

# プチスポットパイプのライザーレス掘削で海洋マントル採取に挑む — 地球深部探査船「ちきゅう」による新モホール計画 —

石井輝秋<sup>1</sup>・金子 誠<sup>2</sup>・平野直人<sup>3</sup>・町田嗣樹<sup>4</sup>・秋澤紀克<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学

<sup>2</sup> 深田地質研究所

<sup>3</sup> 東北大学

<sup>4</sup> 千葉工業大学

<sup>5</sup> 東京大学

## Riser-less drilling through the petit-spot pipe to recover oceanic mantle — New Project Mohole using the deep sea drilling vessel (D/V) CHIKYU —

ISHII Teruaki<sup>1</sup>, KANEKO Makoto<sup>2</sup>, HIRANO Naoto<sup>3</sup>, MACHIDA Shiki<sup>4</sup>, AKIZAWA Norikatsu<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Shizuoka University

<sup>2</sup> Fukada Geological Institute

<sup>3</sup> Tohoku University

<sup>4</sup> Chiba Institute of Technology

<sup>5</sup> The University of Tokyo

要旨：海洋科学掘削 60 年を振り返り、新たなマントル採取掘削を提案する。A: プチスポット火山のアルカリ玄武岩質マグマは海洋プレートアセノスフェア（海底下約 60km）で発生し、モホ面（同約 6km）を通過し上昇、深海底に発泡著しいシル・溶岩・火山角礫岩（比重約 1.4）として産する。B: プチスポット火山の中には、水深約 5500m で超深海底のマール(Maar Crater)を呈し、キンバーライトパイプに類似する深部構造であるプチスポットパイプの存在を予測させる山体がある。C: 火道であるプチスポットパイプは、マグマ上昇により広域応力解消と堅牢な孔壁を獲得した結果、マントルに至る天然のケーシングを有する、ほぼ垂直なトンネルを形成している可能性がある。D: 地球深部探査船「ちきゅう」の 12000m ドリルパイプによる、掘削が容易な火山角礫岩から成るプチスポットパイプのライザーレスマントル採取掘削（および上方掘削可能コアバレルの活用）を提案する。試料採取は後日の横掘り枝掘りとする。

キーワード：海洋科学掘削，超深海底のマール，プチスポットパイプ，地球深部探査船「ちきゅう」，ライザーレスマントル掘削，12000m ドリルパイプ，上方掘削可能コアバレル

Abstract: On the basis of a review on 60 years of Scientific Ocean Drilling, we propose a new mantle drilling. A: Alkaline basaltic magma of petit-spot volcano is generated in the oceanic plate asthenosphere (approximately 60km below the seafloor), passes through the Moho discontinuity (approximately 6km below the seafloor), and rises to erupt and erupts as sills, lavas, and volcanic breccia (with a density of about 1.4) on the deep seafloor. B: Among petit-spot volcanoes, there is a volcanic edifice showing an ultra-deep-sea Maar Crater, at about 5500m depth, suggesting the existence of the Petit-Spot Pipe, or a deep structure similar to the Kimberlite Pipe. C: The Petit-Spot Pipe, which is a volcanic vent, may have formed a nearly vertical tunnel with a natural casing down to the mantle, as a result of gaining regional stress relief and robust walls due to ascent of magmas. D: We propose riser-less mantle drilling (and the utilization of core barrels that can drill upwards) on the petit-spot pipe filled with volcanic breccia, which

is easy to drill, using a 12000 m drill pipe of the deep-sea drilling vessel (D/V) Chikyu. Sampling will be carried out by lateral drilling, later.

Keywords: scientific ocean drilling, ultra-deep-sea maar, petit-spot pipe, deep-sea drilling vessel (D/V) Chikyu, riser-less mantle drilling, 12000 m drill pipe, upward drillable core barrel

## 1. はじめに

本格的海洋科学掘削は海洋マントル採取を目的に、1961年に米国のモホール計画として開始された。その後1968年に米国の掘削船グローマー・チャレンジャー号、1985年に米国の掘削船ジョイデス・レゾリューションへと引き継がれ、2005年に地球深部探査船「ちきゅう」の運用が開始された。上記3船を主とする海洋科学掘削は、地球科学・自然科学発展の上で大きく貢献してきた。マントル掘削の観点では、米国船によるライザーレス掘削で海底下約2kmが最深である。地球深部探査船「ちきゅう」は、日本周辺海域でのライザーおよびライザーレス海洋科学掘削により大きな成果を上げているが、現在のマントル掘削候補地3点はいずれも水深が約4000mで、4000m級ライザーパイプ入手の目途は立っていない。一方、ドリルパイプは約12000mの運用がほぼ達成された。そこでマントル掘削の目標としての可能性を秘めた“プチスポットパイプのライザーレス掘削で海洋マントル採取に挑む”ことを検討したい。

## 2. マントル採取を目指して

海洋科学掘削は1950年代から米国を中心に検討され、本格的掘削は海洋マントル採取を目的に、1961年米国でウォルター・ムンクほかによるモホール計画として開始されたが、1966年には主

に資金問題から終了せざるを得なくなった。アポロ計画とかち合ったことは、大変な不幸であったと言わざるを得ない。

1968年に掘削船グローマー・チャレンジャー (Glomar Challenger) 号による深海掘削計画 (Deep Sea Drilling Program : DSDP) が米国で開始された。日本は1975年から国際深海掘削計画 (International Phase of Ocean Drilling : IPOD) に、参加することとなった。筆者 (T. I.) には、その頃奈須紀幸先生が中野区南台の旧海洋研究所で開

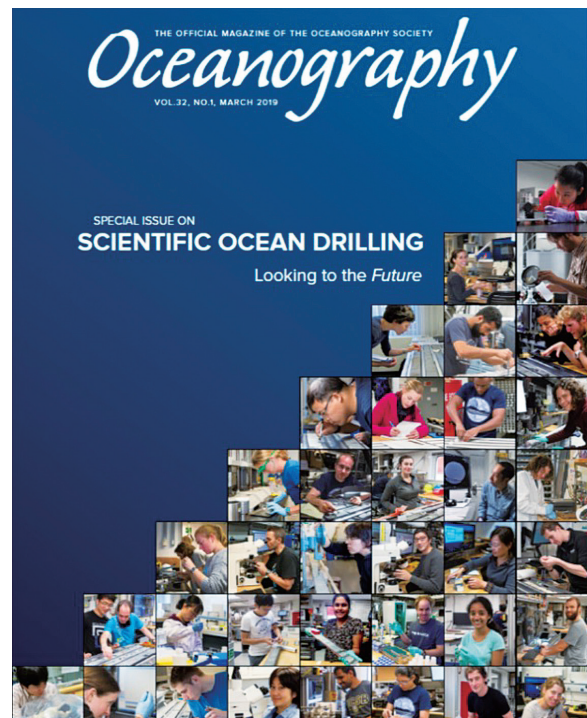


図1 国際科学海洋掘削約50年の成果をまとめたOceanography 特別号 (Oceanography, 2019) の表紙。世界各国36名の若手～中堅研究者を、表紙の写真と同号244頁のコメントで紹介。

催された IPOD 参加に関する会議で、板野昇平先生が参加への意義を強調されていたことが、何故か強く印象に残っている。その後筆者（T.I.）は 1978 年にフィリピン海における、国際深海掘削計画・第 59 節航海 (IPOD Leg 59) に参加するため、那覇港からグローマー・チャレンジャー号に乗船することとなった (Ishii, 1981 ; 石井, 2018)。九州・パラオ海嶺上の掘削孔 448 では火山角礫岩は溶岩に比べかなり迅速に掘削可能だという貴重な体験をした (後述)。

1985 年からは米国の掘削船ジョイデス・レゾリューション (JOIDES Resolution : JR) 号の運用が開始され、国際深海掘削計画 (Ocean Drilling Program : ODP) がスタートした。2003 年からは日米が共同運営する統合国際深海掘削計画 (Integrated Ocean Drilling Program : IODP) が始まった。一方、2001 年には奈須先生のアイデアに端を発する掘削船、仮称“ゴジラ丸”または“ナス丸”の建造が開始され、2005 年にマントル掘削には欠かせないライザー掘削可能な地球深部探査船「ちきゅう」として運用が開始された。奈須先生は 1984 年の退官後も忘年会等でお会いすると、「外国に行くと“ナス丸”は

く尋ねられますよ。」と、完成を心待ちにされておいでのご様子であった。2013 年からは国際深海科学掘削計画 (International Ocean Discovery Program : IODP) が開始され、現在に至っている。

日本の海洋掘削科学は、黎明期を牽引された奈須先生、小林和男先生から、二世代目の木下肇、平朝彦、末広潔の時代を経て、三世代そして四世代へと確実に引き継がれているように思える。

