



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—

現実的なマントル掘削のシナリオ

島 伸 和
藤 江 剛
山 下 幹 也

A scenario for realistic Mohole

Nobukazu Seama, Gou Fujie, Mikiya Yamashita

しまのぶかず : 神戸大学理学研究科惑星学専攻
/ 海洋底探査センター
ふじえごう : 海洋研究開発機構
やました みきや : 産業技術総合研究所

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。日本が持つ強みの1つである地震学的視点から、マントル掘削の意義を示す。マントル掘削を実現するには、最有力候補海域と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。

1. はじめに

地球深部探査船「ちきゅう」が、2005年7月に建造され、約2年間の操船及び掘削訓練中である2006年6月に神戸港に寄港し、一般公開された。同じ6月に「ちきゅう」建造目的の1つであるマントル掘削を実現するために、Mission Mohole コアメンバー会議が組織され、筆者の1人であり、神戸港で初めて「ちきゅう」を目にした島がメンバーとして関わることになる。マントル掘削は、Moholeという愛称で呼ばれ、その名称は多くの人々が耳にするぐらいに、計画されてからの歴史が長く、その科学目的も多くのWSで議論されている。科学的意義については、すでに煮詰まったコアとなるものもあり、議論の毎に新たな知見が付加されていくという状態であった。この年の9月に行われたMission Moho WSでは、それ以前の内容が良くまとめられており、これまで欧米がリードしているプロジェクトであることもよく分かる(Ildefonse et al., 2007)。この状況であったプロジェクトを、2010年6月に金沢で実施された国際WS (Ildefonse et al., 2010)までの4年間で、掘削候補海域を含め日本が主導するマントル掘削実現のシナリオとしてまとめ上げた。その内容の紹介と、地震学的視点からのマントル掘削の意義、そしてこれまでの調査内容などを紹介する。

2. 日本が主導するマントル掘削

マントル掘削の基本方針を、2008年11月の時点で次のようにまとめた。

- 1) モホ貫通+ α の深さまで掘削
- 2) 掘削孔を海洋底での標準孔と位置づけ、その標準孔としての意義を高めるために、次の4つを実施する。

- ・十二分な事前調査（密な地震波構造探査）
- ・すべてのセクションでの物性物理の孔内計測
- ・すべてのセクションでの掘削屑を取得
- ・必要な部分のコアを取得

3) 海洋底での深部掘削技術の確立

その上で、現実的な掘削の計画として次の3つのPhaseで実施することを提案している。

Phase 1: 掘削しながら物性物理計測を行うロギングツールであるLWD(Logging-While-Drilling)による物性物理計測+掘削屑(カッティングス)のみ収集する掘削を、モホロピッチ不連続面(モホ面)を貫通するまで行い、その後にマントルでのコアリング

Phase 2: 主要箇所(の横掘もしくは枝掘)によるコアリング

Phase 3: 掘削孔を標準孔として保存し、この標準孔で新たな重要性が見いだされた部分に対する掘削提案に応じて、横掘もしくは枝掘によるコアリング

重要な点は、現実的なマントル掘削を行うために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にある。コアリングの代わりに、掘削しながらの物性物理計測の実施と、掘削屑をとり続けるということがポイントである。この方法による掘削を、後で紹介するハワイ沖で実施する場合、2011年にBlade Energy Partnersが行ったFeasibility Studyのレポートによると、443日の日数が必要である。それに対して、すべてをコアリングする場合には934日と大きな開きがある。この日数がすべてコストに反映されることを考えると、実現のためには重要なポイントとなる。さらに、ビット取り替えにかかる船上と掘削点の往復時間が、総掘削時間の半分近くを占めていることから、取り替えの回数を減らすためのビット開発が総掘削時間を減らすためには大きな要素である。

コアリングは、マントルで実施する分を除いて、Phase 2と3に委ねている。Phase 2では、例えば地殻とマントル境界であるモホ面のように、Phase 1でもコアリングを望んでいるような主要箇所でのコアリングを実施する。一方で、Phase 3

は、残したこの標準孔のどの箇所(深さ)でのコアが必要という掘削提案を新たに求め、ある海域のこの地点での掘削が必要という通常の掘削提案と同様に扱って、コアリングを実施するという考えである。

