



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—

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

海野 進

デーモン・ティーグル

スティープン・ドント

グレッグ・ムーア

ブノア・イルドフォンス

**Off-Hawaii Ocean Crust Drilling Project :
Creating a Pilot Hole for Mantle Drilling**

**Umino Susumu, Damon A. H. Teagle, Steven
D'Hondt, Gregory F. Moore, Benoit
Ildefonse**

うみの すずむ [金沢大学]
デーモン・ティーグル [サウザンプトン大学]
スティープン・ドント [ロードアイランド大学]
グレッグ・ムーア [ハワイ大学]
ブノア・イルドフォンス [モンペリエ大学]

MoHole To Mantle (M2M) モホール計画は、通常の海洋底を掘削してモホ面を貫通し、人類史上初めてその場にあるマントル物質の回収を目指している。3カ所のモホール候補地の一つ、ハワイ沖ノースアーチでは上部地殻を貫通し、モホールの設計に不可欠な基盤岩情報を得るためのパイロットホールを日本の「ちきゅう」によって掘削する計画が実現へ向けて動きはじめた。

1. はじめに

今日の深海科学掘削の起源はモホール計画にある。モホールは月に人類を送ったアポロ計画とともに NSF の二大科学プロジェクトとして行われ、1961年に人類史上初めて船上から深海底を掘削することに成功した(草野・海野, 2013)。月まではわずか10年で到達した一方、半世紀以上を経過した今日に至るまで、未だマントルには到達できていない。大きな技術的な障害と考えられるのが、数 km に及ぶ深い孔を掘削する上で必然的に起きる坑壁の崩壊である(海野, 2015)。坑壁崩壊を未然に防ぎながら、マントルに達する超深度掘削を実現するために、ライザーシステムを装備した地球深部探査船「ちきゅう」が作られた。「ちきゅう」を用いる 805-M2M マントル掘削計画は 2012 年に日米欧 6 カ国 67 名の国際チームによって共同提案され、水深 2500 m までという「ちきゅう」の 21 インチ径のライザーシステムの技術的制約と将来期待される技術開発を見越した上で、ハワイ沖、バハカリフォルニア沖、コスタリカ沖の 3 カ所を候補地とした。近年の技術革新によって、軽量、小口径のスリムライザーを使用した、ハワイ沖ノースアーチにおける水深 4300 m での大水深掘削の可能性が議論されはじめている(稲垣ほか 55 江口ほか, 本号外)。机上の計算ではあるが、ようやくモホールがまさに現実のプロジェクトとして手が届くところに来たのである。「ちきゅう」のオペレーションが始まって 15 年、25 年~30 年という船の耐用年数を考えると、早急にマントル掘削へ向けた次のステップへと動き出す必要がある。

