

プチスポット溶岩及びマントル捕獲岩・捕獲結晶の地質学的・岩石学的研究 —太平洋プレートのアセノスフェアに至る地質断面構築を目指して—

石井輝秋¹・金子 誠²・平野直人³・町田嗣樹⁴・秋澤紀克⁵

¹静岡大学

²深田地質研究所

³東北大学

⁴千葉工業大学

⁵東京大学

Geological and petrological studies of the petit-spot lava, mantle xenolith and xenocryst
- Investigation on geological cross section of the Pacific Plate down to asthenosphere -

ISHII Teruaki¹, KANEKO Makoto², HIRANO Naoto³, MACHIDA Shiki⁴, AKIZAWA Norikatsu⁵

¹Shizuoka University

²Fukada Geological Institute

³Tohoku University

⁴Chiba Institute of Technology

⁵The University of Tokyo

要旨：プチスポット火山は、海洋プレートアセノスフェア由来のマグマ活動に起因するため、アセノスフェアに至る地球深部物質の入手が可能となった。水深 5000 m 以深にある貴重な試料の解析・採取方法の再検討を行う。A) 稀少な捕獲結晶の発見は従来岩石薄片観察や、岩石粉末からの鉱物分離が基本である。今回 X 線 CT スキャナー活用を試みる。B) 更なる探索：B1) 試料の大量採取には「かいめい」のパワーグラブの活用を提案する。B2) J-DESC の表層科学掘削プログラム (=SCORE) での「ちきゅう」による、100 m 掘削コアの火山灰の解析からプチスポット火山噴火過程を詳細化する。B3) 爆裂火口マールを有するプチスポット火山基部のプチスポットパイプの、「ちきゅう」によるノンライザー深海掘削を提案する。B4) 「ちきゅう」の掘削装置の改良；上方掘削可能コアバレルの新規開発・運用を提言する。B5) ハイテク仕様ドレッジを運用する。

キーワード：プチスポット火山、プチスポットパイプ、超深海底のマール、海洋プレート、マン
トル物質、アセノスフェア、X 線 CT スキャナー、パワーグラブ、「しんかい 6500」、「ちきゅう」、
深海掘削、SCORE

Abstract: Petit-spot volcano on the oceanic plate is unique volcano which can directly bring materials from oceanic asthenosphere. We would like to propose new research methods and sampling techniques for those materials recovered from the ocean floor more than 5000 m deep. A) X-ray CT scanner is used for finding very rare xenocrysts included in the volcanics, together with rock thin section observation as well as mineral separation from crushed whole rock powder. B) Sampling: B1) The power glove of R/V “Kaimei” may be very useful for geological mass sampling from deep sea bottom. B2) We can get 100 m long deep-sea cores drilled by R/V “Chikyu” with applying J-DESC’s SCORE (= Chikyu Shallow Core Program). Detailed petit-spot magmatism may be clarified on the basis of analysis of tephra, included in those cores. B3) We

propose non-riser deep sea drilling on petit-spot pipe by R/V “Chikyu” within deep sea maar crater. B4) We propose new development and operation of core barrel head with upward drilling capability for “Chikyu”.

B5) Japanese scientists have been improving the dredge systems with active introduction of high technique, for example, transponder system and deep-sea TV system.

Keywords: petit-spot volcano, petit-spot pipe, deep sea maar, oceanic plate, mantle material, asthenosphere, X-ray CT scanner, power glove, “Shinkai 6500”, “Chikyu”, ocean drilling, SCORE

1. はじめに

地球深部の物質科学的研究には、構成物質である岩石・鉱物の入手が不可欠である。陸上ではダイアトリウムを伴う火山の母岩及び捕獲岩・捕獲結晶が研究に供されてきた。例えば、島弧地殻をもつ日本列島では、アルカリ玄武岩マグマ活動による火山岩中の捕獲岩が、大陸地殻を持つアフリカ大陸ではキンバーライトマグマ活動による火山岩中の捕獲岩が研究対象として活用されてきた。

海洋プレート域では、ホットスポットマグマ活動による火山岩中の、マントル橄欖岩捕獲岩が知られているが、その成因を一義的に決めるのは困難であろう。しかし、近年海洋プレートアスノスフェア由来のプチスポットマグマ活動による火山（プチスポット火山）が発見され、海洋プレート域のホットスポットマグマ活動からの汚染を受けていない、地球深部物質の入手が可能となった。とは言え、プチスポット火山は水深 5000 m 以深にあるため、陸上火山調査に比べ困難が伴う。貴重な試料の採取・解析方法の検討を行おうと思う。

2. プチスポット火山

近年まで地球上における火成活動は (a) プレート拡大域火成活動, (b) プレート収斂域火成活動, (c) プレート内火成活動の三種に大別されて

きた。それぞれの活動の場は (a) 大洋中央海嶺や縁海のプレート拡大軸域, (b) 海洋プレートの沈み込みによる島弧及び陸弧性火成活動域, (c) ホットスポット域に対応する。2000 年代に入り地球上における第四種目の火成活動ともいえる新種の火成活動, 即ち (d) プチスポット火成活動が平野ほか (Hirano et al., 2001, 2006) により三陸沖の太平洋深海底で確認された (注: 発見され岩石が採取されたのは 1997 年, 後述)。

三陸沖の太平洋プレート年代は 130-135 Ma として周辺の大型海山の年代は 80-120 Ma であり, 同海域から新鮮な 10 Ma 以下 (1.8-8.5 Ma) の若い岩石の採取は驚きを持って迎えられた (例えば, 平野ほか, 2010 ; Hirano, 2011 ; 平野, 2017 ; 石井ほか, 2019)。ホットスポットとは無関係なプレート内火成活動で, 沈み込みに伴うプレート内応力変化により生じた, 太平洋プレート内の割れ目を通路として, アセノスフェア由来のマグマが上昇し海底に噴出した火山であるという考えを, 平野ほかの提出した図 (Hirano et al., 2001, Figure 7) から読み取ることが出来る。その後プチスポット火山は, 沈み込み帯のプレート屈曲に起因する火山として, 世界的に認知されるようになった (例えば, Hirano et al., 2013, 2016 ; 平野, 2017)。

3. 日本近海のプチスポット火山の分布域

日本海溝から伊豆・小笠原海溝にかけての,

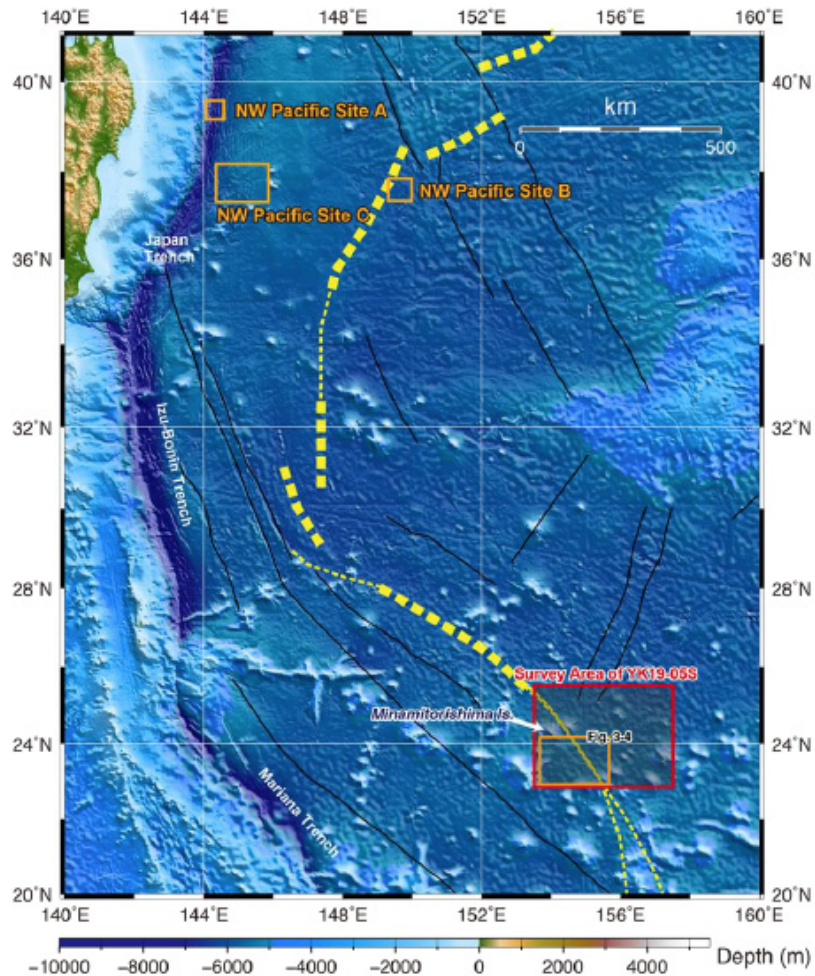


図 1 日本近海で平野・町田を中心としたグループにより調査研究されたプチスポット火山の分布域，東北日本沖海域 3 箇所 (Site A, B, C) 及び南鳥島海域 (Site D) を橙色の四角で示す．北西太平洋プレート沈み込み帯で，重力値がほぼ 0 ミリガル (Sandwell et al., 2014) のアウターライズ東端を黄色の太点線で示す．細い黒線は Nakanishi and Winterer (1998) による断裂帯を示す (Machida, 2019, Figure 3-3)．

沈み込み開始直前の北西太平洋プレート上には多数のプチスポット火山が分布している．平野・町田を中心としたグループにより，研究が進められている 4 つの海域は図 1 (Machida, 2019, Figure 3-3) に示されている．即ち，東北日本沖の Site A, B & C 海域及び南鳥島南東海域 (Site D 海域と仮称) である．

3.1 Site A 海域：プチスポット火山の発見

JAMSTEC の深海調査研究船「かいれい」

(4517 t, 106.0 m) は，最大潜航深度 11000 m ままで潜航調査可能な有索無人探査機「かいこう 11000」(通称 ROV「かいこう 10K」) の支援母船として 1997 年に建造された．

プチスポット火山は，東北日本海溝域の海底調査に臨んだ，KR97-11 研究航海 (=KR97-11 Cruise, 首席研究員 服部睦男) の，「ROV かいこう 10K」第 56 潜航調査 (=10K #56 Dive) の際に，岩手県宮古沖の北部日本海溝側斜面 (39° 23' N, 144° 16' E)，水深 7325 m-7360

m で偶然発見された (Hirano et al., 2001). これが世界で初めてのプチスポット火山の発見で, アルカリ玄武岩質の枕状溶岩と水冷破碎岩 (ハイアロクラスタイト) の互層から成る 35 m 以上に及ぶ露頭が観察された. 採取された岩石の $^{40}\text{Ar}\text{-}^{39}\text{Ar}$ 年代は $5.95 \pm 0.31 \text{ Ma}$ で, プレーートの動きを考慮すると, 噴出地点は発見場所から $612 \pm 32 \text{ km}$ 東南東 (37° N , 149° E) と推測された (Hirano et al, 2001). 発見場所及び推測された噴出地点はそれぞれ Site A 海域及び Site B 海域に含まれている. その後 2003 年に「かいこう 11000」のビークルは事故で失われ, 現在は「かいこう 7000」として運用されているため, 残念ながら発見場所への

有人又は無人潜水艇による再訪問は不可能となっている.

