循環のなかで無視できない存在なのかもしれない。

謝 辞

本論文の機会をくださった本特集号編集者の方々に感謝を申し上げる。本論は、プチスポットに関する著者との共同研究による査読付き学術誌への掲載論文 (2016 年 5 月時点) をすべて引用した。共同研究者の方々に深謝の意を表する。また、本研究はプチスポットの岩石を採取したこれまでの 8 回の調査航海によるところが大きい (海洋研究開発機構深海調査研究船「かいれい」KR03-07・KR04-08・KR07-06・KR07-07 航海, 同有人潜水調査船「しんかい 6500」の支援母船「よこす

か」YK05-06・YK10-05・YK14-05 航海, 同海洋地球研究船「みらい」MR08-06 Leg1 航海)。また、本研究およびこれら調査航海は、東レ科学技術研究助成 (#11-5208) および複数の科学研究費補助金 (#24654180, #22740350 など) によって進められた。ここに記し、感謝を申し上げる。

文 献

- Ballmer, M.D., Ito, G., Hunen, J. van and Tackley, P.J. (2011): Spatial and temporal variability in Hawaiian hotspot volcanism induced by small-scale convection. *Nature Geoscience*, **4**, 457–460.
- Beghein, C., Yuan, K., Schmerr, N. and Xing, Z. (2014): Changes in seismic anisotropy shed light on the nature of the Gutenberg Discontinuity. *Science*, **343**, 1237–1240.
- Bianco, T.A., Ito, G., Becker, J.M. and Garcia, M.O. (2005): Secondary Hawaiian volcanism formed by flexural arch decompression. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **6**, Q08009, doi:10.1029/2005GC000945.
- Buchs, D.M., Pilet, S., Baumgartner, P.O., Cosca, M., Flores, K.E. and Bandini, A.N. (2013): Low-volume intraplate volcanism in the Early/Middle Jurassic Pacific basin documented by accreted sequences in Costa Rica. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **14**, 1552–1568, doi:10.1002/ggge.20084.
- Clague, D.A., Holcomb, R.T., Sinton, J.M., Detrick, R.S. and Torresan, M.E. (1990): Pliocene and Pleistocene alkalic flood basalts on the seafloor north of the Hawaiian Islands. *Earth and Planetary Science Letters*, **98**, 175–191.
- Clouard, V. and Bonneville, A. (2001): How many Pacific hotspots are fed by deep mantle plumes?. *Geology*, **29**, 695–698.
- Conrad, C.P., Bianco, T.A., Smith, E.I. and Wessel, P. (2011): Patterns of intraplate volcanism controlled by asthenospheric shear. *Nature Geoscience*, **4**, 317–321.
- Daines, M.J. and Kohlstedt, D.L. (1994): The transition from porous to channelized flow due to melt/rock reaction during melt migration. *Geophysical Research Letters*, **21**, 145–148.
- Dick, H.J.B. (1989) Abyssal peridotites, very slow spreading ridges and ocean ridge magmatism. in *Magmatism in the Ocean Basins* edited by Saunders, A.D. and Norry, M.J., *Geological Society Special Publication*, **42**, 71–105.
- Dick, H.J.B., Tivey, M.A. and Tucholke, B.E. (2008): Plutonic foundation of a slow-spreading ridge segment: Oceanic core complex at Kane Megamullion, 23°30'N, 45°20'W. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **9**(5), doi:10.1029/2007GC001645.
- Dixon, J.E. (1997): Degassing of alkalic basalts. *American Mineralogist*, **82**, 368–378.