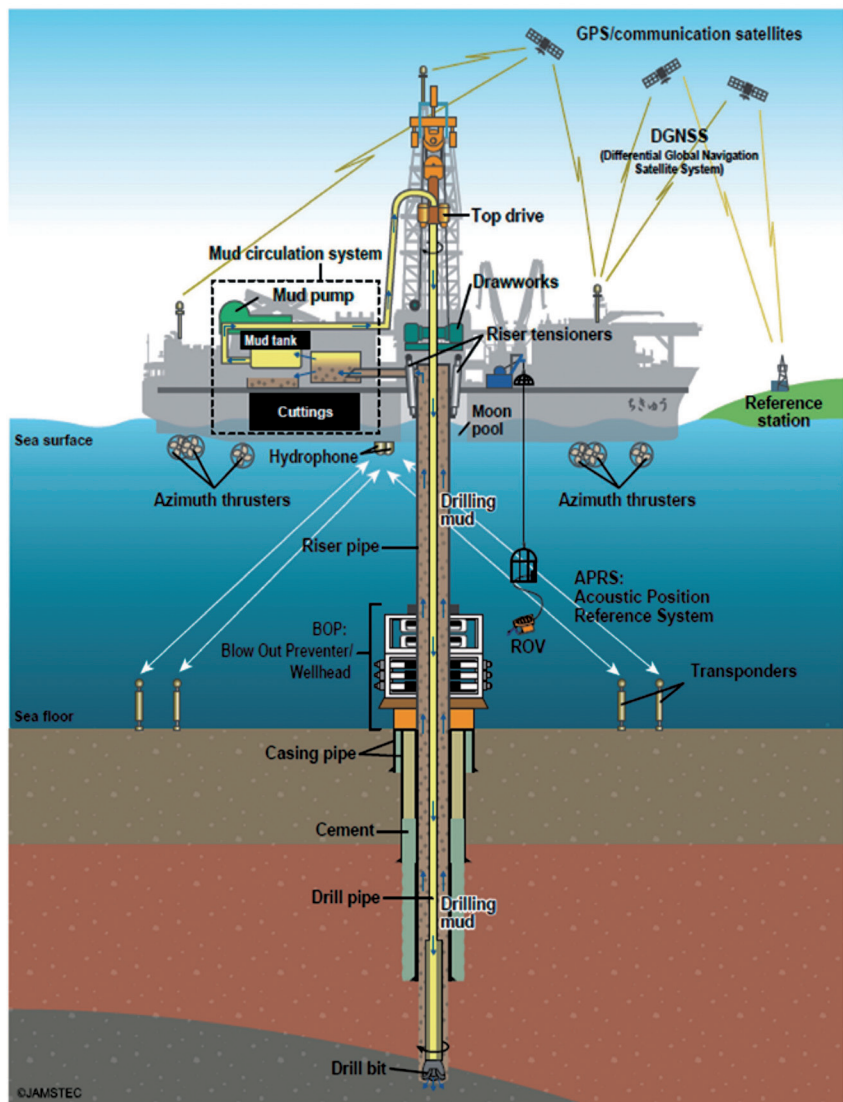


図 2 地球深部探査船「ちきゅう」のライザー掘削システムの紹介 (Yamada et al., 2019, Figure 1). ライザーレス掘削システムに比べ、非常に複雑なシステムである。



### 3. 海洋掘削 50 年の成果

国際科学海洋掘削約 50 年の成果は、Oceanography の特別号としてまとめられていて <https://tos.org/oceanography/> より無料ダウンロード可能である (Oceanography, 2019). この特別号の表紙 (図 1) には、世界各国の若手から中堅研究者 36 名の船上での研究中の写真があり、本文末尾には各人の紹介も掲載され、世代交代の順調さが表現されているように思われる。

地球科学全域にわたる科学海洋掘削の成果は、1. 気候と海洋の変動, 2. 自然災害, 3. 地殻とマントル, 4. 海底下深部生命圏 の 4 項目に大別されている。

山田ほか (Yamada et al., 2019) は地球深部探査

船「ちきゅう」のライザー掘削システム (図 2) の紹介をするとともに、南海トラフと下北半島沖でのライザー掘削による科学的成果を報告している。

道林ほか (Michibayashi et al., 2019) は DSDP が開始された 1968 年から 2018 年までの 50 年間のライザーレス科学海洋掘削の成果を、マントル掘削の視点からまとめている。海洋地殻での掘削孔の中で、基盤岩を 100m 以上深く掘削した孔は 38 孔、そのうち 200m より深いものは 20 孔にすぎない (但し、海台、海山、縁海、熱水域、大陸縁辺域を除く)。これらの掘削孔の位置を図 3 に、掘削孔の深さ、岩相および岩相ごとの回収率を図 4 に示す。これらはグローマー・チャレンジャー号とジョイデス・レゾリューション号によるライザーレス掘削である。基盤岩掘削の最深は Nazca

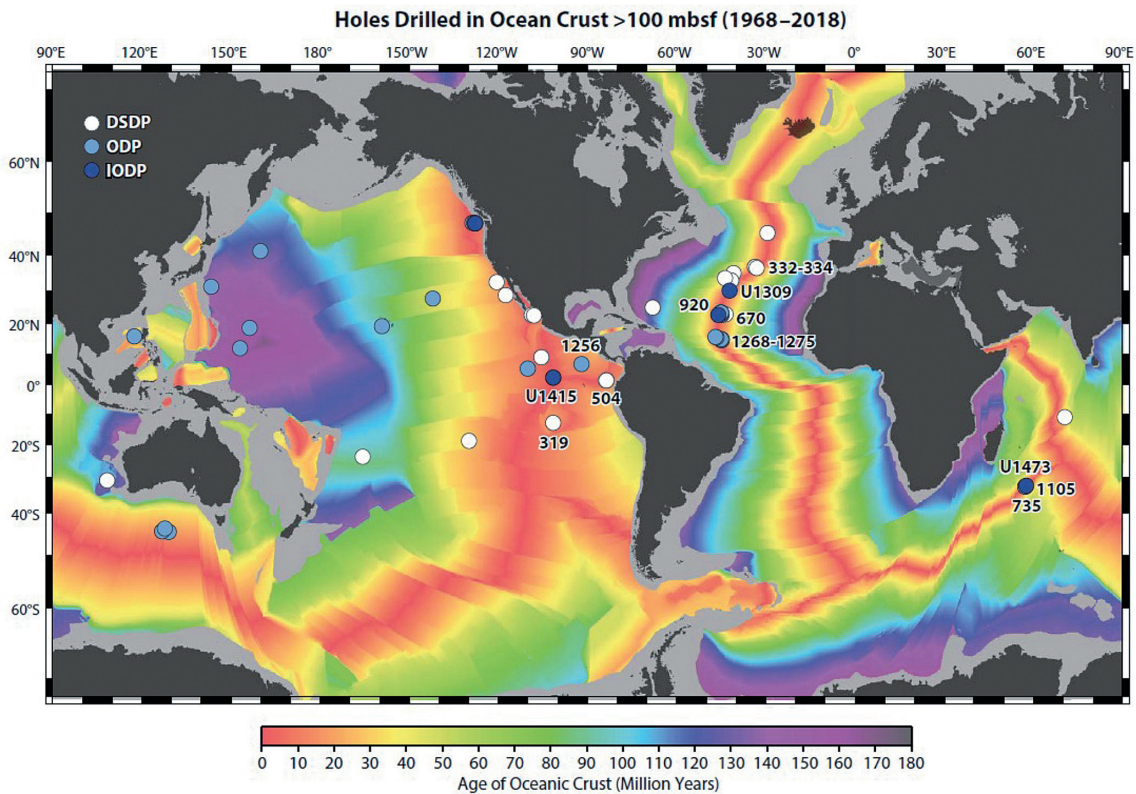


図 3 DSDP が開始された 1968 年から 2018 年までの 50 年間のライザーレス科学海洋掘削孔のうち、基盤岩 (但し、海台、海山、縁海、熱水域、大陸縁辺域を除く) を 100m 以上深く掘削した 38 孔の位置を示す (Michibayashi et al., 2019, Figure 1).