3.2 Site B 海域: プチスポット火山構造モデル

深海潜水調査船支援母船「よこすか」の YK05-06 研究航海 (首席研究員 平野直人) の, 「しんかい 6500」第 878 潜航調査 (=6K # 878Dive) の際に, Site B 海域の水深 5902 m でプチスポット火山産の巨礫試料 (試料番号 6K878R2) が S. Ingle により採取された (図 2). 試料は大量の CO_2 を含む (Okumura and Hirano, 2013) ために著しく発泡した玄武岩溶岩でマントル由来と思われる捕獲岩片・捕獲結晶を多数胚胎

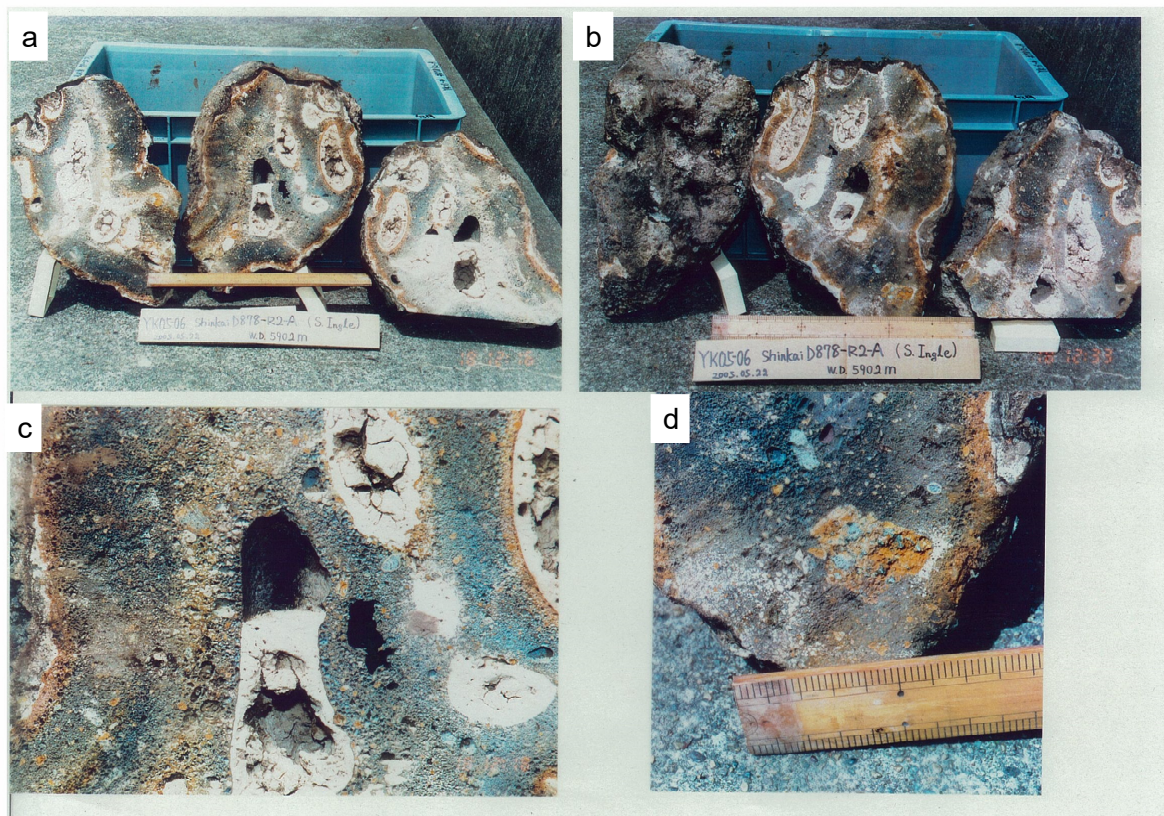


図 2 YK05-06 研究航海, 「しんかい 6500」第 878 潜航調査 (=6K #878Dive) の際に, Site B 海域の水深 5902 m で, S. Ingle により採取されたプチスポット火山産の巨礫試料 (試料番号 6K878R2) を, 厚さ約 10 cm の板状に切断し全体像を示す. 試料は著しく発泡した玄武岩溶岩でマントル由来と思われる捕獲岩・捕獲鉱物を多数胚胎している. (a) 気泡に流入した粘土の沈積で形成された面は, 噴出時の水平面と考えられ, 気泡はそれに垂直な方向へ連続している, (b) 水平面をほぼ保持しながら回転して得た試料の裏側の写真, (c) 写真 (a) 中央試料の拡大図. 噴出時の水平面及び上方へ連続する気泡に注目, (d) 写真 (b) 中央試料下部の拡大図. マントル橄欖岩と思われる捕獲岩に注目.

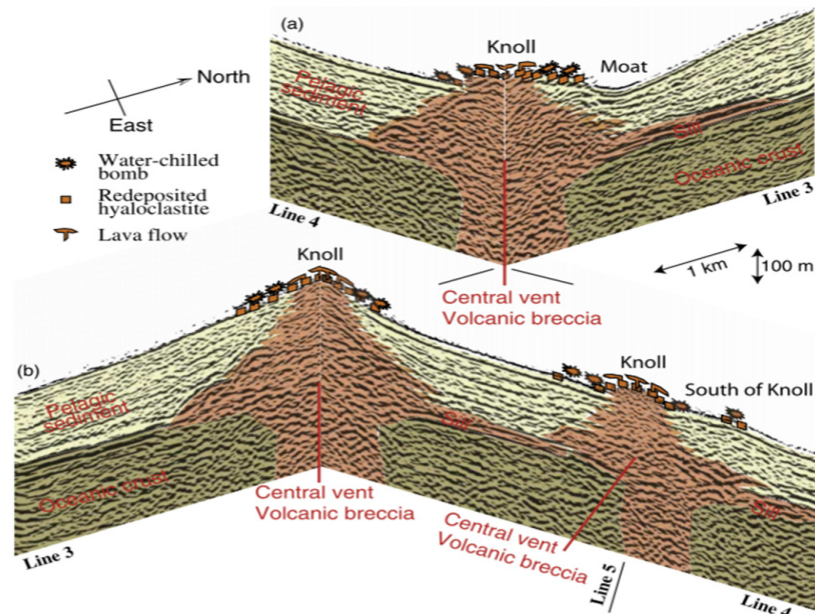


図 3 「かいいい」 KR05-10 航海, 及び「よこすか」 YK05-06 航海でのシングルチャンネル反射法地震探査, 更に「しんかい 6500」での観察を総合して得られた, Site B (図 1) 海域に分布するプチスポット火山の, 海底面下三次元構造モデル (Fujiwara et al., 2007, Figure 4) (本文参照)。

しており, 現在 X 線 CT スキャナーを用いて, 稀少鉱物の探索, 即ちジルコンやダイヤモンド (?) 等の稀少鉱物の発見・取り出し・解析を試みている (後述)。尚, この海域で採取された溶岩 (KR04-D08-017c) の薄片中にガーネット捕獲結晶が認められ, オフアキシス火成活動成因論が議論されている (Rochat et al., 2017)。

更にこの海域では「かいいい」 KR05-10 航海 (首席研究員 阿部なつ江) と「よこすか」 YK05-06 航海でシングルチャンネル反射法地震探査が実施されており, それに「しんかい 6500」での観察を総合して得られたプチスポット火山の, 海底面下を含む三次元構造モデル (図 3) が富士原等 (Fujiwara et al., 2007) により提出されている。

各山体は小規模 ($<1 \text{ km}^3$) な単成火山であり, 火口付近の厚さ 200-300 m の遠洋性軟泥質堆積物からなる海底面上には, 再堆積したハイアロクラスタイト, 水冷火山弾, 熔岩流が分布している。

海底下の堆積層中のプチスポット火山の山体は, あたかも海洋性玄武岩 (MORB) 層の上に乗る, 底面直径約 3 km を持つ円錐状の形状が想定されている。これは直径約 1 km の火道を上昇して来たプチスポットマグマが, MORB を突き抜けた直後に, 軟泥質堆積物中への噴火・貫入のために形成されたと考えられる。MORB 直上の堆積層との境界にはシル状貫入岩も認められる。モデル図からは, かつての火道は海底面からの深さ約 600 m 程度まで, 火山角礫岩で満たされている事が読み取れる。

3.3 Site C 海域: 超深海底の爆裂火口 (マール)

アウターライズ頂部を含む Site C 海域は福島県沖から宮城県沖に位置し, 多数のプチスポット火山の分布 (図 4) がみられ, 80 以上の山体が確認されている (Hirano et al., 2008, 2019)。超深海底

の爆裂火口（マール= maar）も発見されている（石井ほか 2019）。新青丸航海のドレッジサイト KS-18-9D01E 付近（図 4 の#4 の水深約 5500 m）に直径約 600 m の円形に近い輪郭を持つ盆状地形が読み取れ（図 5），これは陸上で典型的マールであると思われている男鹿半島の一ノ目潟に類似した地形を示す（石井ほか，2019，図 10 参照）。

プチスポット火山の岩石は、発泡度が高いことから噴火活動に際しては大量の火山灰の放出を伴うと考えられる。更に重要なことは、Site C 海域のプチスポット火山岩は成因の異なる 2 種類に大別されていることである（後述）。尚，最近 Site C 海域の西北端域の正断層に沿い、マンタル由来の流体上昇が確認されている（Park et al., 2021）。