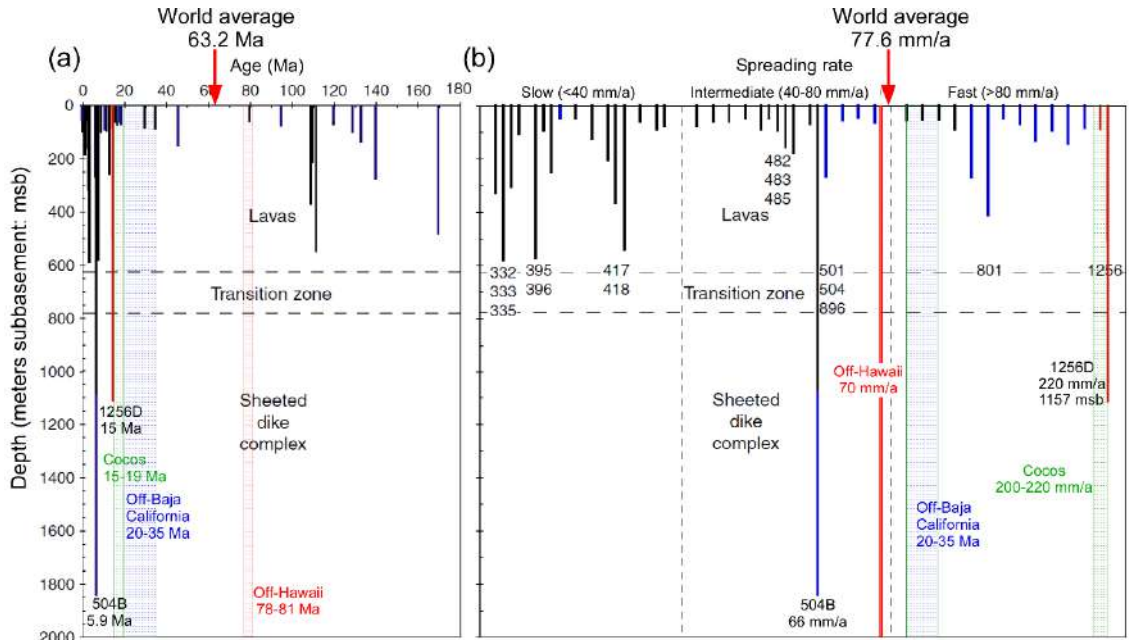


図1 基盤岩を50m以上掘削した深海掘削孔の深さと基盤岩年代 (a), および低速, 中速, 高速に分類した掘削孔とその深さ (b) (Morishita et al., 2019 より).

そこで JAMSTEC とハワイ大学は共同して 2017 年に M2M モホール計画の候補地の一つであるハワイ沖ノースアーク周辺の地震波構造探査を行い、これを受けて 2018 年 11 月には金沢大学と JpGU の協賛で Hard Rock Drilling Focus Group ワークショップを開催、ハワイ沖上部地殻掘削のプレプロポーザルを 2019 年 4 月に IODP に提出した (Morishita et al., 2019). その後、科学評価パネルのアドバイスを受けて、2020 年 6 月～7 月に 16 カ国 106 名の参加者を得て、フルプロポーザル作成のための国際ワークショップを開催した (Umino et al., 2021). ハワイ沖上部地殻掘削計画 951-フルプロポーザルは、2020 年 10 月に IODP に提出され、科学評価パネルからは深海掘削科学で掲げられたフラッグシップ課題であるマントル掘削計画に直結する重要課題と評価された。同時に本掘削のターゲットである海洋地殻第 2Ⅰ/第 3 層境界の深度を正確に把握するために追加の構造探査を求められた。そこで将来のマントル掘削を見

据えて、より精密で詳細な構造探査を実施するための航海研究を計画している。一方、海外ではサウザンプトン大学のデーモン・テグル教授が中心となって、イギリス自然環境研究会議 (NERC) と IODP にハワイ沖掘削サイトの構造探査のための調査研究申請の動きを進めている。

2. IODP-951 ハワイ沖の成熟した上部地殻貫通計画

ハワイ沖掘削の科学目的は大きく 3 つある[:(1) 海洋地殻の構造と形成・改変プロセス, 2) 成熟した海洋地殻の変質プロセス, 3) 海洋地殻深部の微生物圏の広がりの実態の解明。

海洋地殻は中央海嶺でマグマの付加により形成されると同時にテクトニックに引き延ばされ、変形し、熱水変質を受ける。変質作用は地殻形成後も間欠的に起こり、大気・海水との化学反応を経て海溝からマントルに沈み込むことによって、地球内部と表層の大きなエネルギー・物質循環に主