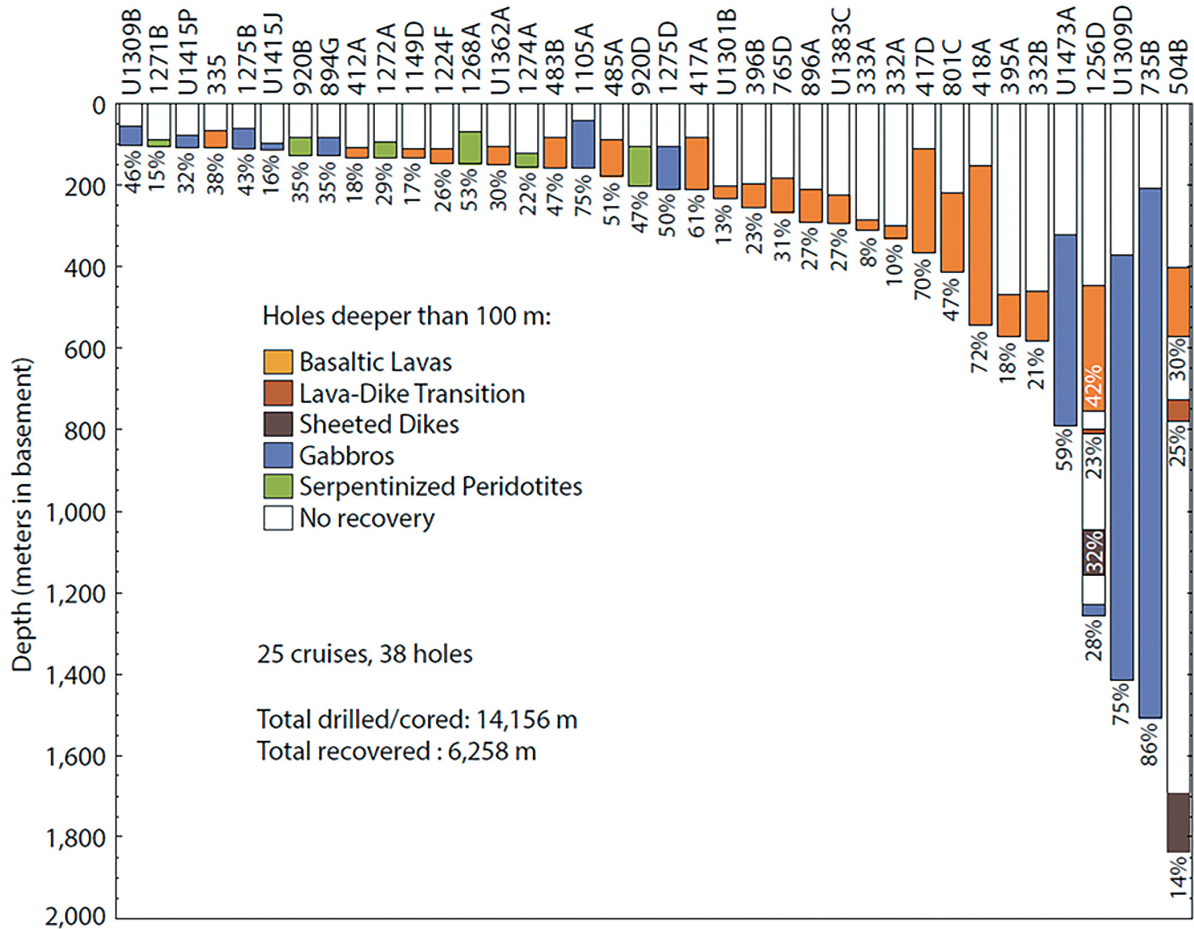


図4 図3に示した38掘削孔の深さ、岩相および岩相ごとの回収率を示す (Michibayashi et al., 2019, Figure 2).

Plate 504B 孔の 1836.5m (孔の全長は 2111m)、次は Cocos Plate 1256D 孔の 1271.6m (孔の全長は 1521.6m) で、この 2 孔のみが、基盤岩である玄武岩溶岩から、シート状岩脈群まで到達している科学海洋掘削孔である。

地球深部探査船「ちきゅう」は紀伊半島沖での“南海トラフ地震発生帯掘削計画”および“南海トラフゆっくりすべり断層観測監視計画”で、ライザーおよびライザーレス掘削により多大な成果を上げた。更に 2011 年 3 月 11 日の地震に関する“東北地方太平洋沖地震調査掘削”では、海溝陸側斜面上の堆積層の地震断層に至るライザーレス掘削により、多大なる科学的成果を上げている。一方、地球深部探査船「ちきゅう」には

2005 年 7 月の運用開始以来、ライザー掘削システムによるマントル掘削に臨む機会はまだ訪れていない。

#### 4. 近年の国内の動き

このような状況を背景に、2022 年 3 月 15 日に日本がマントル掘削を目指す総特集として、“海洋科学掘削によるマントル到達への挑戦 — 地球最大のフロンティアに挑む —”が海洋出版社から出版され、J-DESC のサイトの「関連出版物」<https://j-desc.org/publication/>に公開されており、「その他 (共同出資・企画等)」のタブから無料ダウンロード可能である (海洋出版 月刊地球編集

表 1 現在提案されているマントル掘削候補 3 地点 (ココスプレート, パハ・カリフォルニア, ハワイ沖) の諸条件の比較 (江口・澤田, 2022, 表 1) を改変.

深度 / 層厚 メートル	ココスプレート	パハ・カリフォルニア	ハワイ沖
水深 (m)	3650	4300	4050
掘削深度 (m)	6250	6100	6700
総パイプ (m)	9900	10400	10750
地殻の年代 (Ma)	15 - 19	20 - 30	78 - 81
Moho 面の 推定温度 (°C)	250 以上	200 - 250	150 程度
堆積物の厚さ(m)	250 - 300	80 - 130	200
緯度 (° E)	67 - 87	25 - 33	22 - 23
経度 (° W)	90 - 92	120 - 127	155 - 156
参照できる孔井	1256D	—	—
港までの距離 (Km)	644 程度	800-1000 程度	400 程度
有利な点	最も浅い水深、 地質構造がわか っている。 これまでに掘削 されている。	Moho 面の温度 が中程度。	Moho 面の温 度が最も低 い、港まで の距離が最も 近い。
不利な点	Moho 面の温度 が最も高い。	事前調査デー タが最も少 ない、オフ リッジ火山 活動の影響 最も深い 水深。	総パイプ長 が最も長い、 ホットス ポット火山 活動の影響。
日数 (日)	250 - 276	248 - 298	244 - 287
金額 (M \$)	212 - 226	212 - 238	209 - 232

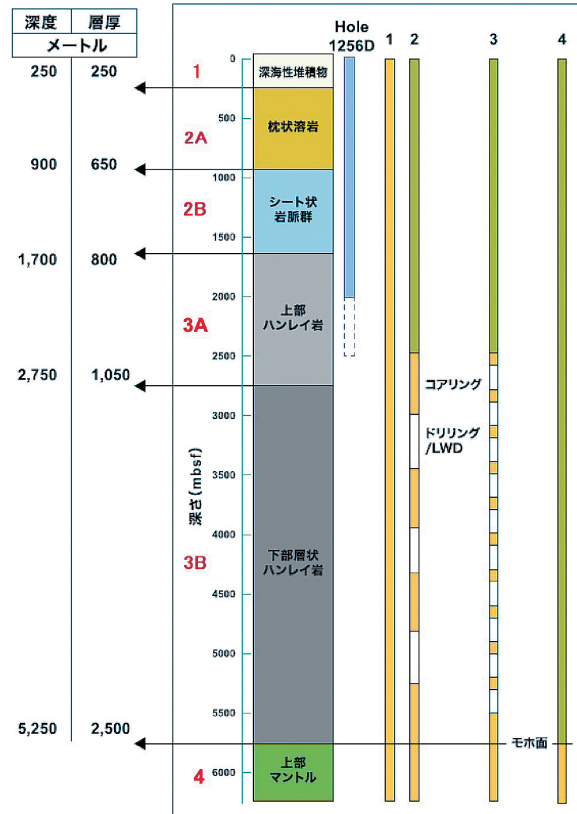


図 5 海洋地殻の模式図と、コアリング区間の異なる掘削方を示す (江口・澤田, 2022, 図 2). 1 は海底表層からマントルまでの全コア試料を採取する. 4 はモホ面までは掘り飛ばし、マントルのコアサンプルのみを採取する.

部編, 2022).

稲垣史生・倉本真一・平朝彦 (稲垣ほか, 2022) による, “地球深部探査船「ちきゅう」の海洋科学掘削が切り拓く新しい未来地球システムの価値創造” はモホール計画の誕生から今日に至る海洋科学掘削の歴史と意義について述べ、更に将来への提言 (後述) を行っている.

海野進 (海野ほか, 2022) はマントル掘削にハワイ沖ノースアーチを推しており, 第 1 段階として立案された上部地殻掘削計画の優位性を述べている.

江口暢久 (江口・澤田, 2022) はマントル掘削にむけて候補地 3 箇所 (ココスプレート, パハ・カリフォルニア, ハワイ沖) の概要 (表 1) と, 外部委託で行った技術的検討結果 (BLAND Energy Partners, 2013) のまとめを紹介している. サイトと日本との動復員費 (注: 地球深部探査船「ちきゅう」のダイレートは約 USD 300 K\$ /

day; 1 日約 4000 万円), 比較的簡易なケーシングプランを採用する場合で, コアリング区間の長短 (図 5) 等を加味した総日数と総経費を表に示している. それによると, モホ面まで掘り飛ばしマントルのコアサンプルのみを回収する場合 (図 5 の 4) は 244 日 ~ 250 日, 一定間隔毎のサンプリングを行う場合 (図 5 の 2) は 276 日 ~ 298 日と見積もられている. 総経費は前者が USD 209M\$ ~ USD 212M\$, 後者が USD 226M\$ ~ USD 238M\$ と見積もられている. 総てをコアリングする場合の表記はされていないが, オンサイト時間 (掘削時間) は 50 日程度延長されると思われる, 従って経費は約 USD 15M\$ 加算され

ることになる。

一方、島伸和（島ほか，2022）は“現実的なマントル掘削のシナリオ”という主題の下マントル掘削候補地3箇所のうち、ハワイ沖を強く推奨している。そして“日本が主導してかつ現実的なマントル掘削のシナリオは、マントルに至るまではコアリングをしないという選択をすることである”と断言している。更に“最有力候補海域として考えるハワイ沖に絞って、残る課題を克服していくことである”と主張し、具体的には、“モホ面を貫通するまでは、LWD (Logging-while-Drilling)による物性物理計測+掘削屑(カッティングス)を収集する掘削をおこなう。その後マントルでのコアリング，主要箇所での横掘りもしくは枝掘りによるコアリングを行う。掘削孔は

標準孔として保存し各種観測に活用される。”と提案している。

山田泰広（山田ほか，2022）はマントル掘削時における坑内検層の重要性について実例を示しながら解説している。

稲垣・倉本・平（稲垣ほか，2022）によるマントル科学掘削に関する将来への提言は、海野のハワイ近海でのマントル掘削提案（海野ほか，2022）を基にした、フルスペックによる掘削の全体像が、美しい幻想的な描画（図6）で表現されており大変興味深い。そして、締め言葉は特に格調高く感銘をおぼえるので、少々長文であるが再録する。“本特集号で取り上げた人類史上初となるマントルへの到達に向けた挑戦は、科学者の知的好奇心を満たしつつも、人類と惑星地球の命運をも左右する国際的な科学技術プログラムであると言っても、決して過言ではないだろう。私たちは、惑星地球とそこに住む自らの未来を意識的に創造していく時代に突入したといえる。「ちきゅう」は、世界の叡智を結集して地球規模の重要な課題に取り組むことのできる、世界で唯一の地球深部探査船である。今後、人類史上初となるマントルへの到達と観測、それにより引き起こされる非連続的なイノベーションとパラダイムシフトは、地球深部探査船「ちきゅう」を有する我が国の科学技術の進展と科学者の熱意、そして国際協働におけるリーダーシップに委ねられている。そして、ひとたび科学技術イノベーションにより人類未到のマントル空間への扉が開かれれば、その科学技術はより洗練されたものへと進化し、新しい概念や科学目標を掲げた第二・第三のマントル掘削につながるだろう。近い将来「ちきゅう」による統合的なマントル掘削を通じた画期的な国際分野融合研究がなされ、いつか必ず、「すばらしいのは地球であって、人間ではなかったのだ