3.4 Site D 海域：南鳥島南東海域

南鳥島周辺においても、プチスポット火山の存在が示唆され（及川・森下，2009），その調査研究のための「よこすか」YK10-05 研究航海（首席研究員 平野直人）で、「しんかい 6500」による 9 回の潜航調査が実施された。しかし残念ながら、プチスポット火山は 1 体の存在が確認されたにとどまった。幸い南鳥島周辺の日本の排他的経済水域（EEZ）内では、マンガンノジュールやレアアース泥等の海底資源採集を目的にした海洋調査が多数行われており（例えば，Machida et al., 2016；石井ほか，2016），海底の地形・

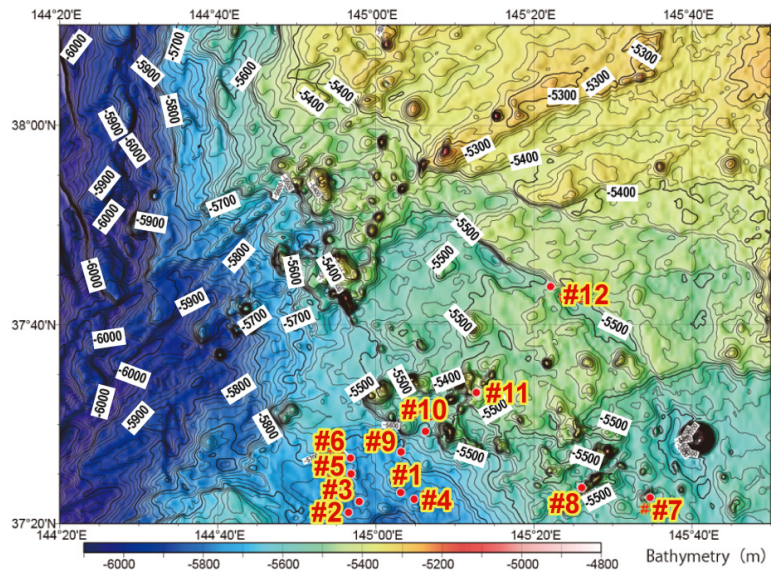


図 4 プチスポット火山の分布域（Site C）をしめす、海底地形図(Hirano et al., 2019, Figure 3-1). 赤丸#1-#12 は「新青丸」KS-18-09 航海でのドレッジ予定点を示す（等深線は 20 m 間隔）。プチスポット火山が高密度に分布している。

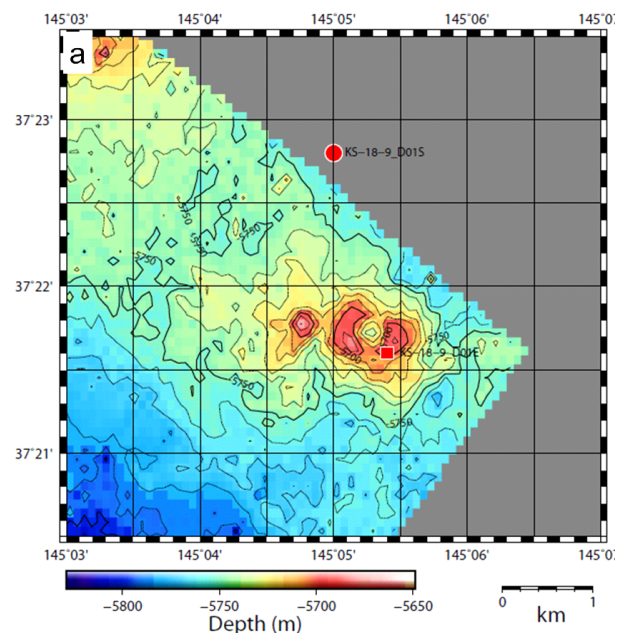


図 5 超深海底の爆裂火口（maar=マール）：図 4 のドレッジ予定サイト #04 付近海域の海底地形図 (Hirano et al., 2019, Figure 3-2)（等深線は 10 m 間隔）。KS-18-9_D01E 付近に直径約 600 m の円形に近い輪郭を持つマール（maar=爆裂火口）状地形が見られる。円形状の火口丘は水深約 5700 m（山頂は約 5690 m）で火口底は平坦で水深約 5730 m である。従って火口丘と火口底の高度差は約 40 m と見積もられる。

地質・物理の膨大な基礎的情報が集積されており、プチスポット火山調査にも活用されている（図6）。例えば図7に示すように、「よこすか」のサブボトムプロファイラー（Sub-Bottom Profiler＝SBP）記録では、海底面直下の音響的透明層は、軟泥又はマンガンノジュール分布域（a）には存在するが、溶岩又はマンガクラスト分布域

（b）には存在しないことが明確になった。この新たな知見は航海でのプチスポット溶岩調査の潜航地点選定に活用され、伏在溶岩（シル状に貫入したプチスポット溶岩）の分布が潜航調査前に予測できるようになり、町田嗣樹首席の YK18-08 及び YK19-05S 航海では多大な成果がえられた（Machida, 2018, 2019；石井ほか，2020）。

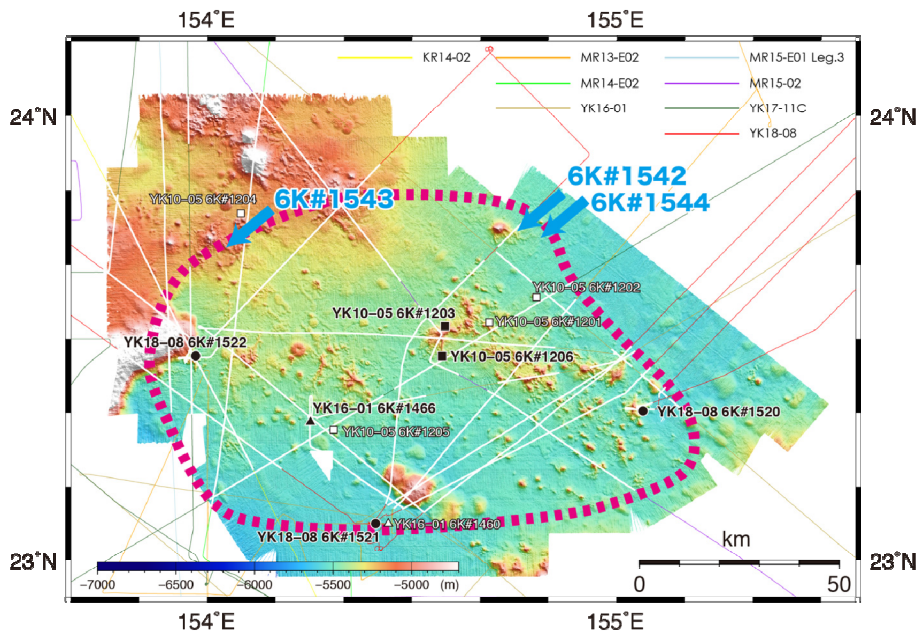


図6 南鳥島調査海域でのプチスポット火山の分布域（Site D）をしめす、YK10-05 航海の2地点（6K#1203&1206）と YK16-01 航海の2地点（6K#1460&1466）、及び YK18-08 航海3地点（6K#1520－1522）と YK19-05S 航海3地点（6K#1542－1544）で、プチスポット溶岩が確認されている。着色された直線は SBP データのある航跡で、KR は「かいれい」航海、MR は「みらい」航海を示す。航跡の途中の白色部は音響不透明層が海底に露出している部分を示し、シル状に貫入したプチスポット溶岩の存在を示唆している。溶岩の予想分布域を太い赤線枠で示す（Machida, 2019, Figure 3-4）。

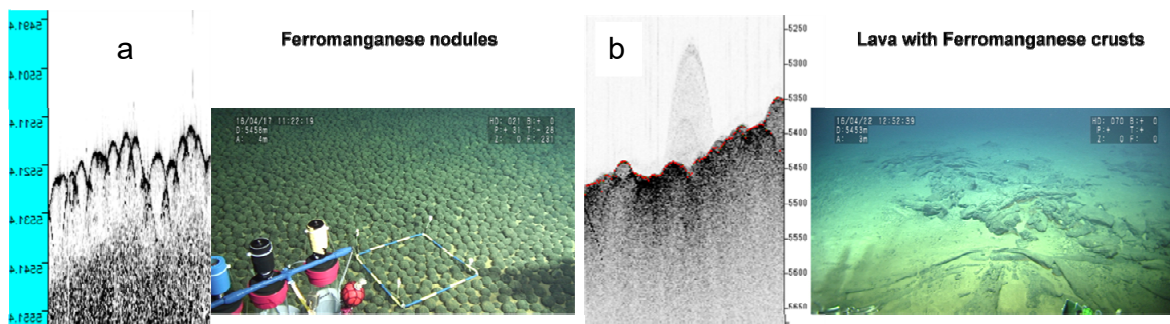


図7 「よこすか」の SBP 記録と底質との関係。海底面直下の音響的透明層は（a）軟泥又はマンガンノジュール分布域（a 図の右）には存在するが、（b）溶岩又はマンガクラスト分布域（b 図の右）には存在しない（Machida, 2019, Figure 3-5）。この関連性により「よこすか」の SBP 記録からシル状に貫入したプチスポット溶岩の存在を予測可能となった。

4. 2種類のプチスポット火山マグマ

平野・町田を中心としたグループの岩石学的研究により、プチスポットマグマはリソスフェアを形成する厚さ約 60~70 km の海洋プレート直下のマントルである、アセノスフェアに由来することが明確になってきた（例えば Hirano et al., 2001, 2006; Machida et al., 2009, 2015, 2017; Yamamoto et al., 2014; Sato et al., 2018）。

そしてプチスポット火山マグマは 2 種類（図 8）に分類されることが示された（Sato et al., 2018）。沈み込み直前の太平洋プレートの凹屈曲場産 indirectly ascending petit-spot の type I petit-spot（I 型プチスポット=IPS）と、凸屈曲場産 directly ascending petit-spot の type D petit-spot（D 型プチスポット=DPS）である（図 9）。