コアリングをしないという選択が日本主導につなげる鍵となる。掘削科学の歴史から、コアリングすることが本流であり、それ以外はサブ的な役割として扱われることが多かった。これに対して、基本方針の中で実施することとして挙げたコアリングを除く3つに力点を置き、この点で日本が主導する役割を果たすべきだと考える。例えば、密な地震波構造探査は、単に事前調査と位置づけられるのが普通であるが、構造探査を主体にしている側からの視点では、掘削孔の位置づけそのものが変わる。これについては、次節で述べる。孔内計測による物性物理測定は、広域観測とコアとの間をつなぐ重要な情報であり、「ちきゅう」で実施できる孔内計測の能力を最大限に利用することにも注力すべきである。さらに、レーザー掘削ならではの掘削屑の利用である。これまでの科学掘削は、レーザーレスの掘削であったので、掘削屑の利用という発想すらない。惑星探査の1つの衛星ミッションでは、限られた物理探査データや極少量の試料しか取得できないが、それを最大限に活かすべく計画がなされる。これと比較すると、掘削でサブ的な扱いを受けている項目からも膨大なデータと試料を得ることになり、これらを主な扱いで臨む体制を構築すべきである。この実現に向けて実施すべきこととして次の5項目をあげている。

- 1) 事前調査と掘削結果の対比でできる科学目的の明確化
- 2) 掘削屑でできる科学目的の明確化
- 3) 物性物理計測でできる科学目的の明確化
- 4) 掘削コアが必要な部分の選定とその科学目的の明確化
- 5) 掘削場所の選定

1)~3)は、少なくとも技術面では日本がリードしているので、科学面でもリードできる体制を早

急につくる必要がある。また、4) は、すでに成熟している部分でもあるが、セクション毎に国際チームを編成し、科学内容を充実させて提案する形をとるのであろう。この時、日本として実施したい内容を明確にし、鍵となるセクションに関しては、日本チームを中心に提案できればと考える。5) については、4 節で述べるようにすでに日本から提案をしている。

3. 地震学的なマントル掘削の意義

マントル掘削地点は、地球物理学的な面からは地震波速度構造の参照地点という側面を持つため、地震学的な視点が重要であり、詳細な地震波速度構造を吟味して決定すべきである。近年、海底地震計 (OBS) をもちいて詳細な地震波速度構造を推定することが可能となり、標準的な海洋地殻を形成すると考えられてきた高速拡大系による海洋地殻においても、高い精度の速度構造では多様性が見いだされている。このため、標準的でありながら多様性のある地震波速度構造を解釈するためには、参照となるポイントが不可欠であり、海底の表面からモホを貫通してマントル岩まで連続した掘削孔が、重要な価値となる。このため、掘削地点付近での地球物理学的な事前調査を十二分に行いその対比が必須である。また、ひとたび、地震波速度構造に参照となるポイントが与えられれば、その構造変化の空間的広がり地震波構造探査で把握することが可能となるため、1つの掘削孔の価値は計り知れない。地殻・最上部マントル構造の違いは、海洋地殻の生産状態の変化を表しており、異なる速度構造をその物性を含めて理解することが、拡大速度の違いやマントル不均質による議論や、さらにその変化に地殻年代との関連があれば地球史を議論することにもつながるからである。

海洋地殻から海洋マントル最上部にいたるまでは、地震波を用いた地下構造研究、特に人工振源を用いた屈折法・反射法地震探査によって、詳しい様相が明らかになりつつある。例えば、図1は、海洋研究開発機構がエアガン (人工振源) と OBS