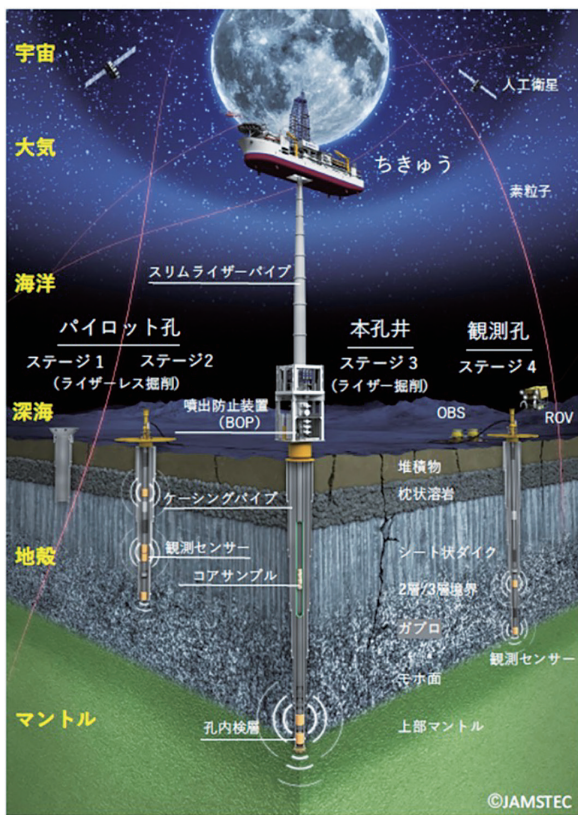


図6 段階的なアプローチによる海洋地殻の完全貫通とマントル到達のシナリオを示す概念図（稲垣ほか，2022，図7）。



と懐古する日が訪れることを目指していく。”

今のところ、現在進行中の国際深海科学掘削計画 (IODP) の 2024 年終了が予定されていて、その後の計画は現在検討中であるという。最近日本地球掘削科学コンソーシアム (J-DESC) サポートオフィスから下記のようなお知らせがあった。“Workshop on the future of Scientific Ocean Drilling with Mission-Specific Platforms and Chikyu-Jointly organized by ESSAC and J-DESC 欧州海洋掘削研究コンソーシアム (ECORD) と日本は、2024 年以降の海洋科学掘削プログラムの構築に向けた検討を共同で進めています。J-DESC と ESSAC (ECORD Science Support & Advisory Committee) では、ECORD / 日本 / 国際パートナー各国の協力によって、新しいプログラムに向けた掘削提案を創出するための科学ワークショップを企画しております。Phase-1 は 2023 年 1 月にオンラインでの開催となります。”更に次の新しいフェイズに進むこととなる。

## 5. 文部科学省海洋科学掘削委員会

文部科学省、科学技術・学術審議会 海洋開発分科会 (第 65 回) は令和 4 年 (2022) 年 3 月 15 日付で委員会の設置を決定した。それを踏まえて川幡穂高を主査とする文部科学省、科学技術・学術審議会海洋開発分科会の下に“国際深海科学掘削計画を含め、海洋科学掘削のあり方や方策について調査を行う。”を調査事項とする海洋科学掘削委員会が置かれた。2022 年 4 月 19 日 (火) の第 1 回から同年 9 月 29 日 (木) の第 6 回 (最終回) まで集中的に開催された (表 2)。いずれも文部科学省会議室又はオンラインで開催され、傍聴希望者は文部科学省の“傍聴登録システム”から事前予約で傍聴可能であった (但し、国際動

表 2 文部科学省、科学技術・学術審議会 海洋開発分科会 海洋科学掘削委員会の日程および委員名簿 (文部科学省、2022)。

<p>会議名:                  文部科学省、科学技術・学術審議会                  海洋開発分科会 海洋科学掘削委員会</p> <p>開催日時(回):</p> <p>(第 1 回) 令和 4 年 4 月 19 日(火) 9 時 30 分～12 時 30 分                  (第 2 回) 令和 4 年 5 月 12 日(木) 13 時 30 分～16 時 30 分                  (第 3 回) 令和 4 年 6 月 6 日(月) 14 時 15 分～17 時 15 分                  (第 4 回) 令和 4 年 7 月 4 日(月) 9 時 30 分～12 時 30 分                  (第 5 回) 令和 4 年 7 月 26 日(火) 9 時 30 分～12 時 30 分                  (第 6 回) 令和 4 年 9 月 29 日(木) 13 時 30 分～16 時 30 分</p> <p>委員名簿 (50 音順、敬称略) ◎:主査 (令和 4 年 4 月 19 日現在) :</p> <p>小原一成、窪川かおる、阪口 秀、石井美孝、◎川幡穂高、                  鈴木志野、巽 好幸、野田博之、</p>
--

注:議事録(案)と資料は下記 URL 文部科学省令和 4 年度 会議資料科学技術・学術、参照 (<https://www.mext.go.jp/kaigisiryu/2022/index.html>)

向については非公開) (文部科学省、2022)。

主たる議題と主な資料を以下に記す。

(第 1 回) (1) 海洋科学掘削委員会の議事運営について、(2) 我が国におけるこれまでの海洋科学掘削の取組について、(3) 国際深海科学掘削計画 (IODP) の動向について (ヒアリング)、(4) 我が国における海洋科学掘削の現状について (ヒアリング)、(5) 意見交換、(6) その他。注: (2) に関する資料として文部科学省海洋地球課のパワポがあり、(3) に関する資料として益田晴恵のパワポがあり、(4) に関する資料として海洋研究開発機構 (説明者は倉本真一) のパワポあり。

(第 2 回) (1) 2024 年以降を見据えた国際動向について (非公開)、(2) 我が国における海洋科学掘削の取組について、(3) 地球惑星科学分野の研究開発動向について (ヒアリング)、(4) 意見交換、(5) その他。注: (2) に関する資料として以下のパワポ 4 件あり。巽好幸

の～科学的視点～，小原一成の～社会的視点（防災・減災）～，石井正一の～社会的視点（資源）～，石井美孝の～技術的視点～．(3)に関する資料として以下のパワポ2件あり．黒田潤一郎の～古環境・古気候研究～，鈴木志野の～極限環境生命圏研究～．

(第3回) (1) 地球惑星科学分野の研究開発動向について（ヒアリングおよび意見交換），(2) 2024年以降を見据えた国際動向について（非公開）．注：(1)に関する資料として以下のパワポ4件あり．金子克哉の～火山，火成活動研究～，荒木英一郎の～海底観測研究～，野田博之の～地震研究（パワポ未掲載）～，中久喜伴益の～マントルダイナミクス研究～．

(第4回) (1) 海洋科学掘削の現状と課題について（ヒアリング），(2) 我が国における研究

資源としてのコアの保管・管理・活用の現状について（ヒアリング），(3) 意見交換，(4) その他．注：(1)に関する資料として海洋研究開発機構（説明者は倉本真一）のパワポあり．(2)に関する資料として池原実のパワポあり．(第5回) (1) 今後の海洋科学掘削の在り方について，(2) 2024年以降を見据えた国際動向について（非公開）．注：(1)に関する資料として今後の海洋科学掘削の在り方について，骨子（案）あり．

(第6回) (1) 今後の海洋科学掘削の在り方について．(2) その他．注：(1)に関する資料として今後の海洋科学掘削の在り方について（提言）（案）と，同（概要）（案）あり．

これらの議事次第は，主に海洋研究開発機構（JAMSTEC）が所有する地球深部探査船「ちきゅう



図7 地球深部探査船「ちきゅう」による日本近海科学掘削（2007年 - 2021年）の掘削地点（異，2022）に東北沖プチスポット火山の分布海域を追加．



表3 これまでに掘削に要した経費のうち、IODP関係(図7の赤丸)を、航海日数と共に示す(文部科学省, 2022). 赤字は筆者による加筆.