IPS 火山：プレートの凹屈曲場付近ではプレートの下部に伸張応力、上部に圧縮応力が働くため、プレート直下のアセノスフェアで発生したマグマ

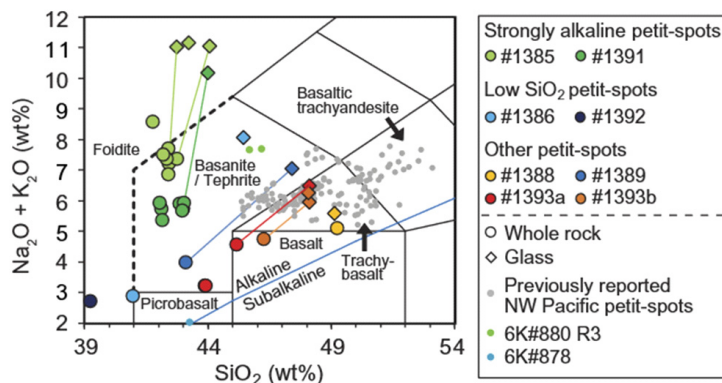


図 8 北東太平洋の東北沖及び南鳥島海域産、IPS 型プチスポット玄武岩（Hirano et al., 2006; Machida et al., 2015）と DPS 型プチスポット玄武岩（Sato et al., 2018）の全岩化学組成のアルカリ-シリカ図による比較（Sato et al., 2018, Figure 3）。緑色系は DPS 型玄武岩で、他の色は IPS 型プチスポット玄武岩を示す。大円は全岩組成を示し、それと直線で結ばれたダイヤモンド印はガラス部分の組成を示す。灰色の小円は IPS 型プチスポット玄武岩を示す（Machida et al., 2015）。尚、#に続く数字は「しんかい 6500」の潜航調査番号を示す。

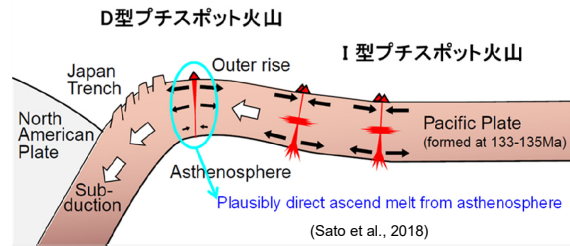


図 9 アセノスフェア由来プチスポットマグマの噴火モデル（Sato et al., 2018, Figure 7 に基づく Hirano et al., 2019 の図を改変）。プチスポット火山は IPS（indirectly ascending petit-spot）と DPS（directly ascending petit-spot）の 2 種に分類できる。黒矢印はリソスフェア内のストレス方向を示す。I 型プチスポット（= IPS）火山はプレートの凹屈曲場付近で噴出した火山であり、東北日本沖 Site A, B & C 海域及び南鳥島南東海域（Site D 海域）で確認されている。D 型プチスポット（= DPS）火山は福島県沖アウターライズ頂部のプレート凸屈曲場付近（Site C 海域）にのみ確認される特異な火山である（Sato et al., 2018）。

は、プレート下部を上昇し中部で滞留し、二次的マグマ溜まりを形成する。そこで結晶分化などの組成改変を受けた後に、噴出したマグマで形成さ

れたのが、I 型火山である。東北日本沖 Site A, B & C 海域及び南鳥島南東海域（Site D 海域）で確認されている。

DPS 火山：福島県沖アウターライズ頂部のプレート凸屈曲場付近（Site C 海域）にのみ確認される特異な火山である。一般論としてプレートの凸屈曲場付近ではプレートの上部に伸張応力、下部に圧縮応力が働くため、プレート直下のアセノスフェアに、たとえマグマが存在したとしても、上昇は困難であるが、福島県沖では日本海溝の屈曲（図 1）による応力変化により、プレート下部に達する断

層が生じ、マグマの上昇が可能になり、プレート直下のアセノスフェアで発生した始原的マグマが、途中滞留することなくプレート内の断層沿いに上昇、組成改変を受けずに、始原的マグマが直接噴出したと考えられている (Sato et al., 2018) . Site C 海域には、ほぼ現在地点 (プレート凸屈曲場) で活動した DPS 火山と、東部のプレートの凹屈曲場で以前に噴火した IPS 火山との両者が共存している。

5. 陸上に於ける地球深部構成岩石の研究

マントル物質を地表にもたらす地質過程は二つある。一つは比較的大規模 (km オーダー) なマントル物質の固体貫入と、二つ目はマントル起源マグマがもたらす溶岩に胚胎される、比較的小規模 (cm-m オーダー) なマントル物質の捕獲岩 (所謂, オリビンノジュール=オリビン団塊) や捕獲鉱物である。前者はアルプス型貫入型と呼ばれるもので、オフィオライトも含めて考えられている。後者は特定の陸上火山に伴うもので、プチスポット火山産マントル物質研究には後者の研究例が参考になると考えられる。

5.1 アルカリ玄武岩マグマ活動

日本列島における橄欖岩捕獲岩研究の地質学的側面は荒井章司 (荒井ほか, 2005) により、簡潔にまとめられている。島弧である日本では主に西日本の日本海側に分布するアルカリ玄武岩マグマ (注: 一の目潟はカルクアルカリ質マグマの活動による) の活動により形成された単成火山の溶岩中に胚胎されるマントル橄欖岩捕獲岩が研究対象となってきた。爆発的噴火により形成された火道は火山角礫岩で満たされており、ブレッチャーパイプと呼ばれている。地球深部構成岩石産捕獲

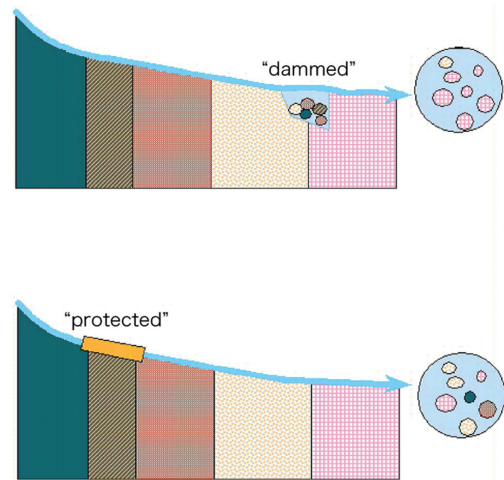


図 10 地球深部構成岩石産捕獲岩のマグマ上昇時の、河川礫モデル (荒井ほか, 2005)。河川を火道とみなすと、ダム (上図の “dammed”) はマグマ溜りに相当し、上流からのマントル橄欖岩等の重い岩片はダム (マグマ溜り) で沈積し、下流への流出 (マグマ上昇時の再昇時) はできないと考えられる。防御壁等 (下図の “protected”) のある河川は、補修済み火道 (繰り返し使用される複成火山の火道を想定) に相当しそこでの新たな捕獲岩片の取り込みは発生しない。従って上流部の地質体の研究には、ダムや防護壁の少ない数多くの河川からの河川礫の採取研究・探索が求められる。火山岩に胚胎される地球深部構成岩石由来捕獲岩研究には、同様の認識が望まれる。

岩片のマグマ上昇時の捕獲・運搬・沈積・噴出の概要は、荒井 (荒井ほか, 2005) の河川礫モデル (図 10) で説明される。これに倣うと、捕獲岩研究には多数の火山からの、大量の母岩を主体とする噴出物中から、捕獲物を探す必要があると理解される。

5.2 キンバーライト火山

アフリカ等の大陸プレート上に分布するキンバーライト火山は、大陸プレートアセノスフェア (深さ約 100-150 km) で深由来の、キンバーライトマグマ活動により形成された単成火山であり、代表的模式図を図 11 に示す。山体は上位から Crater, Diatreme, Root zone (又は facies) の 3 層に区分される。その主体はキンバーライトパイプと呼ばれる Diatreme zone (又は facies) であり、キ

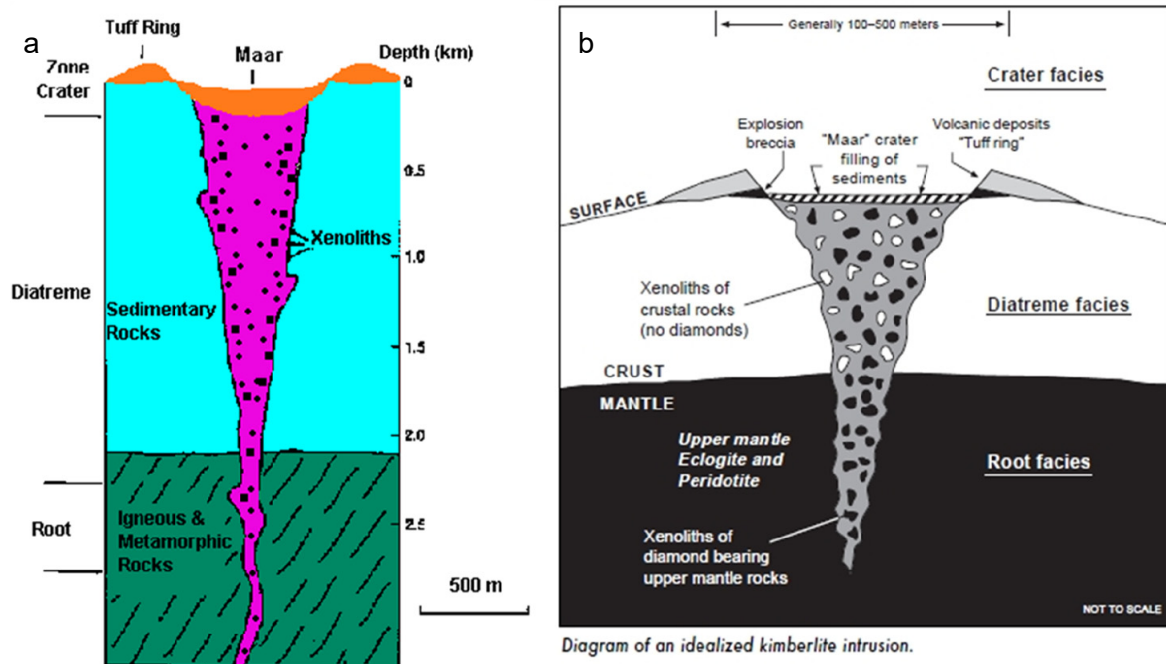


図 11 古い大陸プレート上にのみ存在する、キンバーライト火山のモデル図は数多く提案されているが、ここでは代表的な(a) Kirkley et al. (1991) と(b) Colorado Geological Survey(1999) の 2 例を示す。キンバーライトパイプは地表面から下部に向かってクレーターゾーン(Crater Zone)、ダイアトリウムゾーン (Diatreme Zone)、ルートゾーン(Root Zone) の 3 層(注: 図 11b では zone ではなく facies) に区分されている。プチスポットパイプも同様な 3 ゾーンに区分出来ると予想できる。キンバーライト火山の噴火口のマルクレーター (Maar Crater) は直径 100–500 m 程度と示されているが、深さ方向はモデルにより大きな差異がある。例えば、火山角礫岩から成るダイアトリウムゾーンは、モデル図 11a では 2 km 強程度、モデル図 11b では大陸地殻のマントル以深まで想定されている。プチスポットパイプのダイアトリウムゾーンの深さの検証が求められる。