を用いて日本海溝沖の太平洋プレート上で実施した屈折法地震探査および反射法地震探査のデータ例および解析結果である (Fujie et al. 2020)。図1 (b) は、測線上の1台のOBSで観測された記録断面である。オフセット距離 (振源とOBSの水平距離) 40km 付近を境に初動 (最初に到達する信号) の傾きが6~7 km/s から80km/s 以上に急激に変化している様子を明瞭に確認できる。オフセット距離40km 以内は地殻からの屈折波で、40km 以遠がマントルからの屈折波であり、このデータの場合、モホ面は海底面下6.5 km 付近に位置していた (図1(d))。一方、図1(c) は、反射法地震探査の解析結果 (時間マイグレーション断面) である。海洋における反射法地震探査とは、調査船の直下の地球内部で反射して戻ってくる地震波 (音波) を使って、地震波反射面の位置や形状を詳細にイメージングする調査手法である。OBS データと合わせて走時トモグラフィー解析をした結果 (図1(d))、往復走時10秒付近の強い反射波がモホ面であることが確認できている。音響インピーダンス (地震波速度と密度の積) が大きく変化する境界面ほど強く反射するため、基本的にモホ面は音響インピーダンスが大きく変化する物性境界面、すなわち、地震波速度あるいは密度に関する物性境界面であることが分かる。以下では、このような地震波を使った構造研究で得られる海洋地殻、モホ面およびマントル最上部に関する最前線の知見と未解決の問題について紹介する。

海洋地殻とマントルは地震波速度の違いによって区分される。おおまかに言えば、P波速度が7 km/s より低い海洋地殻と、80km/s を超えるマントルとなる。海洋地殻はさらに、厚さ2~3 km 程度で鉛直速度勾配の大きな海洋地殻第二層 (P波速度50km/s ~ 6.7 km/s 程度) と、厚さ3~4 km 程度で速度がほぼ一定な海洋地殻第三層 (P波速度6.7 ~ 7 km/s 程度) の二つに区分される (図2)。ちなみに、地殻の上の堆積層を海洋第一層と呼ぶ。

第二層は玄武岩質で、深度とともに間隙率が低下するために大きな速度勾配が生じると考えられている。一方、第三層ははんれい岩質で速度変化

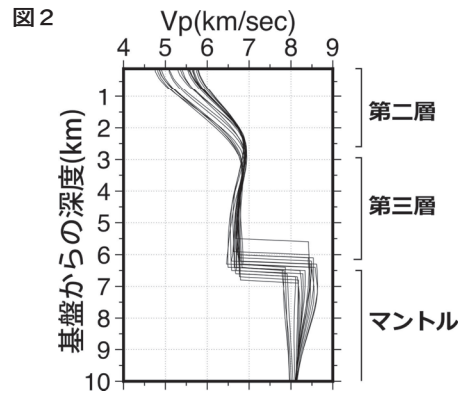
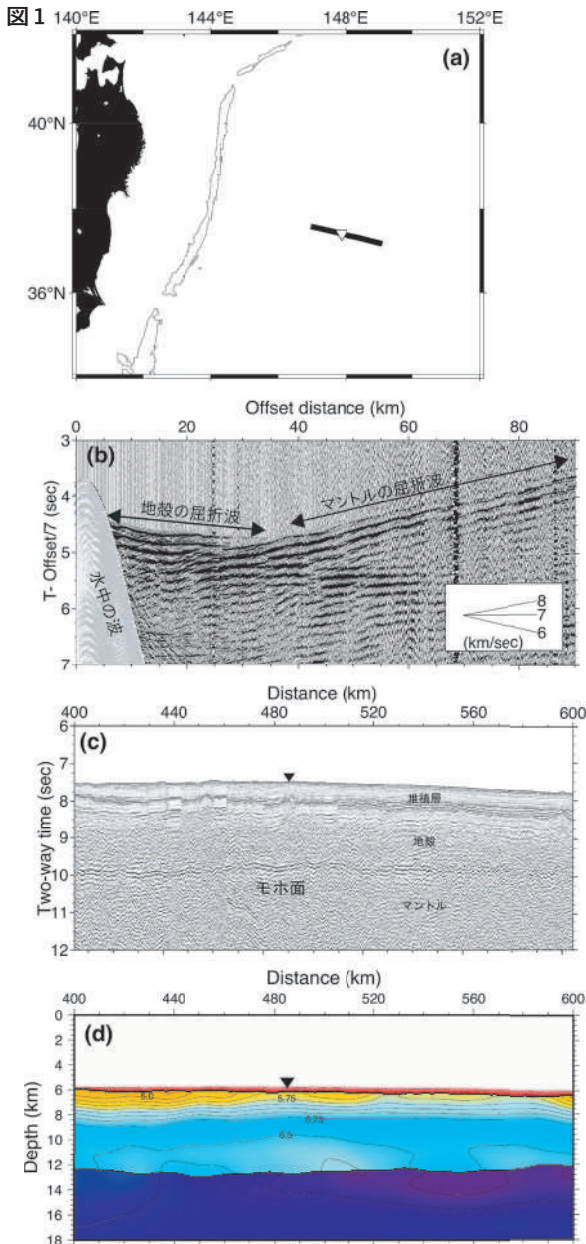