(1) これまでの掘削に要した経費

これまでの掘削に要した経費(運営費交付金)

掘削名称	種別	掘削地点数	航海日数	最大掘削深度	予算額
下北半島東方沖掘削試験	ライザー	1地点	約80日	約650m	約21億円
東北地方太平洋沖地震調査掘削	ライザーレス	1地点	約50日	約850m	約9億円
空戸沖限界生命圏掘削調査	ライザーレス	1地点	約70日	約1,200m	約12億円
南海トラフ地震発生帯掘削計画	ライザーレス	16地点	約550日	約1,400m	約120億円
南海トラフ地震発生帯掘削計画	ライザー	2地点	約550日	約3,300m 予定は約5,200m	約140億円
南海トラフゆっくりすべり断層観測監視計画	ライザーレス	3地点(予定)	約30日*	約500~1,000m	約11億円*

※ 1地点あたりの日数、予算額

掘削に必要な技術開発経費(運営費交付金)  
強海流下における運用技術(ライザーフェアリング等)、大水深・大深度での掘削技術(特殊環境に対する技術開発や運用技術、軽量ライザーシステム等)、長期孔内観測システム等...計約75億円

う」で実施された日本における深海科学掘削の、評価および問題点の洗い出しが中心である。各委員およびJAMSTECを主とした関係者間の、歯に衣着せぬ率直な質問・批判と回答、川幡穂高主査の軽妙な司会と、とりまとめは大変興味深く有意義な委員会であるように見うけられた。総じて、各委員や説明者は学会発表に比し丁寧で分かりやすい説明に努めていたように感じられた。

第2回委員会で巽好幸が“我が国における海洋科学掘削の取組について～科学的視点～”で示した、地球深部探査船「ちきゅう」による日本近海科学掘削の掘削地点(図7)を示し、多大な科学的成果の紹介があった。ライザーによる南海トラフ地震発生帯掘削計画(Exp. 358)のみが、当初計画のプレート境界断層(深度約5200m)まで到達できず、3300mで打ち切りとなり、断層採取を果たせなかった。海洋科学掘削委員会でのこの件に関する議論が最重要課題になっていたと思われた。一方、その他の全ては計画を達成できた模様である。図7に示された掘削地点はマンントル掘削を目指したものではない点が惜しまれる。これまでに掘削に要した経費のうち、IODP関係(図7の赤丸)を表3に、航海日数と共に示す。

同じく第2回委員会で石井美孝が“我が国に

表4 地球深部探査船「ちきゅう」による大水深・大深度掘削技術としてのライザー掘削およびライザーレス掘削のまとめ(石井美孝, 2022). 赤字は筆者による強調するための着色.

まとめ
①大水深・大深度掘削技術 4,000mライザーはライザー本体の軽量化は現時点では困難。新たな考えのアプローチが必要 12,000m級ドリルパイプは高強度パイプが確認されたことより、コアリングシステム対応の検討と接続時の機械的損傷を開発したスリップで解消可能となり、達成は間近 ライザーレス掘削の効率化を目的とする種々の機器の開発
②過酷な海象・気象環境下での定点保持技術及びライザーハンドリング技術 独自の開発で本技術は南海掘削において実証・確立された
③労働安全衛生管理と環境保全 世界標準のHSQE統合マネジメントシステムにより、労働安全衛生と環境保全を体系的/組織的に管理

(石井美孝 2022を改変)

における海洋科学掘削の取組について～技術的視点～”で示した、地球深部探査船「ちきゅう」による大水深・大深度掘削技術としてのライザー掘削およびライザーレス掘削のまとめを表4に示す。マンントル掘削候補地はいずれも水深約4000mで、2500mのライザーパイプを有する地球深部探査船「ちきゅう」も現状では対応できない。ライザーパイプメーカーの事業からの撤退などで、4000m級ライザーパイプの入手は、当面困難であるという。一方、12000m級ドリルパイプの達成は間近であるという。即ち12000m級ドリルパイプによるライザーレス掘削での、マンントル採取を可能にする手立てを考えなくてはならない。

尚、海洋科学掘削委員会の議事録(案)や資料は文部科学省の会議資料サイトの、科学技術・学術から、全て閲覧ダウンロード可能である(文部科学省, 2022)。その総計は700頁を超える膨大なものである。

## 6. プチスポットパイプ掘削提案

### 6.1 プチスポット火山

平野ほかによる東北沖太平洋深海底でのプチスポット火山発見の論文(Hirano et al., 2001)で



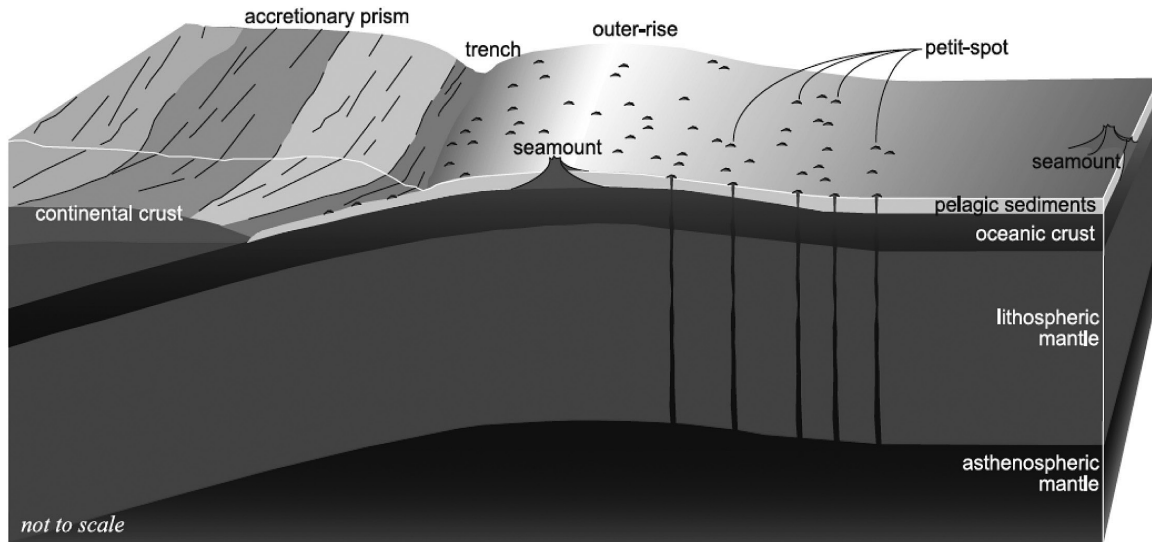
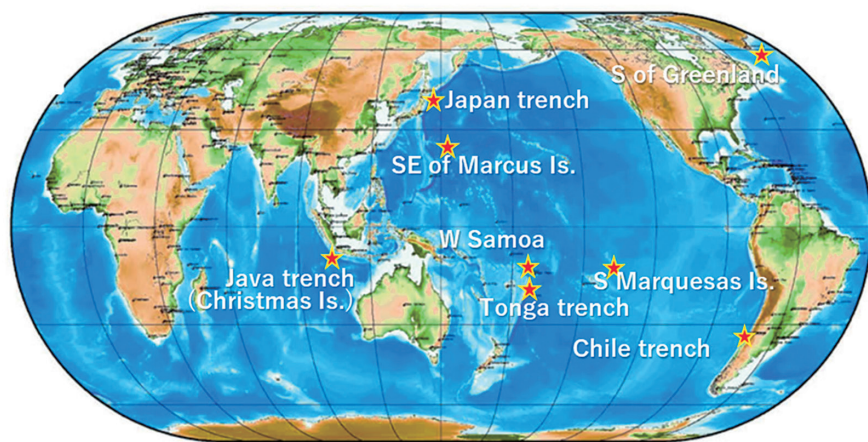


図8 東北沖日本海溝に沈み込む太平洋プレート上のプチスポット火山の面的な広がりを示す模式図（平野ほか，2010）。

はプチスポット火山の認知度の浸透は限定的であったが、その後の Science 誌の論文（Hirano et al., 2006）によりプチスポット火山は全世界の研究者に認知されることとなった。更に、平野は“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 —”（平野ほか，2010）の中で、東北沖太平洋プレート上プチスポット火山の面的な広がりを強調している（図8）。採取されたプチスポット火山産試料中にはマンテル橄欖岩やマンテル由来鉍物をはじめとし、海洋地殻浅部から深部を構成する多種多様な捕獲岩や捕獲結晶も確認できることから、時間的にも空間的にも広範囲にわたる海洋のマンテルお

よび地殻の情報、換言すると4次元の情報が得られるとして超モホール計画を提案している。

プチスポットマグマ活動は基本的には、プレート内応力変化によりアセノスフェアまで達する亀裂が発生することで、マンテルの減圧融解が引き起こすマグマ活動と考えられる。即ち、プチス



Hirano et al. (2006) *Science* 313, 1426-  
 Hirano et al. (2008) *Basin Res.* 20, 543-  
 Uenzelmann-Neben et al. (2012) *Geophys. J. Int.* 190, 1-  
 Hirano et al. (2016) *Marine Geol.* 373, 39-  
 Taneja et al. (2016) *Lithos* 262, 561-  
 Hirano et al. (2019) *Deep-Sea Res.* /154, 103142

図9 プチスポット火山と成因が類似するマグマ活動、(即ちプレート内応力変化によりアセノスフェアまで達する亀裂が発生することで、マンテルの減圧融解が引き起こすマグマ活動)のまとめを示す。