ンバーライトマグマの発泡による火山角礫岩から成り、ダイヤモンド等のアセノスフェア由来物質や、マントル橄欖岩等の大陸プレート深部構成岩石・鉱物等を捕獲岩片・捕獲鉱物として胚胎している。地球深部物質を地表にもたらす稀有な火山で、大陸プレート構成物質の探索・研究には欠かせない地質体である。ダイヤモンド鉱山でのダイヤモンド含量は数億分の 1 であるため、ダイヤモンド選別後に発生する大量の岩屑は無価値な廃石(＝ずり)として扱われる。しかしずり山の中には地球科学的には価値の高い地球深部物質が捕獲岩片・捕獲鉱物として大量に含まれている。

上述したように、アルカリ玄武岩マグマやキンバーライトマグマの活動する陸域においては、

野外調査による目視観察により、研究に供する捕獲岩試料の選別・採取が可能である。ある程度訓練を積んだ研究者による目視観察は、広い露頭や大量な転石・廃石の中から貴重な研究試料を得るのには、大変効率的である。これ等の経験をプチスポット火山研究に生かしたい。

6. X線CTスキャナーでの鉱物同定の試み

プチスポット溶岩は捕獲岩・捕獲結晶を胚胎しており、各種研究に供されている(例えば Hirano et al., 2004; Yamamoto et al., 2009)。しかしながら従来から稀少な捕獲岩・捕獲結晶の発見は岩石薄片観察が基本である。例えば Site A 海域で採取された溶岩(YK05-06, 6K#880R20)の薄片

観察により、捕獲橄欖岩中からガーネット仮晶の存在が報告されている (Harigane et al., 2011). ここでは高知大学コアセンターの医療用 X 線 CT スキャナーを活用した試みを紹介する.

平野・町田等によるプチスポット火山研究には、主に「新青丸」, 「かいれい」のドレッジ、及び「よこすか」の有人潜水艇「しんかい 6500」で採取された岩石試料が供されている. 1 回の研究航海で採取されるプチスポット溶岩は 100 kg オーダーであり、それらに胚胎されるマンタル起源物質は極少量になる. 最近 JAMSTEC 船舶の運行日数が激減しており、新たな試料採取・探索方法を模索する必要がある. その試みを以

下に示す.

プチスポットの火山岩はマンタル由来の捕獲岩 (レルズライト, ハルツバージャイト, ダナイト等の橄欖岩) や捕獲鉱物 (柘榴石, 橄欖石, 頑火輝石, 透輝石, スピネル等) 及び地殻構成岩 (MORB, MORB 由来の粗粒玄武岩, 斑礫岩等) を胚胎していると考えられる. ほかにエクロジャイト, ジルコンやダイヤモンド (?), 更には未知の構成物の発見等も期待される. 母岩のプチスポット溶岩中に散在している, これらの捕獲物質を非破壊的に的確に, 確認・摘出するには X 線 CT スキャナー観察が有効であると考えられる.

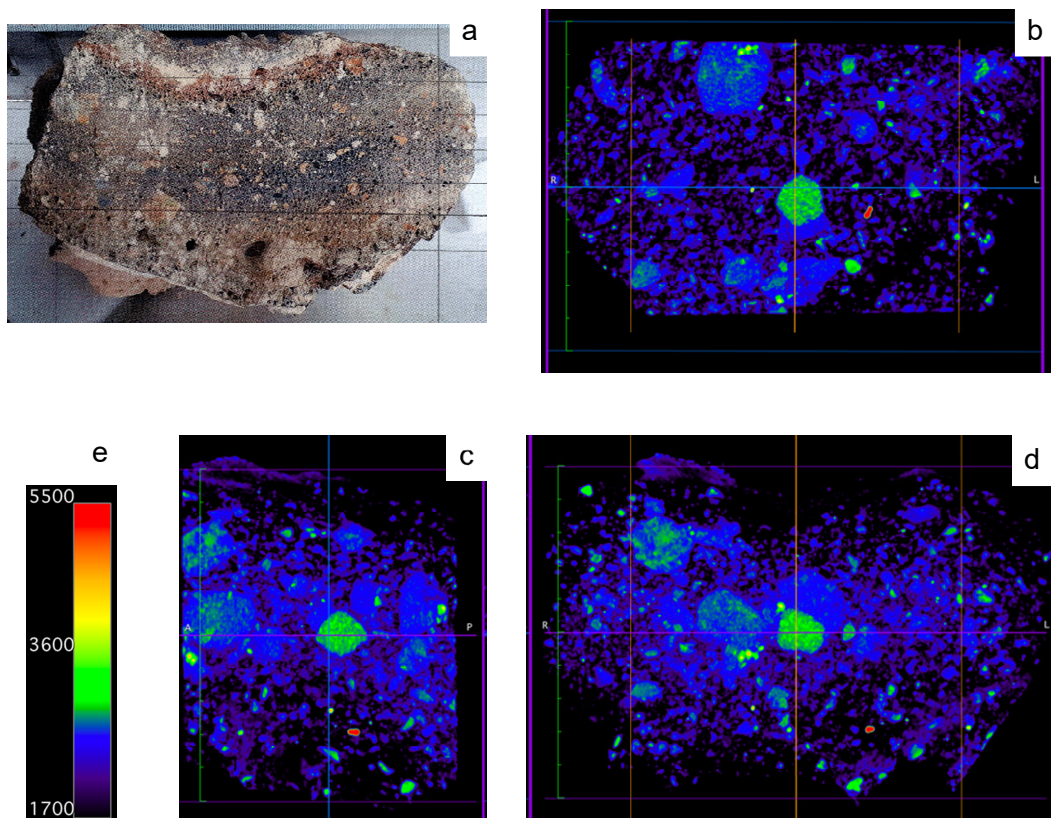


図 12 発泡したプチスポット火山岩中の捕獲岩・捕獲結晶の探索の試み. 図 2 に示したプチスポット火山岩試料 6K878R02 の一部の断面表層写真 (a), 及び X 線 CT スキャナーによる CT 値強度の疑似カラー写真 (b, c, d) を示し, その CT 値はカラーバー (e) により示される. 尚, 図 12a, b, c, d 中のスケールバーは 1 cm 刻みである. (d) は試料の平面投影, (b) は試料の立面投影, (c) は試料の長軸方向からの立面投影写真を示す. 重量約 1000 g の試料中に赤色で表示される高 CT 値 (高密度) の未詳物質 (α と仮称する) は 1 個体のみ確認できる.

YK05-06 (R/V「よこすか」2005 年第 6 次航海)で、東北沖 Site B 海域、水深約 5900 m から「しんかい 6500」により採取された試料 6K878R02 (図 2, 図 12a) は代表的な I 型プチスポット火山産岩石である。約 590 気圧という高水压下の海底に噴出したにも拘わらず、発泡度が高いのは炭酸ガス CO_2 の発泡によると説明されている (Machida et al., 2017)。捕獲岩や捕獲結晶を含んだ見かけの比重は、簡易測定によると約 1.4 であった。発泡前のプチスポットマグマの比重を約 2.7 とすると、発泡度は約 50% となる。即ち溶岩自身の見かけの密度は約 1.4 g/cc 以下と大変小さいために、人頭大試料でも人体医療用 X 線 CT 装置による内部観察が可能である (図 12b, 12c, 12d)。疑似カラー表示された、図 12 の CT 写真では、CT 値のカラーバー (e) に示すように、密度の小さい物質は濃い紫系、大きい物質程明るい赤系として表示されている。胚胎が期待されるマントル由来鉱物と地殻構成鉱物の比重は、比重の大きい順に次の 4 種に区別できる。ただし鉱物の比重は理科年表 (国立天文台, 1995) による。(グループ A) ジルコン 4.7, アルマンディンガーネット 4.0。(グループ B) パイロプガーネット 3.7, ダイヤモンド 3.6, スピネル 3.5。(グループ C) 苦土橄欖石 3.3, 透輝石 3.3, 頑火輝石 3.2。(グループ D) 斜長石 2.7+, 石英 2.7, 蛇紋石 2.6, ネフェリン 2.6, 等となる。

重量約 1000 g の試料中に赤色で表示される高 CT 値 (高密度) の未詳物質 (α と仮称する) は 1 個体のみ確認できる。胚胎が予想される鉱物の標準試料を同時測定し、X 線 CT 値と密度に関する半定量化を行い、未詳物質 α の絞り込みを行いたい。ただし試料 6K878R02 はアセノスフェアで発生したマグマがプレート中部で滞留した後に噴出した I 型プチスポット火山岩と見なされている

ため、アセノスフェア由来物質 (ダイヤモンド?) を胚胎する可能性は小さいと考えられる。平面写真 (d) の中心を原点とすると、 α の座標はおおよそ $X=2$, $Y=-3$, $Z=-1$ (単位は cm) で、この情報を基に、未詳物質 α の確実な取り出し方法を検討中である。

7. プチスポット火山及び火山岩の更なる探索

7.1 試料の大量採取の試み

R/V「かいめい」のパワーグラブの活用：一般的に陸上の多くのアルカリ性火山噴出により地表にもたらされるマントル橄欖岩ノジュール等の捕獲岩は地殻の地質条件に強く支配され则认为られている。例えば上昇してきたマグマが途中で滞留し二次的マグマ溜まりが形成されると、橄欖岩等の密度の大きい捕獲岩は、二次的マグマ溜まり下部に沈積し、地表への噴出は困難になるであろう。従って、陸上のアルカリ玄武岩の捕獲岩から、地下構造を推定するには、異なる地質条件の地域からの大量の捕獲岩試料採取が求められる (荒井ほか, 2005)。陸上調査の場合は母岩の露頭や転石から捕獲岩を肉眼で選別可能であるが、海底調査の場合はこれが不可能であるため、岩石や堆積物を含む大量の海底試料を採取し、捕獲岩を胚胎する岩石の選別を行う必要が生じる。大量海底試料採取の手段として JAMSTEC の海底広域研究船「かいめい」のパワーグラブ (JAMSTEC, 2021) が最適と考えられる (図 13)。プチスポット火山火口内での、「かいめい」のパワーグラブの積極的運用を提案したい。大量に採取する海底試料から捕獲岩含有試料を選別し、前述したごとく CT スキャン観察後に研究に供することにより、プレート断面構成物質に関する、新たな知見がもたらされると期待される。



図 13 JAMSTEC の海底広域研究船「かいめい」搭載 6 本爪型パワーグラブ (PGC) の全体写真 (JAMSTEC, 2021). 最大深度 6000 m 対応で、採取容量 (バケット容積) 約 1 m³ の岩石採取用巨大グラブ. BMS ウィンチに巻かれた光電気複合ケーブル (35.6 mmφ × 7000 m) を使用、搭載された 5 台の TV カメラで、海底を観察しながら、サンプリングが可能で、海底熱水鉱床調査 (例えば原口・児玉, 2007) に活用されている. 海底試料の大量採取には最適な装置であり、特にプチスポットマグマ由来のやや脆い火山角礫岩等の大量採取には、威力を発揮することが期待される.