図1 (a) 地震波構造探査測線の位置(黒太線). (b) (a) の▽に設置した海底地震計 (OBS) で観測した記録例. 右側が東. 近傍の 6~7 km/s のフェーズは主に地殻内を通ってきた屈折波, 遠方の 80km/s を超えるフェーズは主にマントル最上部を通ってきた屈折波である. (c) 反射法地震探査の時間マイグレーション結果 (Fujie et al., 2020). 反射法調査では, 50 m 間隔で発振したエアガン信号を 5.5 km 長のケーブルに組込まれた 440 チャンネルのハイドロフォン (12.5 m 間隔) で観測した. ▽は (b) の OBS の位置を示す. 往復走時 (Two-way time) 10 秒付近にイメージングされているフェーズがモホ面である. (d) OBS データと反射法地震探査データを使って走時トモグラフィーによって求めた地震波速度構造 (Fujie et al., 2020).

図2 (図1(d))の地震波速度構造モデルから, 10 km 毎に 1 次元速度構造を抽出し, 基盤からの相対深度にしてプロットした結果. 世界中の海洋地殻でも基本的に同様な特徴を持った速度プロファイルが得られている (例えば, Christeson et al., 2019). 一方で, 場所による微妙な違いも現れており, 多様性が見いだされている.

はほとんどないと考えられている. ただし, コスプレートにおける掘削研究によれば, 速度勾配の変化と岩質の変化には若干のずれがあったとの報告もあり (例えば, Detrick et al., 1994; Carlson, 2004), 地震波速度で定義される第二層と第三層は鉱物層の違いではなく間隙率の変化が決定付け

ている可能性がある. 他方, オントンジャワやシャツキーライズといった LIPs の地震波速度構造 (Miura et al., 2004; Korenaga and Sager, 2012) は, 通常の海洋地殻より遥かに厚い LIPs の地殻であっても, 第二層と似た速度構造を示す地殻と第三層と似た速度構造を示す地殻の厚さ比率は通常

の海洋地殻と同じ程度であること、すなわち地殻が厚ければ第二層もそれに比して厚くなる傾向があることを示している。間隙率が圧密の影響を受けることを考慮すれば、第二層と第三層の境界を間隙率の変化だけで説明できるかどうかについては、今後の検証が必要であろう。第二層/第三層の実態把握が進めば、海嶺における海洋地殻形成過程の理解に大きな進展が期待できるとともに、沈み込み帯インプットとしての海洋地殻の役割についても理解が進むことが期待できる。

均質に近い第三層の地震波速度についても興味深い観測がある。図 1Q(d)、図 2 では、第三層内よりも第二層と第三層の境界付近の方が高速度になっており、第三層内は相対的に深部の方が低速度になる速度逆転の傾向を示している場所が分布していることが確認できる。一般に、速度勾配がゼロまたは負になる層では、屈折波は層の上面を伝わるヘッドウェーブになるため層内の速度を決めることは難しくなる。図 1Q(d)、図 2 の結果は層の底（モホ面）からの反射波も用いることで地震波速度の不確定性の幅を狭めた上での解析結果ではあるが、モホ面深度とのトレードオフも関与してくるため速度逆転の有無を結論付けることは難しい。しかし、図 1Q(b) でも地殻内屈折波が遠方（オフセット距離 30 km 以上）で振幅が弱くなるなど、場所によっては速度逆転を強く示唆する振幅変化も見られているため（Fujie et al., 2018）、少なくとも東北日本弧沖合の北西太平洋海域の一部の海域では、第三層内で速度逆転が生じている可能性はある。これらの海域では、海洋地殻形成後に顕著な火成活動や断層活動が生じた痕跡はないため、速度逆転が生じているとしたらそれは海洋地殻生成時に起因しているのかもしれない。