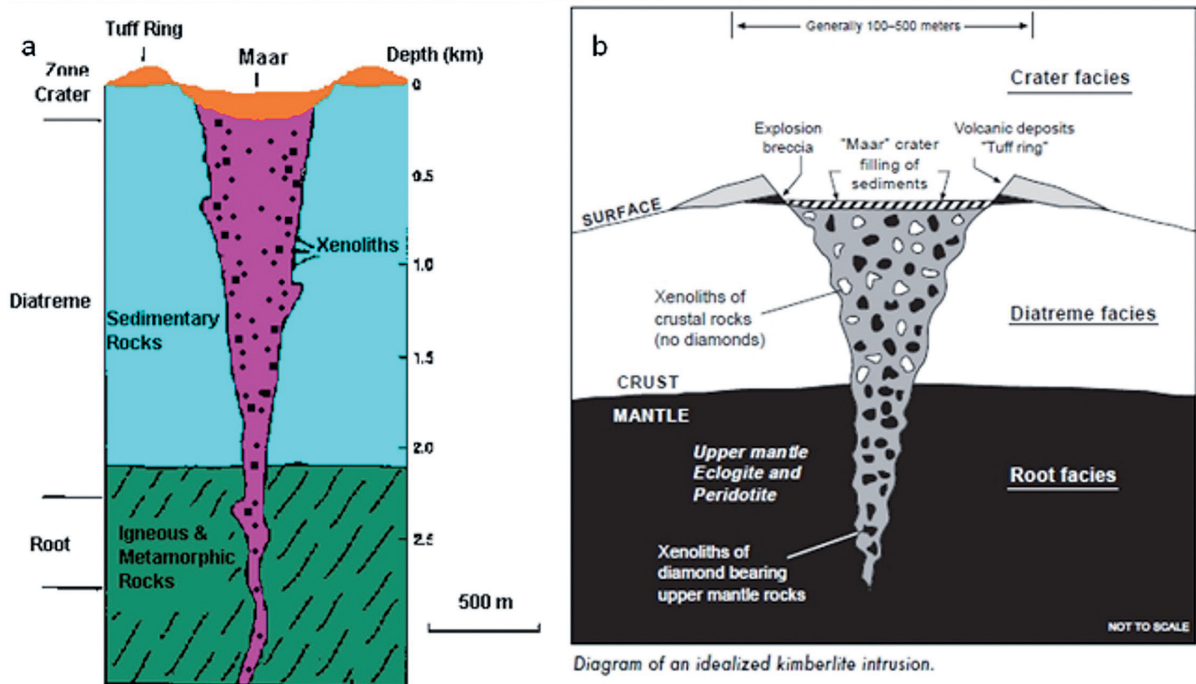


図 10 アフリカ大陸に代表される古い大陸プレート上のみ存在する、キンバーライト火山のモデル図は数多く提案されているが、ここでは代表的な (a) Kirkley et al. (1991) と (b) Colorado Geological Survey (1999) の 2 例を示す。キンバーライト火山の噴火口のマールクレーター (Maar Crater) は直径 100-500m 程度と示されているが、深さ方向はモデルにより大きな差異がある。たとえば、火山角礫岩から成るダイアトリウムゾーンは、モデル図(a)では 2km 強程度、モデル図(b)では大陸地殻のモホ面以深(30km 以深?) まで想定されている。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。

ポット火山のマグマは海洋プレートアセノスフェア (海底下約 60km) で発生し、モホ面 (海底下約 6km) を通過し上昇し、深海底に噴出したアルカリ玄武岩質マグマである (たとえば, Hirano et al., 2001; Hirano et al., 2006; 平野ほか, 2010; Hirano, 2011; 平野, 2017; Machida et al., 2017; Sato et al., 2018; Yamamoto et al., 2009; 石井ほか, 2019, 2021)。噴出物の産状は、発泡したアルカリ玄武岩質の溶岩および火山角礫岩であり、母岩から捕獲した岩石・鉱物を多数胚胎している。類似するマグマ活動のまとめを図 9 に示す。このことは、プチスポットの岩石および捕獲物の研究により、汎世界的に海洋のマントルおよび深部地殻の情報の入手が可能になることを意味している。一方、アルカリ玄武岩中の捕獲岩・捕獲鉱物から

地下深部構造研究を進めるには、なるべく多くの試料採取が不可欠である (荒井ほか, 2005) との主張に従い、石井ほかは日本で運用可能な「しんかい 6500」、R/V「かいめい」のパワーグラブ (PGC)、ハイテク仕様のドレッジなど、各種観測機器を動員しての、広範囲の試料採取を提案した (石井ほか, 2021)。

石井ほかはプチスポット火山の中にマール状地形を示す火山を認識し (石井ほか, 2019)、発泡の著しい構成岩石を伴うことから、火山体深部構造として、キンバーライトと類似のパイプ状内部構造を予測した。キンバーライトパイプの構成は、浅部から深部へクレーターゾーン (Crater Zone) のマールクレーター (Maar Crater) からダイアトリウムゾーン (Diatreme Zone) (主構成岩は

火山角礫岩) を経て, ルートゾーン (Root Zone) へ至るとされる (図 10). アセノスフェアで発生し, モホ面を通過し上昇するマグマは, 地殻を含むプレート内に過去 120Ma 余にわたり蓄積された広域的応力を開放し, 更にマグマが火道壁の割れ目へ貫入することによる火道壁修復が行われると予想できる. 即ち, 火道であるプチスポットパイプはストレスの無い堅牢な孔壁を有し, マンテルに至るほぼ垂直なトンネルを形成している可能性がある. 孔壁はあたかも天然のケー

シングのように見なせるのではないだろうか.

地球深部探査船「ちきゅう」は現在水深約 4000m でのマンテル掘削を目指して, 4000m 級ライザーパイプ調達に苦慮している. ましてや, 6000m 級ライザーパイプの獲得は非常に困難であろう. 一方, 地球深部探査船「ちきゅう」の 12000m ドリルパイプの運用はほぼ達成されたという (表 4: 石井美孝, 2022). こういう背景にあって, 地球深部探査船「ちきゅう」の 12000m ドリルパイプによるプチスポットパイプのライザーレス掘削を提案する.

## 6.2 プチスポットパイプの内部構造

「かいれい」KR05-10 航海, および「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, プチスポット火山の海底面下三

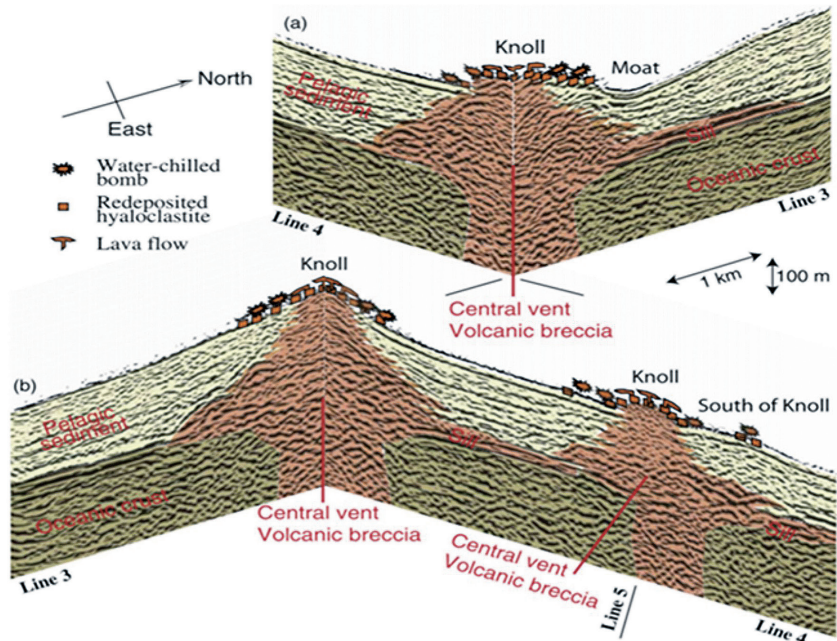


図 11 「かいれい」KR05-10 航海, および「よこすか」YK05-06 航海でのシングルチャンネル反射法地震探査, 更に「しんかい 6500」での観察を総合して得られた, プチスポット火山の海底面下三次元構造モデル (Fujiwara et al., 2007, Figure 4) (本文参照).

次元構造モデル (Fujiwara et al., 2007, Figure 4) を図 11 に示す. 各山体は小規模 (< 1km<sup>3</sup>) な単成火山であり, 火口付近の厚さ 200–300m 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 10Ma 以下の若い年代を持ち, 130–135Ma の古い年代の海洋性玄武岩 (MORB) 層の上に乗る, 底面直径約 3km を持つ円錐状の形状が想定されている. これは直径約 1km 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. モデル図からは, かつての火道は基盤岩の表面からの深さ約 300m 程度まで, 火山角礫岩で満たされている事が読み取れる.

Fujie et al. (2020) は JAMSTEC の深海調査



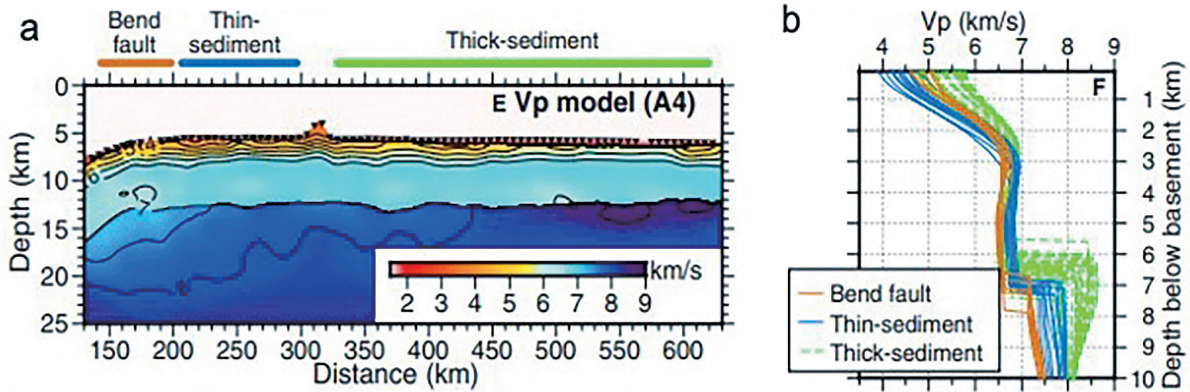


図 12 藤江ほかは JAMSTEC の深海調査船「かいいい」を用いて東北沖海域で反射法地震探査および海底地震計 (OBS) による屈折法構造探査を実施した。(a) 左端の海溝軸から東に延びる測線上の、OBS データから導出した P 波速度構造モデルを示す。(b) 同測線に沿った P 波速度構造モデル (a) から 10km ごとに抜き出した P 波速度の 1 次元構造を示す (Fujie et al., 2020)。堆積物が薄い海域、即ちプチスポット火山分布海域の P 波速度が遅いことがわかる。