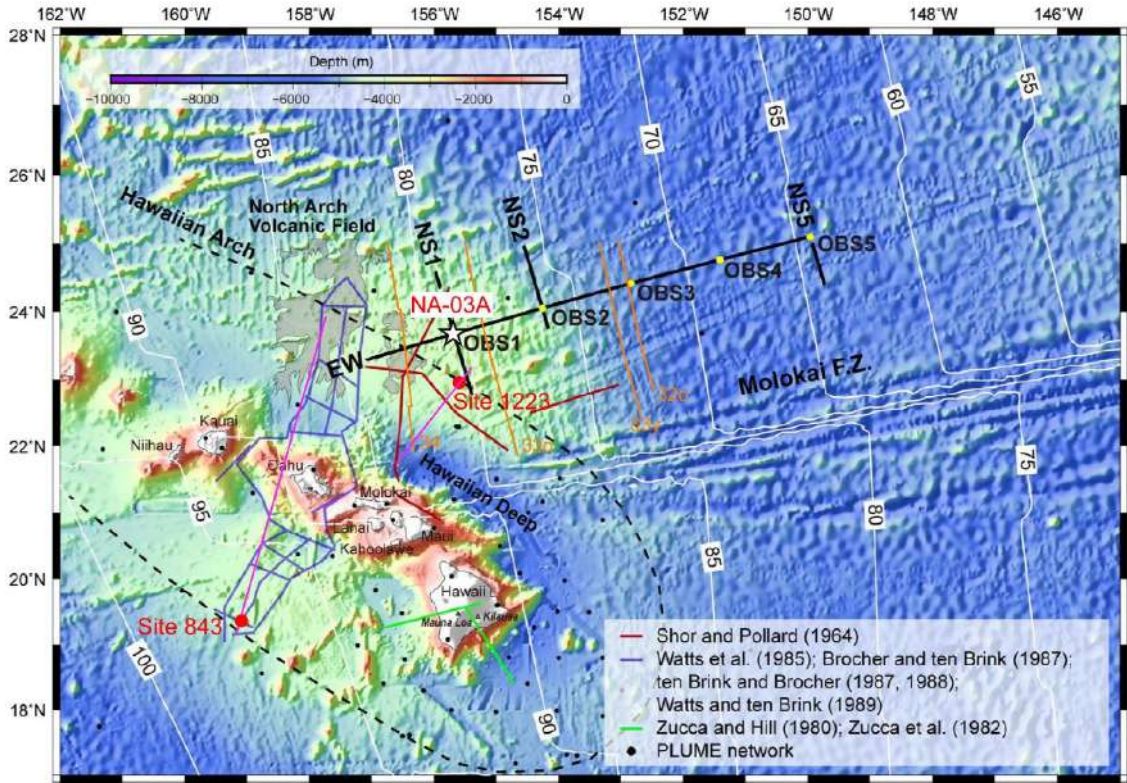


図2 ハワイ沖ノースアーチの地震波構造探査測線と掘削提案 (NA-03A) (Umino et al., 2021 より)。

要な役割を担っている。このプロセスについて、われわれはようやく理解し始めたところで、まだその全容については不明の点が多く残されている。

これまでに深海掘削計画で掘られた海洋地殻は2000 万年前よりも若い海底に片寄っており、全海洋底の平均年齢6300 万年前を含む2000 万~1 億1000 万年前の海底はほとんど掘削されていない(図1)。また掘削孔の多くは低速拡大地殻であり、シート状岩脈群にまで到達した掘削孔は年間6.6 cmで拡大した504B孔と年間220cmで超高速拡大した1256D孔の2本しかない。ハワイ沖のノースアーチの地殻年齢は8000 万年前と、これまでの深海掘削の欠損を埋めるものであり、全海洋底の平均年齢とも近い。また、ハワイ沖の拡大速度は全海洋地殻の平均拡大速度7.8 cm/年に近く、年齢、拡大速度の点で代表的な海洋地殻であると言える。

M2M モホール計画で挙げた3つの候補地のうち、ハワイ沖は水深が4000 mを越え、最も深い。これは将来、マントルまで掘削する観点からは短所とされてきたが、現時点では先に述べたスリムライザーの導入で解決の見通しが立っている。一方、長所は8000 万年前という古い海底であることで、地殻熱流量は55 mW/m²と同年代の平均的な海底と変わらない。従って、海底下2 kmで50°C以下、モホ面付近でも150°C前後と予想される。低温であれば掘削時の泥水による冷却に伴う熱応力も小さく、坑壁の破壊は最小限であることが期待される。また、モホールは掘削後に坑井を利用した様々な観測を行うことが想定されるが、多くのセンサー機器の耐熱温度は200°C以下であることから、低温は必須条件である。この点においてハワイ沖は唯一の候補地と言える。提案された