モホ面は、地震波速度の不連続面として定義され、モホ面の情報は次のように取得できている。地震波速度の推定には自然地震あるいは人工振源からの屈折波が活用されているが、これら屈折波の周波数は 5 Hz 程度であり、モホ面付近の地震波速度を考慮すると、その波長は 12km を優に超える。したがって、屈折波を用いて推定した地震波

速度構造モデルでは、地震波速度の不連続面であるモホ面が、km オーダーの地震波速度の遷移層であるのか、厚さのないシャープな速度境界であるのかを区別することは容易ではない。一方、反射法地震探査では、海洋モホ面でも 30 Hz 程度の信号を使ってイメージングできる。また、条件さえよければ波長の 1/4 程度の空間分解能が期待できることから、屈折法よりも一桁小さいスケールでモホ面付近の構造不均質を議論し得る。したがって、仮にモホ面が km オーダーの地震波速度の遷移層であれば、有意な反射波は生じないため、反射法ではモホ面はイメージングされないことが起こりえる。

地震学的にイメージングできたモホ面には、多様性があることが分かってきた。図 1(c) に示す反射法地震探査によるイメージング結果では、モホ面反射は横軸 > 550 km では不明瞭になっている。一方、屈折波を用いた走時トモグラフィーでは、速度境界としてのモホ面は測線全体でモデル化できている（図 1Q(d)、Fujie et al., 2020）。すなわち、> 550 km の範囲のモホ面は、長波長の屈折波では地震波速度の不連続面として捉えられるが、短波長の反射波には感度がないことが分かる。したがって、> 550 km の範囲ではモホ面はある程度の厚さを持った地震波速度の遷移層であるかもしれない。ただし、反射法でモホ面など深部の構造境界面がイメージングされない原因には、反射面の性質の他にも、浅部構造の複雑さに起因する地震波の散乱や減衰などがあり得るため、その原因を地震波構造探査のみで特定することは難しい。モホ面の多様性の要因として、モデル計算やオフィオライト研究成果によるモホ面の改変プロセスが議論されはじめていることから、モホ面の物質学的実体解明によって、モホ面多様性研究に大きな進展が期待できる。

マントルにおける地震波の異方性は、地球科学における大きなテーマの 1 つである。一般に海洋マントルはカンラン岩からなり、その地震波速度は 80km/s 程度と考えられている。しかし、高速拡大海嶺で形成された海洋プレートでは、プレート

形成時のマントルフローの速度勾配で生じる剪断応力によってカンラン石の結晶方位が整列するため、マントル内に顕著な地震波伝播の異方性が生じると考えられている (Karato et al., 2008). 実際、例えば、北海道沖の太平洋プレートで実施した屈折法地震探査で明らかになった最上部マントルの地震波速度は、海嶺の拡大方向で 8.6 km/s、それに直交する海嶺軸に平行な方向では 7.8 km/s であり、その方位異方性は 8~9% にも達している (Kodaira et al., 2014).

マントルの異方性は地震波の振幅減衰でも観測されている。Kodaira et al. (2014) のデータでは、海嶺の拡大方向、すなわちマントル速度が高速な方向では最上部マントルからの屈折波は 100%km 程度で振幅が減衰し、観測できなくなった。一方、海嶺軸に平行な方向、すなわちマントル速度が低速な方向では最上部マントルからの屈折波はオフセット 200km でも振幅が弱まらず明瞭に観測された。すなわち、マントル最上部を通った屈折波の減衰も方位異方性を示していた。

以上のように人工振源を用いた地下構造研究によって、詳細な地震波速度構造が得られ、その詳しい様相が明らかになりつつある。その構造研究の結果とマントル掘削を結びつけることにより、その地震波速度を呈する鉱物相や間隙率、含水量などを把握し、海洋地殻やモホ面の実態、さらに最上部マントルにおける地震波の異方性の原因を明らかにできれば、海嶺における海洋プレート形成過程とその変遷の理解の深化に寄与する新たな拘束条件となるだろう。したがって、最終掘削地点を決めるには、詳細な構造研究が必須であり、得られた地震波速度構造のどのような特徴をもつ場所での掘削が最も意義があるかを検討することが重要となる。