船「かいいい」を用いて反射法地震探査および海底地震計 (OBS) による屈折法構造探査を実施している。地下の地震波速度構造 (図 12) は、Thin-sediment 域であるプチスポット分布海域では、音響基盤 (顕著な音波の反射面) 直下の地震波 P 波速度が、Thick-sediment 域であるプチスポットの無い東部海域よりも、有意に低いことが示されている。プレート内の割れ目の有無により説明が可能であるが、筆者ほかは密度の小さな火山角礫岩で埋められている、プチスポットパイプの存在を示唆するものと解釈できるのではないかと期待している。

### 6.3 プチスポットパイプの掘削

ここでは地球深部探査船「ちきゅう」によるプチスポット火山火口内でのノンライザー深海掘削を提案する。一般的に深海掘削においては、固結した火山角礫岩の掘削は緻密な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。米国の掘削船グローマー・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 (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 孔において、40 年も前の技術で、一回のビット交換のみで、約 2 週間という短期間で 914.0m の枕状溶岩層を含む火山角礫岩層を掘りぬくことができた。

一方、プチスポット火山、とりわけ爆裂火口 (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であるダイアトリュームの存在が予想できる。そしてその構成岩石である火山角礫岩は、非常に多孔質 (石井ほか, 2021, 図 2 参照) である可能性が高いため、上記第 59 節の火山角礫岩層と同様に、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、地球深部探査船「ちきゅう」による、ライザーレス深海掘削を提案したい。水深約 5500-6000m 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、モホ面以深まで連続している可能性もあるだろう。その場合は地球深部探査船

プチスポットパイプのライザーレス掘削で海洋マントル採取に挑む  
— 地球深部探査船「ちきゅう」による新モホール計画 —

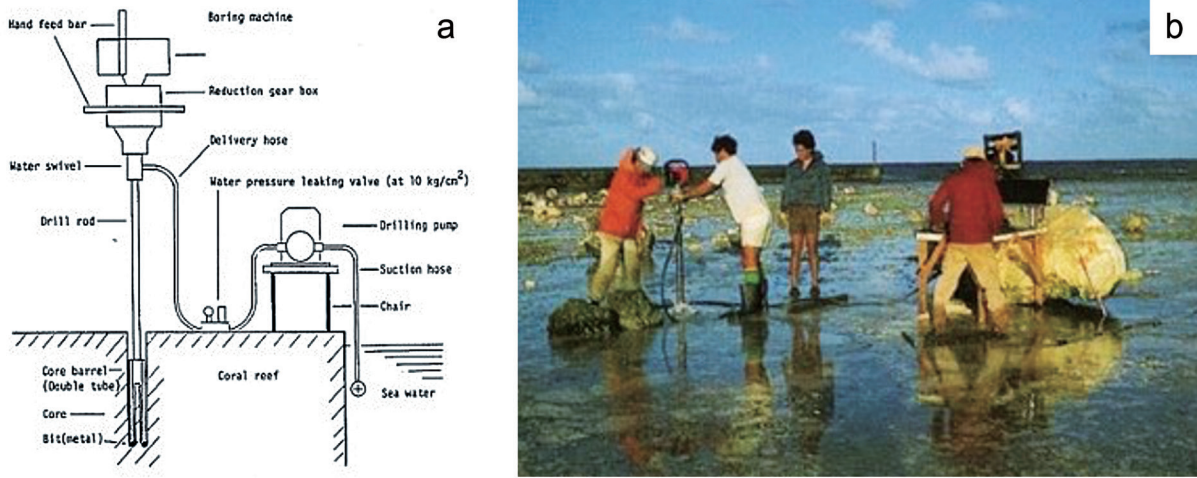


図 13 (a) サンゴ礁掘削装置の基本構成図。(b) クック諸島 (Cook Islands) マンガイア島 (Mangaia Island) での低潮時、サンゴ礁掘削作業。オレンジコートは米倉伸之、小豆色コートは石井、他の二人は現地雇いのアルバイト。

「ちきゅう」の能力を最大限活用すれば、海底下約 6000m, つまりモホ面以深の掘削も夢ではないであろう。マントル到達を目指して、ひたすら掘り進み、マントル試料採取後に、検層データを基に掘削孔壁を貫いての斜め掘りや枝掘りで重要試料採取を行うことを提案する。この提案は前述した島ほか (2022) の“現実的なマントル掘削のシナリオ”でひたすらマントル到達を目指すという点では類似するが、ライザー掘削である点から、全く異なる提案である。これぞプチスポットパイプを活用しての新モホール計画と言っても過言ではない。

#### 6.4 掘削装置改良の提案 — 上方掘削可能コアバレルの運用

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) が 1981 年に走り始めた (Sugimura, 1986)。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いる筆者 (T. I.) の参加が認められ、火山岩研究および、サンゴ

礁掘削 (図 13) 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

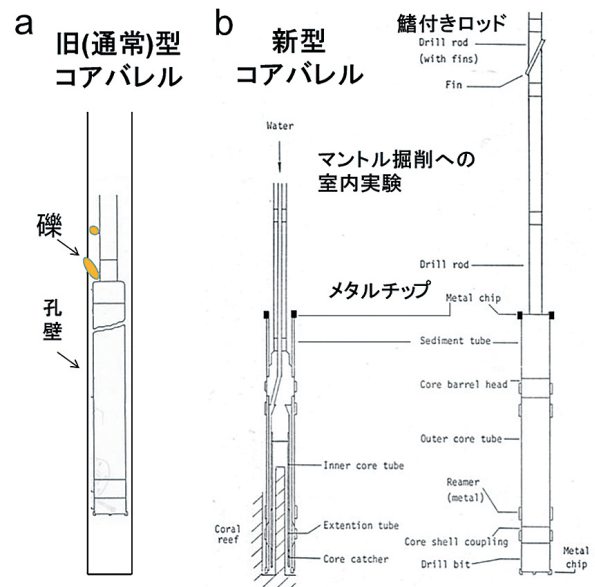


図 14 (a) 通常型コアバレル。(b) 新型コアバレルはメタルチップ付きセグメントチューブを逆ねじて増設したものである (Ishii and Kayane, 1986)。地球深部探査船「ちきゅう」用の上方掘削可能コアバレルの開発・装着・運用を強く推奨する。

ベースにした、鉦研試錐社製装置でサンゴ礁掘削に臨んだ。しかし、太さ 40mm、長さ 1-2m のサンゴ礁コアの採取がせいぜいで、コアバレルの回収が不可能になる事態を複数回経験した。その原因は、エンジンのパワー不足もさることながら、主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 (図 14a)。

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に交換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ジメントチューブ (図 14b) 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、セジ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。更に Fin (鰭=ひれ) を溶接した Drill rod (図 14b 右図) を準備し、掘削時の回転により上昇水流を発生させ岩屑排出力向上を図った。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 であった (Yonekura et al., 1986)。掘削用櫓 (やぐら) 無しの手保持による掘削としては、大成功であったと思われる。

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。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地球深部探査船「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。特に地球深部探査船「ちきゅう」に

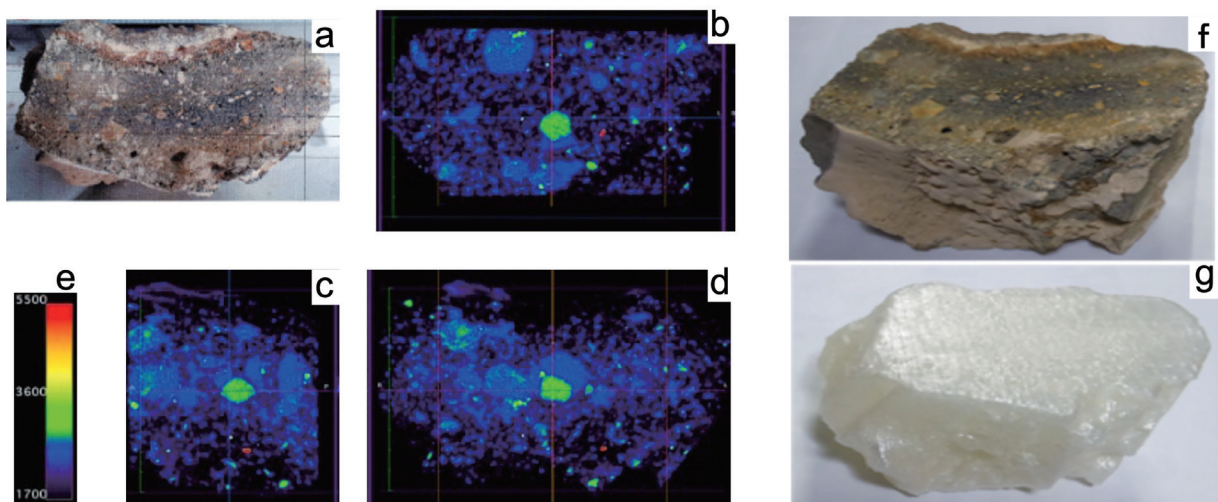


図 15 発泡したプチスポット火山岩中の捕獲岩・捕獲結晶の探索の試み。プチスポット火山岩試料の断面表層写真 (a, f)、および高知コアセンターの X 線 CT スキャナーによる CT 値強度の疑似カラー写真 (b, c, d) を示し、その CT 値はカラーバー (e) で示される。尚、a, b, c, d 中のスケールバーは 1cm 刻みである。(d) は試料の平面投影、(b) は試料の立面投影、(c) は試料の長軸方向からの立面投影写真を示す。重量約 1000g の試料中に赤色で表示される高 CT 値 (高密度) の未詳物質 ( $\alpha$  と仮称する) は 1 個体のみ確認できる (石井ほか, 2021)。(g) は岩石を切断し  $\alpha$  を取り出すための補助用 3D プリント模型。確実な抽出方法を考慮中である。