- Fujiwara, T., Hirano, N., Abe, N. and Takizawa, K. (2007): Subsurface structure of the “petit-spot” volcanoes on the northwestern Pacific Plate. *Geophysical Research Letters*, **34**, L13305, doi:10.1029/2007GL030439.
- Gaherty, J.B., Jordan, T.H. and Gee, L.S. (1996): Seismic structure of the upper mantle in a central Pacific corridor. *Journal of Geophysical Research*, **101**, 22291–22309, doi:10.1029/96JB01882.
- Gaillard, F., Malki, M., Marziano, G.-I., Pichavant, M. and Scaillet, B. (2008): Carbonatite melts and electrical conductivity in the asthenosphere. *Science*, **322**, 1363–1365.
- Harigane, Y., Mizukami, T., Morishita, T., Michibayashi, K., Abe, N. and Hirano, N. (2011): Direct evidence for upper mantle structure in the NW Pacific Plate: Microstructural analysis of a petit-spot peridotite xenolith. *Earth and Planetary Science Letters*, **302**, 194–202.
- Hart, S.R., Staudigel, H., Koppers, A.A.P., Blusztajn, J., Baker, E.T., Workman, R., Jackson, M., Hauri, E., Kurz, M., Sims, K., Fornari, D., Saal, A. and Lyons, S. (2000): Vailulu'u undersea volcano: The New Samoa. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **1**, 2000GC000108.
- Hill, P.J. and Tiffin, D.L. (1993): Geology, sediment patterns, and widespread deformation on the sea floor off Western Samoa revealed by wide-swath imagery. *Geo-Marine Letters*, **13**, 116–125.
- Hirano, N. (2011): Petit-spot volcanism: A new type of volcanic zone discovered near a trench. *Geochemical Journal*, **45**, 157–167.
- Hirano, N., Kawamura, K., Hattori, M., Saito, K. and Ogawa, Y. (2001): A new type of intra-plate volcanism; Young alkali-basalts discovered from the subducting Pacific Plate, northern Japan Trench. *Geophysical Research Letters*, **28**, 2719–2722.
- Hirano, N., Yamamoto, J., Kagi, H. and Ishii, T. (2004): Young, olivine xenocryst-bearing alkali-basalt from the oceanward slope of the Japan Trench. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **148**, 47–54.
- Hirano, N., Takahashi, E., Yamamoto, J., Abe, N., Ingle, S.P., Kaneoka, I., Kimura, J.-I., Hirata, T., Ishii, T., Ogawa, Y., Machida, S. and Suyehiro, K. (2006): Volcanism in response to plate flexure. *Science*, **313**, 1426–1428.
- Hirano, N., Koppers, A.A.P., Takahashi, A., Fujiwara, T. and Nakanishi, M. (2008): Seamounts, knolls and petit spot monogenetic volcanoes on the subducting Pacific Plate. *Basin Research*, **20**, 543–553.
- 平野直人・阿部なつ江・町田嗣樹・山本順司 (2010): プ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**, 1–12. [Hirano, N., Abe, N., Machida, S. and Yamamoto, J. (2010): New insights into the oceanic lithosphere from petit-spot volcanoes and “Super-Mohole” project. *Journal of the Geological Society of Japan*, **116**, 1–12. (in Japanese with English abstract)]
- Hirano, N., Machida, S., Abe, N., Morishita, T., Tamura, A. and Arai, S. (2013): Petit-spot lava fields off the central Chile trench induced by plate flexure. *Geochemical Journal*, **47**, 249–257.
- Hirano, N., Nakanishi, M., Abe, N. and Machida, S. (2016): Submarine lava fields in French Polynesia. *Marine Geology*, **373**, 39–48.
- Karato, S. (1990): The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle. *Nature*, **347**, 272–273.
- Karato, S. and Jung, H. (1998): Water, partial melting and the origin of the seismic low velocity and high attenuation zone in the upper mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, **157**, 193–207.
- Kawakatsu, H., Kumar, P., Takei, Y., Shinohara, M., Kanazawa, T., Araki, E. and Suyehiro, K. (2009): Seismic evidence for sharp lithosphere-asthenosphere boundaries of oceanic plates. *Science*, **324**, 449–502.
- Konter, J.G. and Jackson, M.G. (2012): Large volumes of rejuvenated volcanism in Samoa: Evidence supporting a tectonic influence on late-stage volcanism. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **13**, Q0AM04, doi:10.1029/2011GC003974.
- Kuritani, T., Yoshida, T. and Nagahashi, Y. (2010): Internal differentiation of Kutsugata lava flow from Rishiri Volcano, Japan: Processes and timescales of segregation structures' formation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **195**, 57–68.
- Machida, S., Hirano, N. and Kimura, J. (2009): Evidence for recycled plate material in Pacific upper mantle unrelated to plumes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **73**, 3028–3037.
- Machida, S., Hirano, N., Sumino, H., Hirata, T., Yoneda, S. and Kato, Y. (2015): Petit-spot geology reveals melts in upper-most asthenosphere dragged by lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, **426**, 267–279.
- Mierdel, K., Keppler, H., Smyth, J.R., Langenhorst, F. (2007): Water solubility in aluminous orthopyroxene and the origin of Earth's Asthenosphere. *Science*, **315**, 364–368.
- Natland, J.H. (1980): The progression of volcanism in the Samoan linear volcanic chain. *American Journal of Science*, **280-A**, 709–785.
- Ohara, Y. (2015): The Godzilla Megamullion, the largest oceanic core complex on the earth: A historical review. *Island Arc*, **25**, 193–208.
- Okumura, S. and Hirano, N. (2013): Carbon dioxide emission to Earth's surface by deep-sea volcanism. *Geology*, **41**, 1167–1170.
- Papale, P., Moretti, R. and Barbato, D. (2006): The compositional dependence of the saturation surface of $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ fluids in silicate melts. *Chemical Geo-*