4. 掘削技術による制約と3つの候補海域

現実的なマントル掘削地点は、掘削技術の裏付けが必要であり、「ちきゅう」の技術開発目標である次の項目を満たす必要がある。その項目は、1) 掘削地点の水深が 4000+km より浅い、2) 掘削孔

の温度が 250°C 以下 (LWD が使用できる温度は 150-175°C 以下であり、これを使用する場合はさらにハードルが上がる)、3) 掘削孔の全長が 7 km 以下、の3つである。平均的といわれる海洋地殻の基底部 (モホ面) 付近の温度が 250°C 以下となる海洋地殻年代は、単純なプレートの半無限冷却モデルによる温度構造 (以下、単純な温度構造モデル) によると、地殻年代としては、20Ma より十分古い海洋地殻である必要がある。但し、あくまで単純な温度構造モデルでの見積りなので不確定性が高い。一方で、水深が地殻年代のルートに比例する関係からすると、掘削水深が 4000m までだと 20Ma より若い海洋地殻となり、温度の点では厳しくなる。結局、水深が浅くて掘削孔の温度が低い地点という、矛盾した条件が必須となる。

技術的に掘削可能な候補海域を選定するために図3を作成し検討した結果、ハワイ沖が候補海域として浮かび上がり、2008年11月に行われた国内会合で初めて提案した。その後、ハワイ沖の arch 火山の存在を含むハワイホットスポットの影響を含めて詳細に検討し、2009年6月の国内打ち合わせで、候補海域として、1) ハワイ沖、2) コスタリカ沖、3) メキシコ沖の3箇所を示した。国際的には、その直後の7月に行われた Southampton での WS での総合討論で、ハワイ沖を掘削海域として初めて紹介し、WS report にも簡潔ながらハワイ沖についての記述がなされた (Teagle et al., 2009)。そして、2010年6月に金沢で行われた国際 WS では、現在持ち得るデータを詳しく分析して他の2つの海域と比較し、ハワイ沖海域の優位性を発表している。この時点で、この3つの海域がマントル掘削候補海域として定着した。

掘削候補海域として3海域を示したが、技術面とロジスティック面の制約から現実的な候補海域は、ハワイ沖だけだと考えている。コスタリカ沖は、ヨーロッパのグループが支持している海域であり、掘削サイト 1256 があり実際の掘削から得られている情報もある。この海域の最大の問題は温度で、高温過ぎてマントル掘削の実現性が低いと

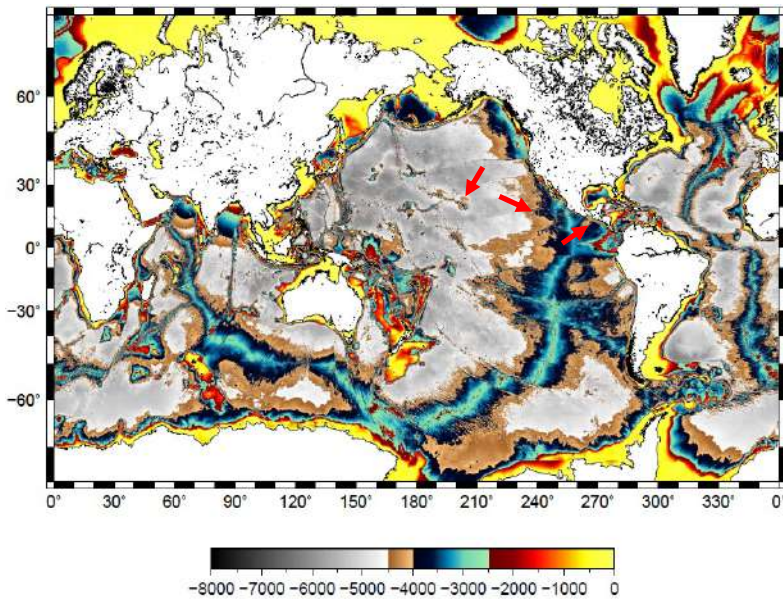


図3 掘削候補海域(赤矢印).を
探すために作成した海底地形図.
水深 2,500 mと、4,000 m、4,500 m
までの区間が視覚的に分かるよ
うに色づけしている.理由は、水
深 2,500 mまでが現在のちきゅう
でライザー掘削できる水深で、水
深 4000+kmが次の開発目標であ
ったためである.