7.2 表層科学掘削による噴火過程の解明

表層科学掘削プログラム (=SCORE) の活用 : J-DESC の SCORE プログラム概要 (J-DESC, 2021) には, “JAMSTEC の地球深部探査船「ちきゅう」を用いた表層科学掘削プログラム (Chikyu Shallow Core Program = SCORE) は, 「ちきゅう」を所有・運用する海洋研究開発機構 (JAMSTEC) と日本地球掘削科学コンソーシアム (Japan Drilling Earth Science Consortium = J-DESC) との共同プログラムです. 「ちきゅう」は, IODP のプラットフォームとして運用される一方, IODP 航海以外の科学掘削航海, 回航, 掘削機器の試験等でも海域に出る機会があります.

SCORE は, このような機会を有効に活用し, 短期間で実施できる海底表層の科学掘削 (ピストンコアリング) の提案を J-DESC 会員から広く募集し, データやサンプルを地球掘削科学コミュニティに提供する仕組みです” と述べられている. つまり「ちきゅう」の水圧式ピストンコアを活用し海底下 100 m までの掘削により, 堆積物コアの回収を図るプログラムである.

既に 3 航海が実施されており, 2021 年 8 月に 3 番目の航海として行われ, SCORE 航海 Chikyu Exp. 913 (首席研究者は高知大学の池原実) の船上レポートで航海の概要報告がなされている (J-DESC, 2021). ここで, 船上レポートに示された水圧式ピストンコアを図 14 に示す. 表層科学掘削プログラム (SCORE) によるプチスポット火山分布海域での掘削を提案したい. こうして得られる 100 m のコア中には, 近接するプチスポット火山の噴火に伴う複数枚の火山灰層が期待される. これらの解析からプチスポット火山群の詳細な噴火過程が明らかになると考えられる.

7.3 プチスポットパイプの検証と活用

R/V 「ちきゅう」によるノンライザー深海掘削 : プチスポット火山火口内での深海掘削 : 一般的に深海掘削においては, 固結した火山碎屑岩の掘削は溶岩の掘削に比べ格段に容易である. その具体例を次に示す. 米国の掘削船グロマーチャレンジャー号による 1978 年の国際深海掘削第 59 節航海 (Kroenke. et al., 1981) は筆者の一人 (T. I.) にとっては初の研究航海であった (Ishii, 1981 ; 石井, 2018). フィリピン海の九州 - パラオ海嶺上の Hole 448+448A 孔に於いて, 40 年も前の技術で, 一回のビット交換のみで, 914.0 m の枕状溶岩層を含む火山碎屑岩層を掘りぬくことができた (図 15).

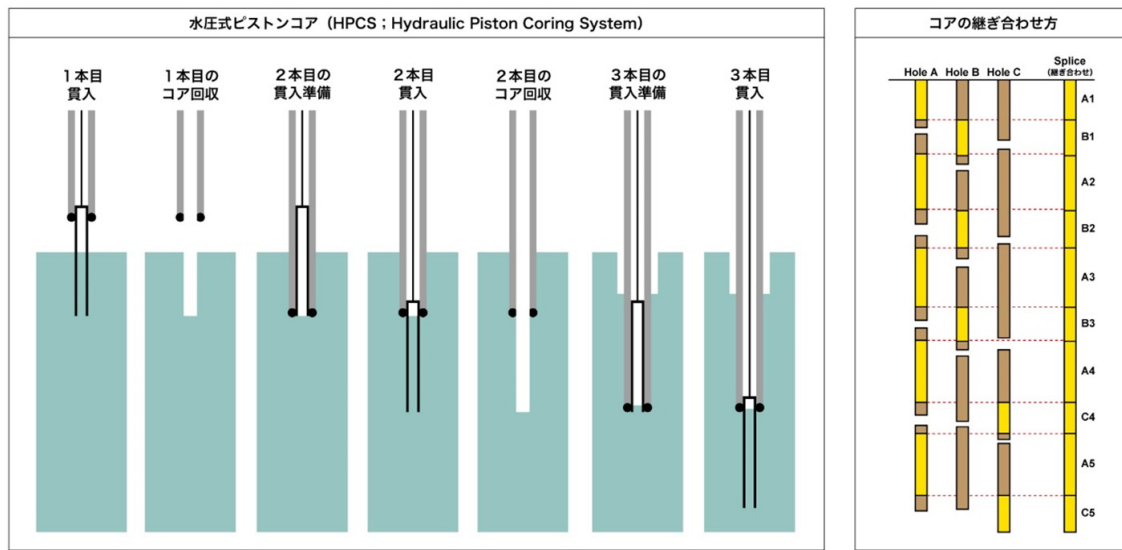


図 14 JAMSTEC の地球深部探査船「ちきゅう」の水圧式ピストンコア (HPCS ; Hydraulic Piston Coring System) の操作手順(J-DESC (2021), SCORE 航海 Chikyu Exp. 913 船上レポートによる)。(1) ドリルストリングスを海底面直上 50 cm 程度まで下し、水圧をかけて海底に筒状コアバレルを突き刺し (1 本目貫入)、(2) 筒状コアバレルを超高速度電動ウィンチで引き上げ、中にある堆積物を回収する (1 本目のコア回収)、(3) コアを取った長さの分掘り進む (2 本目の貫入準備、この場合掘削孔は多少ずれると考えられる?)、(4) 次の 2 本目の貫入を行い、(5) 2 本目のコア (最長 9.5 m) を回収し、(6) コアを取った長さの分掘り進む (3 本目の貫入準備)、(7) 次の 3 本目の貫入を行い、3 本目のコアを回収する。この作業を繰り返し、(8) 海底面から 100 m 掘削完了。欠損部のないコアを採取するには、図右の“コアの継ぎ合わせ方”にある様に、近傍で複数孔 (Hole A, Hole B, —) での掘削を行い、欠損部を補う必要がある。J-DESC の表層科学掘削プログラム (SCORE) による、プチスポット火山分布海域での掘削を提案したい。

一方プチスポット火山、取り分け爆裂火口 (マール=maar) を有するプチスポット火山の基部にはプチスポットパイプと称すべき火山角礫岩からなる地質体；ダイアトリウムが存在が予想できる。そしてその構成岩石である火山角礫岩は図 2a 及び図 12a に示すように、非常に多孔質である可能性が高いため、上記第 59 節の火山砕屑岩層と同様に、緻密な溶岩に比べ格段に容易に掘削可能と考えられる。そこでプチスポット火山火口内にリエントリーコーンを設置しての、R/V 「ちきゅう」による、ノンライザー深海掘削を提案したい。水深約 5500 m-6000 m の海底に散在している火口から、どの位深くまで多孔質玄武岩からなるプチスポットパイプが連続するかは不明であるが、「ちきゅう」の能力を最大限活用すれば、検証可能であろう。海底下 2000 m (条件が良け

れば約 3000 m-4000 m) の掘削も夢ではないであろう。掘削孔壁を貫いての斜め掘りが短時間で比較的容易にできる装置が開発され、数百メートル毎に地質構成岩石採取が可能に成れば尚望ましい。これぞ“プチスポットパイプを活用してのモホール計画”と言っても過言ではない。

7.4 掘削装置改良の提案：上方掘削可能コアバレルの運用

白鳳丸 KH80-3 航海 (Kobayashi, 1981) は、筆者の一人 (T. I.) が乗船した初のドレッジ (dredge) による海底岩石採取の長期航海であった (石井, 2018)。ホットスポット型海山、海台でのドレッジではマンガンノジュール、マンガンクラストは大量に採取されるものの、主目的の火成岩に関しては、変質した試料が採取されるのが