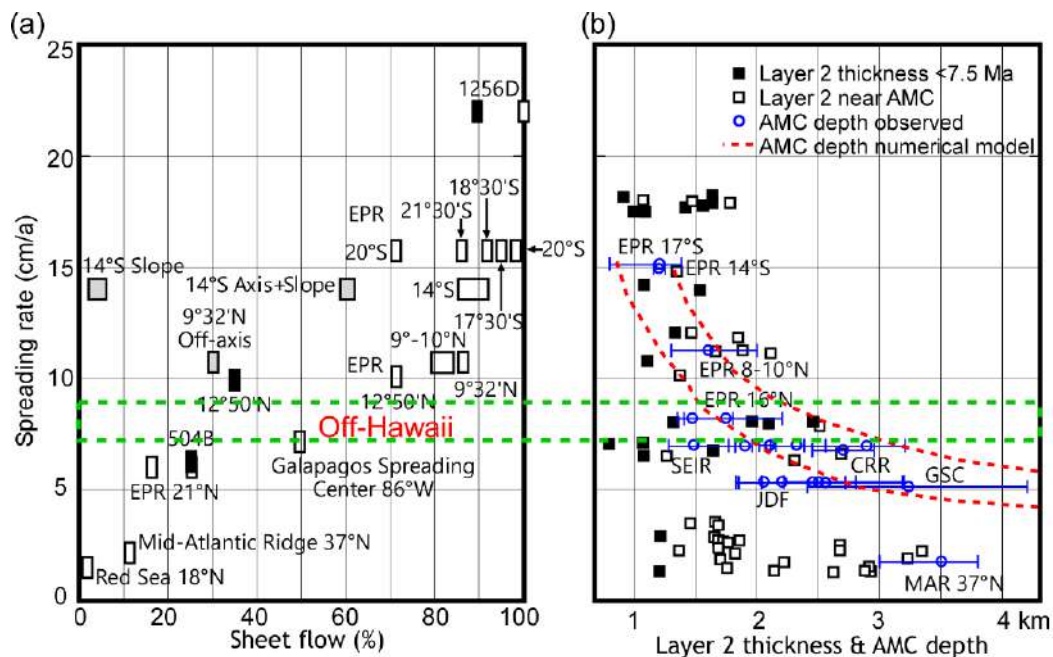


図3 海嶺の両側拡大速度とシート溶岩の面積比率 (a), 海洋地殻第2層厚及びマグマ溜まり深度 (海野・草野, 2021).

掘削サイトは2017年に実施された「かいいい」の探査測線の交点にある(図2)。堆積物の厚さは110 m、海洋地殻第2層/第3層境界までの深さは1.7 km~2.5 kmにあり、深さ5.5 kmには断続的なモホの反射面が見つかっている。水深が深くても、モホ深度が浅いことはハワイ沖サイトの利点である。

3. 海洋地殻の構造と形成・改変プロセス

これまでの深海掘削の歴史を通じて、深海堆積物、噴出岩~岩脈群からなる上部地殻を貫通して、下部地殻集積岩にまで到達した掘削孔は一つもない。そのため、地震波速度や重力によって描かれた広域的な地殻構造と実際の岩相や岩石物性との対比はわずかな例外を除いて皆無であり、地球物理学的探査と地質構造の関係を正確に理解することができていない。海洋地殻の構造は拡大速度とマグマ供給率に依存して変化すると考えられ、ノースアーチの拡大速度は、高速拡大から中速拡大への遷移領域にあり、東太平洋海膨とガラパゴス海嶺の中間的な地殻構造が期待される。

年間8 cmよりも高速拡大する海嶺軸では、拡大速度の低下と共にマグマ溜まりが深くなる傾向があり、この深さはマグマ供給によってもたらされる熱量と熱水循環によって冷やされる熱量のバランスで決まると考えられている(図3)。海嶺軸上はシート溶岩が卓越し、起伏の乏しい平坦面を覆っている。これはプレート拡大が断層形成を伴わずにもっぱらマグマ貫入によって起こるためである。高速拡大海嶺の上部地殻は高密度のシート溶岩と岩脈群からなり、マグマ溜まりは高い余剰圧を持つ。そのためマグマは常に噴火しやすい状態にあり、プレート拡大イベント毎に噴火、即ちマグマ溜まりから海底に達する岩脈を形成するのである(海野・草野, 2021; 海野ほか, 本号外)。一方、年間70 cmよりも遅い中速海嶺では、マグマ溜まり深度が大きくばらつくようになり、枕状溶岩が優勢となる。溶岩流形態は基盤の傾斜に依存して変化し、枕状溶岩は平均10°以上の斜面上で卓越する(Umino et al., 2000)。海嶺軸上では、正断層の形成によって急傾斜の断層崖や中軸トラフと呼ばれ