考える. この海域の海洋地殻年代は 206Ma 程度で、海底下 6 km 程度と考えられるモホ面での温度が単純な温度構造モデルでは 250°C程度となるため、技術的にぎりぎり掘削可能とされている.ところが、地殻年代が 15 Ma である掘削サイト 1256D での坑内温度計測の結果をもちいた温度見積もりでは、海底下 1440 m の深さで $125 \pm 10^\circ\text{C}$ となる. この実測からの見積もりは、単純な温度構造モデルでの見積もりの 80°C程度とは、1.5 倍程度の違いを生じている. この結果は、単純な温度構造モデルによる温度の見積もりの危険性を示している. また、高温での掘削技術開発も行われているようであるが、いずれも冷却水を循環させながら短期間での掘削での開発であり、マントル掘削のような長期間にわたる掘削で使える技術としてはハードルが高い. メキシコ沖は、掘削可能な水深に比較的古い海洋地殻が分布していることが候補海域になった理由である. 例えば、掘削水深が 4300 m までだと 25 Ma より古い海洋地殻の選択が可能となる海域である. 一方で、これ以上の検討はなされておらず、さらに古い海洋地殻であればあるほど陸からは遠くなることから、ロジスティック面でも不利な点となる.

ハワイ沖だけが、現実的な候補海域だと考えている. まず、地殻年代が若い北部でも 80 Ma と古く、海底下 6 km 程度のモホ面での温度が単純な温度構造モデルでは 110°C程度であり、上で述べた 1.5 倍の違いを考慮しても 165°C程度であるため、LWD のような技術を使うことが可能である. この温度の条件は、高温環境下の海洋地殻での微生物の存在や、さらに海洋地殻における深部での微生物圏の広がり調べる上でも適した温度構造であると考えられる. 理由は、堆積層の 120°C程度の高温環境下でも微生物の生存が報告されている (Heuer et al., 2020) ため、温度条件としては相応しい. また、ロジスティック面でも、陸地がさほど遠くなく、良港が近くにある点も重要な要素である. 余り知られていないが、海洋掘削で海底下の最も深い掘削を行った 504B の掘削地点を選んだ時に、わざわざパナマ運河に近い位置を選択したとのことである. 理由は、掘削船が大西洋と太平洋間を行き来する時には、多くの場合パナマ運河を通過することから、それだけ掘削の機会がより多く得られるためであった. このようなロジスティック面も、長期にわたる掘削を実現するためには重要である.

ハワイ沖での課題は、ハワイホットスポットの影響と水深が深いことである。ハワイホットスポットの影響では、この影響で生じた海洋リソフェア屈曲に伴う構造改変を十分に把握し、さらに特にアーチ火山の影響を避ける必要がある。アーチ火山の溶岩の存在は、海底表面ではサイドスキャンソナーイメージで良く把握できている。海底下については、既存の微小地震分布、熱流量分布、地磁気異常のデータを使って、アーチ火山の兆候は見られない場所を選択した。モホ面は、Watts et al. (1985) による二船式の反射法地震探査により確認されており、水深については、この時点でモホ面が確認されている部分で最も浅い水深は 4250 m であった。また、南側のハワイ沖では、明瞭なモホ面があるが地殻の厚さが少なくとも 6 km あり、北部では、モホ面が南側よりも不明瞭ではあるが、地殻の厚さはこれより薄い。地殻の厚さを優先して北側を主な候補海域として絞り、アーチ火山の影響がある場所を避けても、水深 4300 m までであればそれなりの範囲(最も浅い水深は 4050m) が存在することから、この範囲を掘削候補エリアとした。この候補エリアでは、地震波構造探査は実施されていないため、その探査が必要であり、この点については次節で述べる。