よるライザーレス深海掘削においては威力を発揮するであろう。

## 6.5 X線 CT スキャナーでの鉱物同定・抽出の試み

プチスポットの火山岩はマントル由来の捕獲岩（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）および地殻構成岩（MORB，MORB 由来の粗粒玄武岩，斑糲岩等）を胚胎していると考えられる。ほかにもエクロジャイト，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・抽出するには X 線 CT スキャナー観察が有効であると考えられる（図 15）。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（ $\alpha$  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  $\alpha$  の絞り込みを行いたい。平面写真 (d) の中心を原点とすると， $\alpha$  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  $\alpha$  の確実な抽出方法を検討中である。岩石を切断し  $\alpha$  を確実に取り出すための補助用 3D プリント模型を図 15 (g) に示す。確実な取り出しには，切断と CT 撮影の繰り返しが必要と考えられるが，コロナ禍にあっては困難であった。

## 7. 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・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。それには，プチスポット火山の分布海域でのマントル直接採取が最も望ましい。

一方，現在提案されているマントルライザー掘削候補 3 地点による，経費の見積もり（表 1）は，最少でも 210M\$ 程度である。これはこれまでに掘削に要した経費（表 3）と比較してみると，その大きさが理解できる。地球深部探査船「ちきゅう」は 4000m 級ライザーパイプ入手の困難さ，運航経費確保の困難さ等難問を抱えている。プチスポットパイプのライザーレスマントル採取掘削は，東北沖プチスポット火山の分布海域（図 7）で実施されることになるであろう。そうすれば，何点かの有利な条件が付加される。即ち，(A) 日本近海のため，地球深部探査船「ちきゅう」の，サイトと日本間の動員費は削減される。(B) 東北地方太平洋沖地震域に近い自然災害削減・防災にも貢献できる。(C) 掘削後の観測孔の維持・管理・活用に有利であり，海底ケーブルと接続しての常時観測も視野に入る，等が考えられる。

今回提案した地球深部探査船「ちきゅう」の 12000m ドリルパイプによる，プチスポットパイプのライザーレスマントル採取掘削の成就を心から願う。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) および海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の船舶および陸上関係者の方々に世話になりました。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: 20A042, 20B039, 21A036, 21B039, 22B058) で分析させていただき、関係者の方々に世話になりました。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 114, 2020, 受付番号 123, 2021, 受付番号 121, 2022) 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 の方々および JAMSTEC 運用部の方々には船舶ハードウェアに関する情報提供・御教示をいただきました。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.

BLAND Energy Partners (2013): Implementation Plan for the BEAM – “Borehole into the Earth’s Mantle” Program Final Report. 14 July 2013.

Colorado Geological Survey (1999): COLORADO DIAMONDS. *Rock Talk*, **2**(3), 1–12.

江口暢久・澤田郁郎 (2022) : マントル掘削へ向けて — 技術的検討: BLADE レポートから —, 月刊地球, 号外地球, **72**, 113–123.

Fujie, G., Kodaira, S., Nakamura, Y., Morgan, J.

P., Dannowski, A., Thorwart, M., Grevemeyer, I. and Miura, S. (2020): Spatial variations of incoming sediments at the northeastern Japan arc and their implications for megathrust earthquakes. *Geology*, **48**(6), 614–619.

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.

Hirano, N. (2011): Petit-spot volcanism: A new type of volcanic zone discovered near a trench. *Geochemical Journal*, **45**(2), 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パクト. 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 — 超モホール計画の提案 —. 地質学雑誌, **116**(1), 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**(14), 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**(4), 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**(2),

- 249–257.
- Hirano, N., Machida, S., Sumino, H., Shimizu, K., Tamura, A., Morishita, T., Iwano, H., Sakata, S., Ishii, T., Arai, S., Yoneda, S., Danhara, T. and Hirata, T. (2019): Petit-spot volcanoes on the oldest portion of the Pacific Plate. *Deep-Sea Research Part I*, **154**, 103142.
- 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.
- 稲垣史生・倉本真一・平朝彦 (2022) : 地球深部探査船「ちきゅう」の海洋科学掘削が切り開く新しい未来地球システムの価値創造, 月刊地球, 号外地球, **72**, 5–21.
- 石井美孝 (2022) : 我が国における海洋科学掘削の取組について～技術的視点～, (第2回) 文部科学省海洋科学掘削委員会資料, 文部科学省令和4年度会議資料, <https://www.mext.go.jp/kaigisiryoy/2022/index.html>, (2023年8月31日参照).
- Ishii, T. (1981): Pyroxene geothermometry of basalts and an andesite from the Palau-Kyushu and West Mariana Ridges, Deep Sea Drilling Project Leg 59 Initial Rep, *Deep Sea Drilling Project*, Washington, D.C. (US Government Printing Office), **59**, 693–707.
- 石井輝秋 (1987) : 海山・海洋島の分類, 上下動とその一生 —海山, 海洋島にオリビン団塊を求めて—. 月刊地球, **9**, 542–549.
- 石井輝秋 (2018) : 研究航海の実際と野外自然科学 — グローマー・チャレンジャー号と白鳳丸航海—. 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・油谷拓・浅見慶志朗・桂木悠希・坂井俊太・中野幸彦・松崎琢也 (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— 歴史的発見: 東北沖太平洋超深海底の爆裂火口 (マール) —. 深田地質研究所年報, **20**, 105–128.
- 石井輝秋・金子誠・平野直人・町田嗣樹・秋澤紀克 (2021) : 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—. 深田地質研究所年報, **22**, 99–118.
- 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)*, Sugimura, A., eds., Kobe University, 29–41.
- 海洋出版 月刊地球編集部編 (2022) : 海洋科学掘削によるマントル到達への挑戦 —地球最大のフロンティアに挑む—, 月刊地球, 号外地球, **72**, 151p, 海洋出版.
- 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*, **27**(1), 2–25.
- Kroenke L., Scott R., Ishii T., et al. (1981): *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 59, DSDP Leg 59 Participating Scientists*. US Govt. Printing Office, Washington, D. C., USA, 820p.
- Machida, S., Kogiso, T. and Hirano, N. (2017):



- Petit-spot as definitive evidence for partial melting in the asthenosphere caused by CO<sub>2</sub>. *Nature Comm.*, **8**, 14302, doi:10.1038/ncomms14302.
- Michibayashi, K., Tominaga, M., Ildefonse, B. and Teagle, D. A. H. (2019): What lies beneath: The formation and evolution of oceanic lithosphere. *Oceanography*, **32**(1), 139–149.
- 文部科学省 (2022) : 海洋科学掘削委員会資料, 文部科学省令和4年度会議資料, <https://www.mext.go.jp/kaigisiryoy/2022/index.html>, (2023年8月31日参照) .
- Oceanography (2019): Special issue on scientific ocean drilling, Looking to the future. *Oceanography*, **32**(1), 1–97, <https://tos.org/oceanography/issue/volume-32-issue-01>, (2023年8月31日参照).
- Sato, Y., Hirano, N., Machida, S., Yamamoto, J., Nakanishi, M., Ishii, T., Taki, A., Yasukawa, 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.
- 島 伸和・藤江 剛・山下幹也 (2022) : 現実的なマントル掘削のシナリオ. 月刊地球, 号外地球, **72**, 30–39.
- Sugimura, A. ed. (1986): *Sea-level changes and tectonics in the Middle Pacific (Report of the HIPAC Project in 1984 and 1985)*, Earth Science, Kobe University, 126p.
- Taneja, R., Rushmer, T., Blichert-Toft, J., Turner, S. and O'Neill, C. (2016): Mantle heterogeneities beneath the Northeast Indian Ocean as sampled by intra-plate volcanism at Christmas Island. *Lithos*, **262**, 561–575.
- 巽 好幸 (2022) : 我が国における海洋科学掘削の取組について～科学的視点～, (第2回) 文部科学省海洋科学掘削委員会資料, 文部科学省令和4年度 会議資料, <https://www.mext.go.jp/kaigisiryoy/2022/index.html>, (2023年8月31日参照).
- Uenzelmann-Neben, G., Schmidt, D. N., Niessen, F. and Stein, R. (2012): Intraplate volcanism off South Greenland: caused by glacial rebound? *Geophys. J. Int.*, **190**, 1–7.
- 海野 進・デーモン・ティーグル・スティーブン・ドント・グレッグ・ムーア・ブノア・イルドフォンス (2022) : ハワイ沖海洋地殻掘削調査: マントル掘削パイロットホールプロジェクト. 月刊地球, 号外地球, **72**, 22–29.
- Yamada, Y., Dugan, B., Hirose, T. and Saito, S. (2019): Riser drilling: Access to deep subseafloor science. *Oceanography*, **32**(1), 95–97.
- 山田泰広・真田佳典・Moe Kyaw (2022) : マントル掘削時における孔内検層. 月刊地球, 号外地球, **72**, 124–131.
- 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.
- Yonekura, N., Ishii, T., Saito, Y., Matsumoto, E. and Kayane, 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)*, Sugimura, A., eds., Kobe University, 44–67.