る地溝が発達する。噴出した溶岩は中軸トラフを埋積する枕状溶岩となったり、急崖を流下する際に破碎して火砕岩となったりする。そのため中速拡大海嶺の上部地殻はマグマよりも低密度な噴出岩層と高密度な岩脈群で構成され、両者の間に見かけの浮力の中立点が形成される。これによりマグマ溜まりから上昇するマグマが捉えられ、シート状岩脈群を発達させる。このように拡大速度が年間 8 cm から 70cm になるあたりで、プレート拡大の仕方がマグマ貫入が卓越する高速海嶺型から、断層を伴って拡大する中速海嶺型へと移り変わり、その結果として生じる地殻構造や構成する岩相、密度構造が異なると考えられる。ノースアーチはプレート拡大様式の変化が起きる拡大速度範囲にあり、地殻構造が漸移的に変化するか、ある閾値を境に急激に変わるのかを調べるのに適している。

ノースアーチは周囲の太平洋底よりも 10006m も浅い高まりとなっている。これはマントル上昇流の影響によって高温になったリソスフェアの浮力と巨大な火山体の荷重によって生じた撓みであると説明されている。ノースアーチ下の地殻上部は地震波速度がやや遅くなっており、撓みによって生じた亀裂や低温流体による変質作用の影響が考えられる。このリソスフェアの撓曲の規模は東北日本沖のアウトラーイズを凌駕するほどで、海溝に沈み込むプレートの撓曲に伴う地殻構造の改変を理解する上でも重要である。また、ノースアーチ付近にはハワイプルームとは成因的に異なるアルカリ玄武岩の火山活動が知られており、ノースアーチ火山活動に伴う貫入岩体による地殻構造の改変や熱水変質の影響も考えられる。これらの改変の影響を明らかにすることも掘削の目的の一つである。

ノースアーチ上にはハワイ火山の山体崩壊に伴うタービダイトが厚く堆積している。オアフ島北半部を占めるコーラウ火山の崩壊では最大波高 200cm、北米、日本の太平洋岸にもそれぞれ波高 70 m と 106m の津波が到達したと推定されている。従って、ハワイの山体崩壊についての理解は日本にお

いても防災上の観点から重要である。ODP サイト 1223 掘削孔では厚さ 1006m のうち上部 41 m のコアが回収され、およそ 10 万年に 1 回の頻度でコーラウ火山が崩壊したことがわかっており、ハワイ火山列全体ではさらに高頻度の崩壊が予想される (Garcia et al., 2006)。給源火山から離れたノースアーチで掘削することによって、積み重なったいくつもの山体崩壊由来のタービダイトをわずか一つの掘削孔で網羅的に捉えることが可能である。

4. 海洋地殻の変質プロセス

海洋地殻には熱水変質の程度、時間、空間的広がりについての情報が記録されており、地質時代を通じた海水の化学組成の変化を推定するのに役立つ。コアを分析することによって、海嶺軸から離れるにつれて、いつ、どれほど深く熱水変質が進行し、地殻と海水の間で物質交換が起きるかを理解することができる。さらには希ガス、水、CO₂、窒素、イオウ、B、Li など、生化学的な鍵となる化学物質の循環を定量的に評価することが可能となる。このような熱水変質プロセスは海嶺軸から離れていく過程で連続的に起きるわけではなく、間欠的なイベントであり、流体-岩石反応の度合いは、海洋地殻の年代だけでなく、流体の流れや反応を促進する外的要因にも依存する。その結果、地殻年代と流体の流れ、熱化学反応、生物活性の間には複雑な関係がある。

海嶺軸から 6500 万年までの海底では実際の熱流量はモデル値よりも低くなっていることから、この年齢まで地殻中の熱水循環は継続すると考えられている (図 4)。しかし、これまでの掘削コアの解析の結果、ほとんどの変質鉱物の形成は海嶺軸から 2000 万年以内に終了したことがわかっており、果たして、2000 万年から 6500 万年までの 4500 万年間に起きる低温流体の流れは、変質鉱物や化学反応の痕跡を全く残さないのであろうか。これに対する解答の一つは、これまでの掘削が形成後 2000 万年以内に厚い堆積物で覆われてしまった海底に片寄っている、という可能性である。形成後 8000 万年を経過したノースアーチ周