プチスポット溶岩及びマントル捕獲岩・捕獲結晶の地質学的・岩石学的研究
 -太平洋プレートのアセノスフェアに至る地質断面構築を目指して-

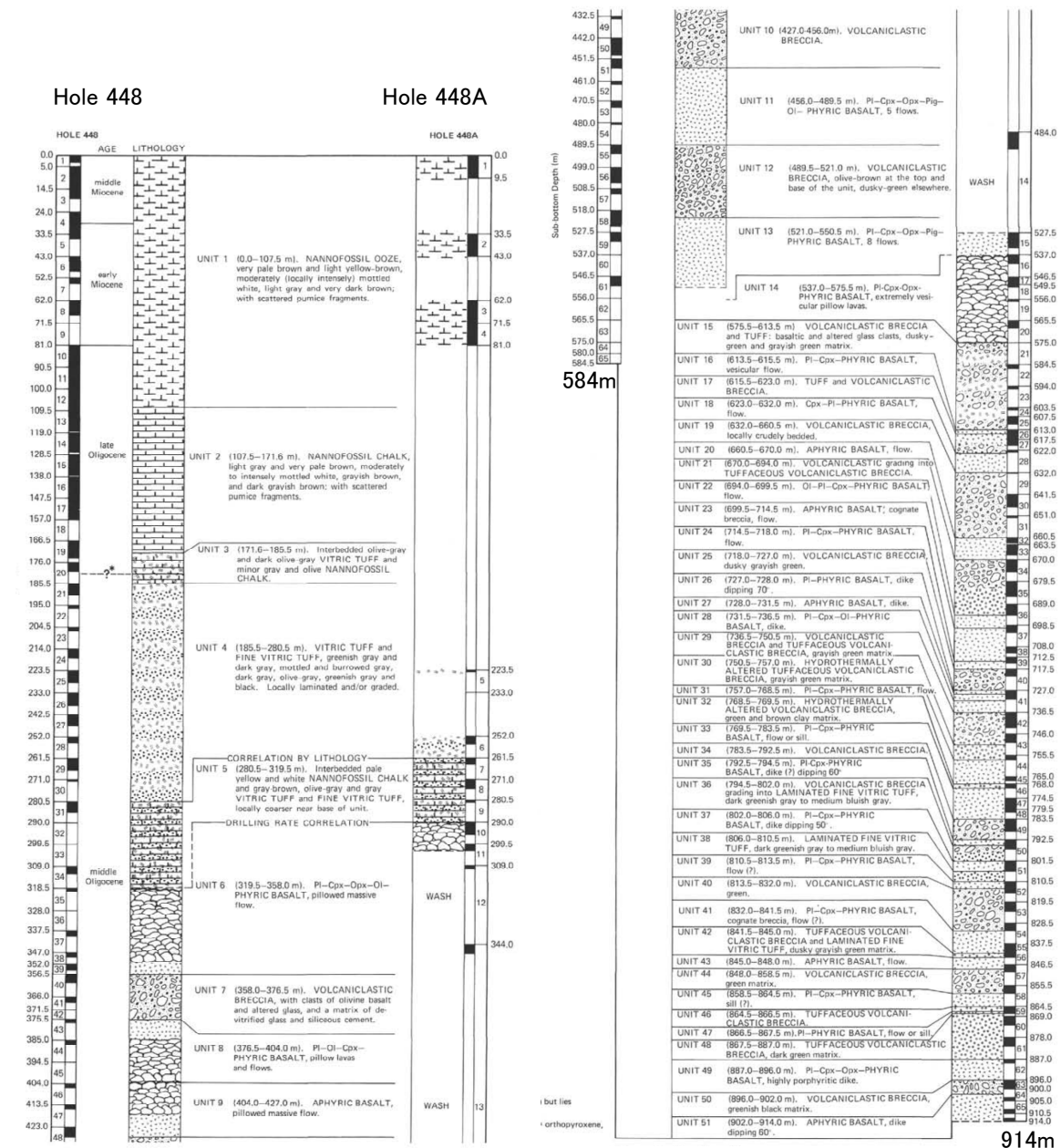


図 15 国際深海掘削第 59 節 Hole448+448A の掘削概念図. 1978 年に実施されたグロマーチャレンジャー号航海では、43 年も前の技術で、枕状溶岩層を含む火山砕屑岩層を、約 2 週間という短期間で 914.0 m まで掘りぬいた。先ず Hole448 でシングルビットによりコアを採取しながら 584 m まで掘削、ビット交換の後、近傍の Hole448A で、上位層は洗い流しつつ掘削し、約 527 m から 914.0 m までのコアを採取した (Kroenke et al., 1981, SITE 448, Figure 7 を改変)。この経験はプチスポット火山口内での火山砕屑岩掘削に生かせるであろう。

関の山であった (Ishii et al., 1981)。

火山岩岩石学者にとって新鮮な岩石の採取は野外調査の基本である。そんな折に杉村新・米倉伸之を主とする海外学術調査“中部太平洋におけ

る海面変動とテクトニクス”(通称ハイパック：HIPAC= Hydro Isostasy in the Pacific) が 1981 年に走り始めた (Sugimura, 1984)。新鮮な海山の岩石、即ち沈水前のホットスポット型海洋島の岩石

を求めての参加が認められ、火山岩研究及び、サンゴ礁掘削用軽量浅層ボーリング装置の開発・改良・運用に従事することになった(石井, 1987)。

掘削装置の改良：海外調査前の与論島等でのサンゴ礁では、草刈り機のガソリンエンジンをベースにした、鉋研試錐社製装置でサンゴ礁掘削に臨んだ。しかし、太さ 40 mm、長さ 1~2 m のサンゴ礁コアの採取がせいぜいで、コアバレルの回

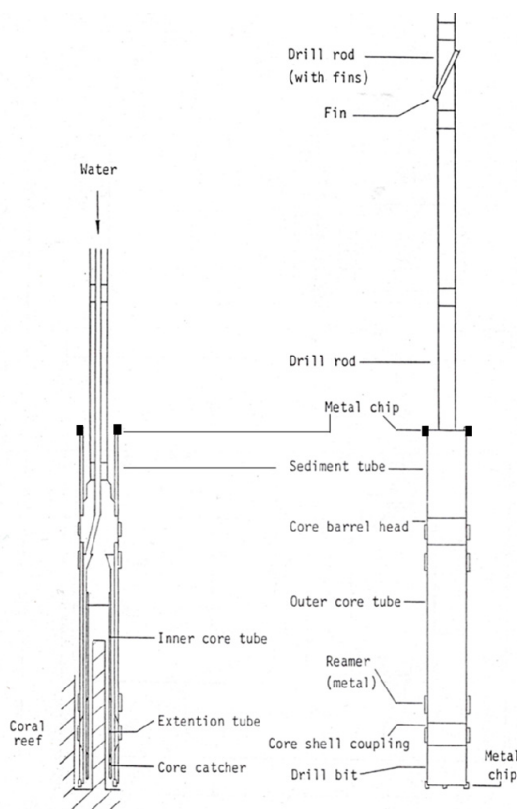


図 16 上方掘削可能コアバレルの開発・運用。杉村新・米倉伸之を主とする海外学術調査“中部太平洋における海面変動とテクトニクス”(通称ハイパック: HIPAC = Hydro Isostasy in the Pacific) ではサンゴ礁掘削用軽量浅層ボーリング装置の開発・改良・運用が行なわれた。新たに考案された上方掘削可能コアバレルは、通常のコアバレルヘッドの更に上部に、図に示すように、メタルチップ付きセグメントチューブを逆ねじで増設したものである(Ishii and Kayane, 1986)。その増設後はコアバレルの回収不能事故は一度も発生しなかった。R/V「ちきゅう」用の上方掘削可能コアバレルの開発・装着・運用を強く推奨する。ノンライザー掘削においてはこのコアバレルは特に威力を発揮するであろう。

収不可能な事態を複数回経験した。その原因は、ドリルストリングスを引き上げる際に、孔壁の崩落によりコアバレル上に落下した礫に阻まれ、コアバレルの回収が不可能になるためと推察された。

これを回避するための対策として、エンジンをチェーンソー仕様としパワーアップを図り、更に上方掘削可能コアバレルを考案した。後者はコアバレルヘッドの更に上部に、メタルチップ付きセグメントチューブ(図 16)を逆ねじで増設したものである(Ishii and Kayane, 1986)。この効果は絶大で、その後コアバレルの回収不能事故は一度も発生しなかった。即ち、揚収時には、セグメントチューブのメタルチップでの上方掘削により障害物を粉砕し、回収に至るためである。ドリルストリングスが回転している限り、即ち上方掘削が可能な限りコアバレルを無事揚収できることが実証された。ハイパックでのサンゴ礁最深掘削記録はクック諸島(Cook Islands)マンガイア島(Mangaia Island)掘削点 B での約 8 m(図 17)であった(Yonekura et al., 1986)。掘削用櫓無しの手保持による掘削としては、大成功であった。

上方掘削が可能なコアバレルは、コロンブスの卵で、言われてみれば万人が納得するであろう。

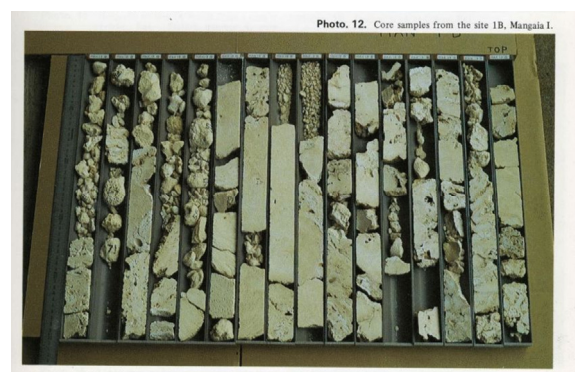


図 17 クック諸島(Cook Islands)マンガイア島(Mangaia Island)点 B での掘削コア試料の写真。半切されたコアは、約 50 cm 毎に右上から左下へ並べられている。全長約 8 m、直径約 40 mm でハイパックでのサンゴ礁最深掘削記録であった(Yonekura et al., 1986)。

浅層・中層・深層掘削そして陸域・海域を問わず、どんな掘削装置にも適用可能である。ここではジョイデスレゾリューション号や「ちきゅう」においても、上方掘削が可能なコアバレルの開発・装着・運用を強く推奨する。そのことにより、コアバレル回収不能事故の削減が期待される。特に R/V「ちきゅう」によるノンライザー掘削においては威力を発揮するであろう。

7.5 ハイテク仕様のドレッジシステムの活用

海底岩石試料採取には、ドレッジは最も基本的で不可欠な装置であるが、米国では技術的發展は見受けられない。幸いなことに日本では、東京大学、東海大学、JAMSTEC、科学博物館等で、ドレッジのハイテク化が進んでいる。即ちトランスポンダーのドレッジオペレーションへの活用、および深海カメラ付きドレッジシステムの運用が行われている（石井，2017，2018）。更に「しんかい 6500」用に開発された、新水中画像伝送装置（Kida, 2018）の小型化、廉価化が進めば、ドレッジ用深海ビデオカメラ画像送信にも、使用可能となるであろう。テレビモニターで海底観察しながらの、岩石採取ドレッジの運用を期待する。そうなれば、将来トランスポンダーを併用した、セミナビガブルドレッジも可能になるであろう。

8. おわりに

平野によるプチスポット火山発見の論文（Hirano et al., 2001）の後の、Science 誌の論文（Hirano et al., 2006）によりプチスポット火山は汎世界的に認知されることとなった。その後の平野、町田を中心とする一連の研究は、日本発の独創的研究として、世界に発信され続けている。プチスポット火山・海洋プレートアセノスフェア由

来マグマ・海洋プレート深部岩石・鉱物（マントル橄欖岩、捕獲結晶）・超深海底のマール・プチスポットパイプ・海洋プレート-アセノスフェア境界の変遷等に関する研究は、地球科学上の世界的大発見を基盤とした貴重な研究と考えられる。是非今後も研究を極め、世界に発信し、地球科学の発展に貢献したい。そのためには関係諸機関・研究者諸氏の御協力無しには達成は有り得ません。今後ともご協力を宜しく申し上げます。

本報告は、主に石井と金子が取りまとめを行ったものである。従って一切の不具合の責任は石井に帰せられる。

（石井の連絡先：ishiiteruaki@hotmail.com）。

謝辞

研究船の運用にあたっては東京大学大気海洋研究所（AORI）及び海洋研究開発機構（JAMSTEC）の船舶及び陸上関係者の方々にお世話になりました。CT スキャンに関しては、高知大学海洋コア総合研究センター（共同利用研究、採択番号：19A046，19B042，20A042，20B039）で分析させて頂き、関係者の方々にお世話になり、更に同所の池原実氏に SCORE 情報を頂きました。岩石試料観察・研究には東京大学大気海洋研究所共同利用研究（受付番号 120，2019，受付番号 114，2020）で、柏地区へ度々訪問する機会を持ち得たことが役立っています。更に、J-DESC の方々及び JAMSTEC 運用部の方々には船舶ハードウェアに関しての情報提供・御教示を頂きました。以上の方々に心より厚く御礼申し上げます。