- logy, **229**, 78–95.
- Revenaugh, J.S. and Jordan, T.H. (1991): Mantle layering from ScS reverberations: 3. The upper mantle. *Journal of Geophysical Research*, **96**, 19781–19810, doi:10.1029/91JB01487.
- Ribe, N.M. and Christensen, U.R. (1999): The dynamical origin of Hawaiian volcanism. *Earth and Planetary Science Letters*, **171**, 517–531.
- Rychert, C.A. and Shearer, P.M. (2009): A global view of the lithosphere-asthenosphere boundary. *Science*, **324**, 495–498.
- Sakamaki, T., Suzuki, A., Ohtani, E., Terasaki, H., Urakawa, S., Katayama, Y., Funakoshi, K., Wang, Y., Hernlund, J.W. and Ballmer, M.D. (2013): Ponded melt at the boundary between the lithosphere and asthenosphere. *Nature Geoscience*, **6**, 1041–1044.
- Shimura, R. and Ozawa, K. (2006): Mechanism of crystal redistribution in a sheet-like magma body: Constraints from the Nosappumisaki and other shoshonite intrusions in the Nemuro Peninsula, Northern Japan. *Journal of Petrology*, **47**, 1809–1851.
- Sifré, D., Gardés, E., Massuyeau, M., Hashim, L., Hier-Majumder, S. and Gaillard, F. (2014): Electrical conductivity during incipient melting in the oceanic low-velocity zone. *Nature*, **509**, 81–85.
- Taneja, R., O'Neill, C., Lackie, M., Rushmer, T., Schmidt, P. and Jourdan, F. (2015): ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology and the paleoposition of Christmas Island (Australia), Northeast Indian Ocean. *Gondwana Research*, **28**, 391–406.
- Uenzelmann-Neben, G., Schmidt, D.N., Niessen, F., Stein, R. (2012): Intraplate volcanism off South Greenland: Caused by glacial rebound?. *Geophysical Journal International*, **190**, 1–7.
- Valentine, G. and Hirano, N. (2010): Mechanisms of low-flux intraplate volcanic fields - Basin and Range (North America) and Northwest Pacific Ocean. *Geology*, **38**, 55–58.
- Wang, D., Mookherjee, M., Xu, Y. and Karato, S. (2006): The effect of water on the electrical conductivity of olivine. *Nature*, **443**, 977–980.
- Warren, J.M. (2016): Global variations in abyssal peridotite compositions. *Lithos*, **248–251**, 193–219.
- Watts, A.B. and Zhong, S. (2000): Observations of flexure and the rheology of oceanic lithosphere. *Geophysical Journal International*, **142**, 855–875.
- Wessel, P. (1992): Thermal stresses and the bimodal distribution of elastic thickness estimates of the oceanic lithosphere. *Journal Geophysical Research*, **97**(B10), 14177–14193.
- Wyllie, P.J. (1988): Magma genesis, plate tectonics and chemical differentiation of the earth. *Reviews of Geophysics*, **26**, 370–404.
- Yamamoto, J., Hirano, N., Abe, N. and Hanyu, T. (2009): Noble gas isotopic compositions of mantle xenoliths from northwestern Pacific lithosphere. *Chemical Geology*, **268**, 313–323.
- Yamamoto, J., Korenaga, J., Hirano, N. and Kagi, H. (2014): Melt-rich lithosphere-asthenosphere boundary inferred from petit-spot volcanoes. *Geology*, **42**, 967–980.
- Yamamoto, M. and Morgan, J.P. (2009): North Arch volcanic fields near Hawaii are evidence favouring the restite-root hypothesis for the origin of hotspot swells. *Terra Nova*, **21**, 452–466.
- Yoshino, T., Matsuzaki, T., Yamashita, S. and Katsura, T. (2006): Hydrous olivine unable to account for conductivity anomaly at the top of the asthenosphere. *Nature*, **443**, 973–976.