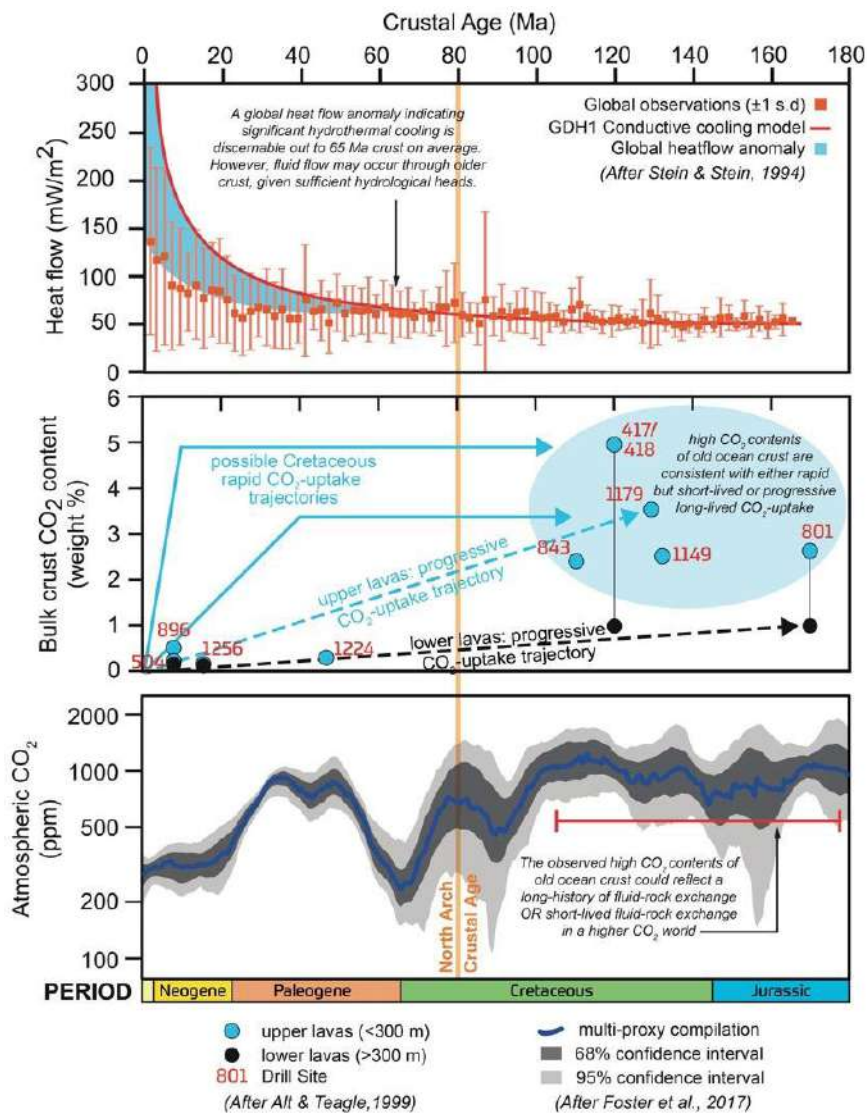


図4 海底年代と地殻熱流量(上),(地殻中の全岩CO₂含有量(中),および大気中のCO₂濃度の変化(下)),(Umino,et,al., 2021より).

辺の海底は堆積物の厚さが世界平均の3分の1しかなく、形成後2000万年よりも後で起きた変質作用を調べるのに理想的と言える。

例えば、変質による地殻中のCO₂の変化について考えてみよう。1億年以上を経過した地殻は新しい地殻よりもはるかにCO₂に富んでいる。これは地殻が時間の経過と共にCO₂を取り込んだのか、それとも白亜紀以前は海水のCO₂濃度が高

かったのであろうか。このことは中間の8000万年という年齢のノースアーチの地殻で確かめることができる。また、オフィオライトに見られる岩脈群やガプロは、高温の変成作用を経験した後で、岩石全体が一様に低温変質を受けている。ところが、これまでの深海掘削で得られたコアでは、岩脈群の最深部でも変質は熱水脈とその周辺のみに限られており、最も変質しやすいカンラン