文献

荒井章司・平井寿敏・阿倍なつ江（2005）：かん

- らん岩捕獲岩の地質学的側面：日本列島の例。
岩石鉱物科学, **34**, 133-142.
- Colorado Geological Survey (1999): COLORADO DIAMONDS. *Rock Talk*, **2** (3), 1-12.
- 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.
- 原口 悟・児玉敬義 (2007)：沖縄トラフの海底熱水鉱床。地質ニュース, **634**, 10-14.
- 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.
- Hirano, N. (2011): Petit-spot volcanism: A new type of volcanic zone discovered near a trench. *Geochemical Journal*, **45**, 157-167.
- 平野直人 (2017)：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。地学雑誌, **126** (2), 195-206.
- 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 一超モホール計画の提案一。地質学雑誌, **116**, 1-12.
- 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., 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.
- 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., Machida, S., Ishii, T., Akizawa, N., et al. Kaneko, M., et al. (2019): *KS-18-9, R/V SHINSEI Onboard Report "Distribution of petit-spot submarine volcanoes along the deformation of tectonic plate"*. Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI), Kashiwa, Univ. of Tokyo, 60pp.
- Hirano, N., Nakanishi, M., Abe, N. and Machida, S. (2016): Submarine lava fields in French Polynesia. *Marine Geology*, **373**, 39-48.
- Hirano, N., Takahashi, E., Yamamoto, J., Abe, N., Ingle, S. P., Kaneoka, I., Kimura, J., Hirata, T., Ishii, T., Ogawa, Y., Machida, S. and Suyehiro, K. (2006): Volcanism in response to plate flexure. *Science*, **313**, 1426-1428.
- 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 Mineral. and Petrol.*, **148**, 47-54.
- Ishii, T. (1981): Pyroxene geothermometry of basalts and an andesite from the Palau-Kyushu and West Mariana Ridges, Deep Sea Drilling Project Leg 59. *In Init. Rep. Deep Sea Drilling Project*, US Gov. Printing Office, Washington, D.C., **59**, 693-707.
- 石井輝秋 (1987)：海山・海洋島の分類，上下動とその一生 一海山，海洋島にオリビン団塊を求めて一。月刊地球, **9**, 542-549.
- 石井輝秋 (2017)：ドレッジシステムのローテクからハイクテクへの変革 一海底物質科学研究の飛躍を目指して一，深田地質研究所年報, **18**, 29-48.
- 石井輝秋 (2018)：研究航海の実際と野外自然科学 一グローマー・チャレンジャー号と白鳳丸

- 航海一. 深田地質研究所年報, **19**, 23-50.
- 石井輝秋・金子 誠・平野直人・町田嗣樹・松本 亜沙子・秋澤紀克・佐藤勇輝 ほか (2019): 「新青丸」KS-18-9 航海, プチスポット火山ドレッジ研究速報と展望: 一歴史的発見: 東北沖太平洋超深海底の爆裂火口 (マール) ー. 深田地質研究所年報, **20**, 105-128.
- 石井輝秋・金子 誠・町田嗣樹・金子純二・浅見 慶志朗・平野直人・秋澤紀克・ほか (2020): 「よこすか」「しんかい 6500」YK18-08, YK19-05S 研究航海の概要 ー南鳥島海域プチスポット火山の「しんかい 6500」潜航研究速報ー. 深田地質研究所年報, **21**, 103-126.
- Ishii, T. and Kayane, H. (1986): Improved coral drilling-sampler (HIPAC-CDS-2). In *Sea-level changes and tectonics in the Middle Pacific (Report of the HIPAC Project in 1984 and 1985)*, edited by A. Sugimura, Earth Science, Kobe University, 29-41.
- Ishii, T., Konishi, K. and Omura, A. (1981): Description of samples, In *Preliminary Report of the Hakuho Maru Cruise KH80-3*, edited by K. Kobayashi, 105-163, Ocean Res. Inst., Univ. of Tokyo.
- 石井輝秋・町田嗣樹・飯島耕一・山本浩文・野崎 達生・ほか (2016): 「よこすか」「しんかい 6500」YK16-01 研究航海の概要 ー南鳥島海域 E EZ 内マンガンノジュール広域調査の潜航研究速報ー. 深田地質研究所年報, **17**, 1-28.
- JAMSTEC (2021): 「パワーグラブ」利用の手引き (2021 年 2 月改訂版). 10pp, https://www.jamstec.go.jp/mare3/j/boarding/guide_ship/. (2021 年 8 月 25 日 参照)
- J-DESC (2021): 「ちきゅう」を用いた表層科学掘削プログラム (SCORE), 船上レポート: (SCORE 航海 Chikyu Exp.913, 船上レポート 1-6 プログラム概要. http://www.j-desc.org/about_us/ about-iodp/score/. (2021 年 8 月 25 日参照)
- Kida, Y., Deguchi, M. and Shimura, T. (2018): Experimental result for a high-rate underwater acoustic communication in deep sea for a manned submersible SHINKAI 6500, *J. Marine Acoust. Soc. Jpn.*, **45**(4), 197.
- Kirkley, M. B., Gurney, J. J. and Levinson, A. A. (1991): Age, Origin, and emplacement of Diamonds: Scientific Advances in the last Decade. *Gems and Gemology*, Gemological Inst. of Amer., **27** (1), 2-25.
- Kobayashi, K. (1981): *Preliminary report of The Hakuho Maru Cruise KH80-3*, edited by K. Kobayashi, Ocean Res. Inst., Univ. of Tokyo, 209pp.
- 国立天文台 (1995): 地学部, 地質および鉱物, おもな鉱物. 732-745, 国立天文台編理科年表 (平成 7 年), 1046pp, 丸善, 東京・日本橋.
- Kroenke, L., Scott R., ----, Ishii T., et al. (1981): *Initial Report of the Deep Sea Drilling Project, Volume 59. DSDP Leg 59 Participating Scientists*, US Gov. Printing Office, Washington, D.C., USA, 820pp,
- Machida, S. (2018): Evolution of the Lithosphere-Asthenosphere Boundary: *A new and dynamic picture of the solid Earth, R/V Yokosuka YK18-08 Cruise Report Part II*, 51-67, 及びクルーズサマリー (日) (英), http://www.godac.jamstec.go.jp/catalog/doc_catalog/metadataDisp/YK18-08_all. (2020 年 8 月 25 日 参照).
- Machida, S. (2019): Understanding the nature of Lithosphere-Asthenosphere Boundary and Plate flexure by petit-spot volcanism, *R/V Yokosuka YK19-05S Cruise Report*, 1-17, 及びクルーズサマリー (日) (英), http://www.godac.jamstec.go.jp/catalog/doc_catalog/metadataDisp/YK19-05S_all (2020 年 8 月 25 日 参照).
- Machida, S., Fujinaga, K., Ishii, T., Nakamura, K.,

- Hirano, N. et al., (2016): Geology and geochemistry of ferromanganese nodules in the Japanese Exclusive Economic Zone around Minamitorishima Island. *Geochemical Journal*, **50**, 539-555.
- Machida, S., Hirano, N. and Kimura, J. (2009): Evidence for recycled plate material in Pacific upper mantle unrelated to plumes. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **73**, 3028-3037.
- Machida, S., Hirano, N., Sumino, H., Hirata, T., et al. (2015): Petit-spot geology reveals melts in uppermost asthenosphere dragged by lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, **426**, 267-279.
- Machida, S., Kogiso, T. and Hirano, N. (2017): Petit-spot as definitive evidence for partial melting in the asthenosphere caused by CO₂. *Nature Comm.*, **8**, 14302, doi:10.1038/ncomms14302.
- Nakanishi, M. and Winterer, E. L. (1998): Tectonic history of the Pacific-Farallon-Phoenix triple junction from Late Jurassic to Early Cretaceous: An abandoned Mesozoic spreading system in the Central Pacific Basin. *J. Geophys. Res.*, **103**, 12453-12468.
- 及川光弘・森下泰成 (2009) : 北西太平洋・南鳥島東方海域における海底地形. 海洋情報部研究報告, **45**, 13-22.
- Okumura, S. and Hirano, N. (2013): Carbon dioxide emission to Earth's surface by deep-sea volcanism. *Geology*, **41**, 1167-1170.
- Park, J. O., Takahata, N., Ehsan Hondori, E. J., Yamaguchi, A., Kagoshima, T., Tsuru, T., Fujie, G., Sun, Y., Ashi, J., Yamano, M. and Sano, Y. (2021): Mantle-derived helium released through the Japan Trench bend-faults. *Scientific Reports*, URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-91523-6>. (2021年8月25日 参照)
- Rochat, L., Pilet, S., Müntener, O., Duretz, T., Baumgartner, L., Abe, N. and Hirano, N. (2017): Garnet xenocryst from petit-spot lavas as an indicator for off-axis mantle refertilization at intermediate spreading ridges. *Geology*, **45** (12), 1091-1094.
- Sandwell, D. T., Müller, R. D., Smith, W. H. F., Garcia, E. and Francis, R. (2014): New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, **346**, 65-67.
- Sato, Y., Hirano, N., Machida, S., Yamamoto, J., Nakanishi, M., Ishii, T., Taki, A., Yasutaka, K. and Kato, Y. (2018): Direct ascent to the surface of asthenospheric magma in a region of convex lithospheric flexure. *Int'l Geol. Rev.*, **60**, 1231-1243, doi: 10.1080/00206814.2017.1379912.
- Sugimura, A. (1986): *Sea-level changes and tectonics in the Middle Pacific (Report of the HIPAC Project in 1984 and 1985)*, edited by A. Sugimura, Earth Science, Kobe University, 126pp.
- 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.
- Yonekura, N., Ishii, T., Saito, Y., Matsumoto, E., and Kayanne, H. (1986): Geologic and geomorphic development of Holocene fringing reefs of Mangaia Island, the South Cooks. In *Sea-level changes and tectonics in the Middle Pacific (Report of the HIPAC Project in 1984 and 1985)*, edited by A. Sugimura, Earth Science, Kobe University, 44-67.