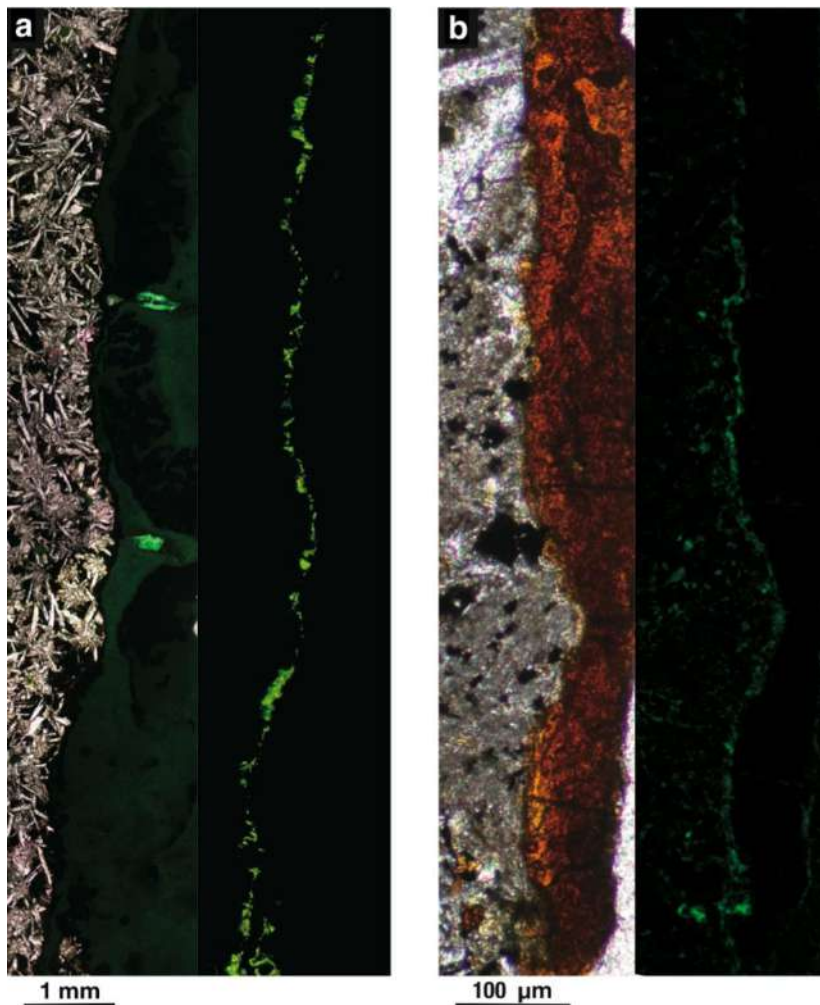


図5 SYBR Green Iで染色した微生物細胞の光学顕微鏡および蛍光顕微鏡画像。(a) スメクタイト脈から見出された微生物の痕跡, (b) 炭酸塩と鉄マンガン酸化物脈中の微生物の痕跡 (Suzuki et al., 2020 より).

石ですら未変質のまま残存していることがある。

これは岩脈群まで達した掘削孔が若い地殻に限られているためなのか、あるいはオフィオライトがオブダクトする過程で被った変質作用を記録しているのか、ノースアーチの掘削によって確かめることができる。

5. 海洋地殻深部の微生物圏の広がりの実態

地殻深部への掘削によって、どこに、どれくらいの微生物コロニーが存在するのか、どのようにしてエネルギーを得て炭素を固定するのか、について理解を深めることができる。

堆積物や基盤岩浅部、断層崖に露出するガブロから様々な生物が棲息していることが知られている。しかし、地殻深部のその場にある生命の痕跡を調べた例はなく、果たして下部地殻に生物が棲息しているのか、あるいは断層などの流体の経路に沿って運ばれ、たまたまその場に至ったのかは、不明である。最近の研究によると、古くて冷たい太平洋の地殻浅部に棲息する微生物は特有の二次鉱物に多いことがわかっている(図5; (Suzuki et al., 2020)。玄武岩中の鉄に富むスメクタイトやセラドナイト+鉄水酸化鉄物の脈には存在するが、炭酸塩鉄物脈には見つからない。これら

の二次鉱物は低温の流体から晶出するが、スメクタイトや鉄水酸化鉱物が炭酸塩鉱物や沸石に先立って生成することが多い(Alt, 1995)。海洋地殻が冷却するにつれて、微生物の棲息可能な温度環境はより深部へと広がっていく。従って、どのような形であれ、海水が浸透していけば生命を維持する環境が出現すると考えられる。これまで噴出岩深部やその下位の岩脈群、さらに下にあるガブロ中の微生物については全く調べられておらず、ハワイ沖掘削によって海洋地殻内における微生物の鉛直分布、組成、活性、生物地球化学的な役割を明らかにすることができる。

地殻浅部における微生物群集を維持するための代謝活動はよくわかっていない。代謝活動は地殻の変質、二次鉱物の形成と亀裂の充填などによって、地殻と海洋の化学組成や地殻構造に物理的な変化をもたらす。生物は様々な物質を酸化することでエネルギーを得る。酸化反応の担い手には、地殻中の還元元素、海水中の溶存有機物(DOM)、非生物起源の有機物や蛇紋岩化に伴う水素、断層運動によって放出される水素、水の放射分解による水素などがある。これらのプロセスの代謝的重要性は深くなるにつれて変わっていくことが期待される。地殻浅部では海水と共に運ばれた溶存有機炭素が、深部では岩石と水反応で生じた水素やメタンなどが多くなると予想される。これらはいずれも掘削によってのみ確かめることが可能である。

6. おわりに

人類史上初めて海洋地殻・モホ面を貫通し、その下のマントルへ到達することによって包括的に地球惑星システムを解明するマントル掘削は、日本が世界をリードする一大科学目標である。この歴史的な科学目標の達成には、「ちきゅう」の大水深・大深度掘削技術の適用が唯一実現可能な手段であり、それが成功すれば、19世紀に英国で生まれた進化論、20世紀に米国が人類を月に送ったアポロ計画と並ぶ、M21世紀の金字塔を日本が打ち立てることとなるのは必定である。マントルに

至る道へと続く門は、今われわれの目前に開かれている。その道に勇気を持って踏み出そうではないか。

謝辞[本号外を企画・編集した海洋研究開発機構マントル掘削プロモーション室の皆様には執筆の機会を与えていただいた。また同室の稲垣史生博士にはコメントをいただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] Garcia, M. O., Sherman, S. B., Moore, G. F., Acton, G., Goll, R., Popova-Goll, I., and Natland, J., 2006. Frequent landslides from Ko'olau Volcano: Results from ODP site 1223. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 151, 251-268, doi:10.1016/j.jvolgeores.2005.07.035.
- [2] Alt, J. C., 1995. Subseafloor processes in mid-ocean ridge hydrothermal systems. In: Humphris, S. E., Zierenberg, R. A., Mullineaux, L. S., and Thomson, R. E. (eds.), *Seafloor hydrothermal systems: Physical, chemical, biological, and geological interactions*.
- [3] 草野有紀・海野進(訳), 海野進・ケンニールソン・バーナードウッド, 2013. 月より遠いマントルへの道, パリティー, 29, 4-11. 丸善出版, 東京.
- [4] Morishita, T., Umino, S., Kimura, J., Yamashita, M., Ono, S., Klein, F., and Garcia, M. O., 2019. Workshop report on hard-rock drilling into mid-Cretaceous Pacific oceanic crust on the Hawaiian North Arch. *Scientific Drilling*, 26, 47-58, doi.org/10.5194/sd-26-47-2019.
- [5] Suzuki, Y., Yamashita, S., Kouduka, M., Ao, Y., Mukai, H., Mitsunobu, S., Kagi, H., D'Hondt, S., Inagaki, F., Morono, Y., Hoshino, T., Tomioka, N., and Ito, M., 2020. Deep microbial proliferation at the basalt interface in 33.5-104 million-year-old oceanic crust. *Communications Biology*, 3, 136.
- [6] 海野進, 2015. M2Mモホール計画[地球深部探査船「ちきゅう」によるマントル超深度海底掘削への挑戦, 土木学会論文集A2, 18, 2-10.
- [7] Umino, S., Lipman, P. W. and Obata, S., 2000. Subaqueous lava flow lobes, observed on ROV KAIKO dives off Hawaii. *Geology*, 28, 502-506, [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<503:SLFLOO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<503:SLFLOO>2.0.CO;2).
- [8] Umino, S., Moore, F., Boston, B., Coggon, R., Crispini, L., D'Hondt, S., Garcia, M. O., Hanyu, T., Klein, F., Seama, N., Teagle, D. A. H., Tominagana, M., Yamashita, M., Harrism, M., Ildefonse, B., Katayama, I., Kusano, Y., Suzuki, Y., rembath-Reichert, E., Yamada, Y., Abe, N., Xiao, N., and Inagaki, F., 2021. Workshop Report: Exploring deep oceanic crust off Hawai'i. *Scientific Drilling*, 29, 69-82, doi.org/10.5194/sd-29-69-2021.
- [9] 海野進・草野有紀, 2021. ハワイ沖上部地殻掘削から海洋プレート形成過程に迫る, 地学雑誌, 130, 599-614, doi:10.5026/jgeography.130.599.