5. ハワイ沖での事前調査

ハワイ沖の掘削候補エリアが、地震波速度構造の参照地点として十分な意義を持つ構造であることを地震波構造探査によって確認しなければならない。そして、ハワイホットスポットの影響がハワイ諸島周辺のどの領域まで及んでいるのかを評価し、掘削候補地点を選定する必要がある。このために候補エリアを主たる対象にした地震波構造探査の測線案を、2009年11月に作成した。そして、その海域の海底地形、地磁気、重力、サブボトム調査を、2010年2月20～25日の日程でハワイ大学の R/V Kilo Moana による KM1003 航海で実施した。その結果は、候補エリアではアーチ火山の影響が認められないことを示めていた。

地震波構造探査は、2017年になってから、3船

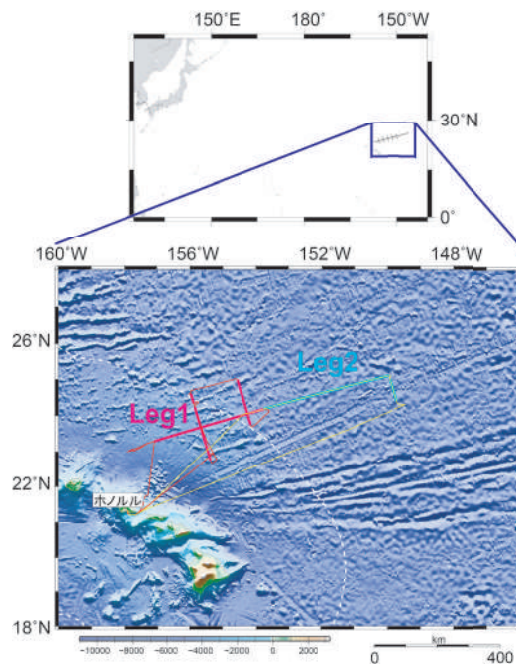


図4 ハワイ沖の事前調査測線図。

による一連の航海でようやく実現した。遅れた理由は、米国 EEZ 内でエアガン発振による調査の許可取得に時間がかかったことが大きい。一連の航海では、最初にコロンビア大学ラモント・ドハティ地球科学研究所の R/V Langseth による MGL17-05 航海で、5 台の OBS 設置を 2017 年 8 月 28 日～31 日の日程で行った。次に海洋研究開発機構の深海調査研究船「かいらぎ」 KR17-14 航海で 2017 年 9 月 16 日～25 日 (Leg1)、9 月 26 日～10 月 2 日 (Leg2) の日程でマルチチャンネル反射法地震探査 (MCS) システムを用いた地震波構造探査を実施した (図 4)。探査では、7800 立方インチ (約 130L) のチューンドエアガンを深度 10(m) で曳航して 50km 間隔で発振するとともに、444 ch・5500km のストリーマーを深度 12km で曳航して収録を行った。Leg1 に関しては米国 EEZ 内の調査となることから Passive Acoustic Monitoring (PAM) による海洋哺乳類への監視を 24 時間行いながら実施した。海洋哺乳類は、その繁殖期を避けて航

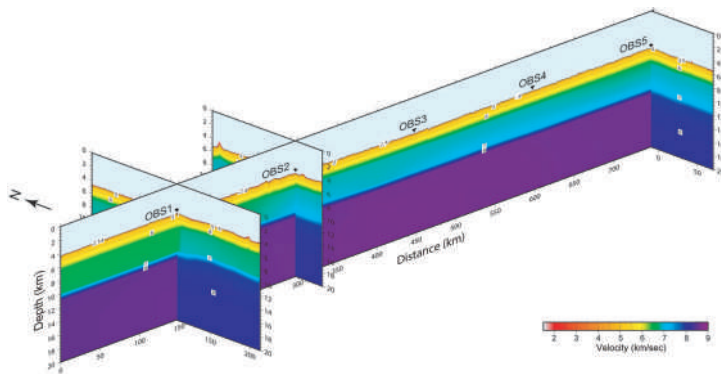


図5 OBSによって得られたP波速度構造 (Ohira et al., 2018).

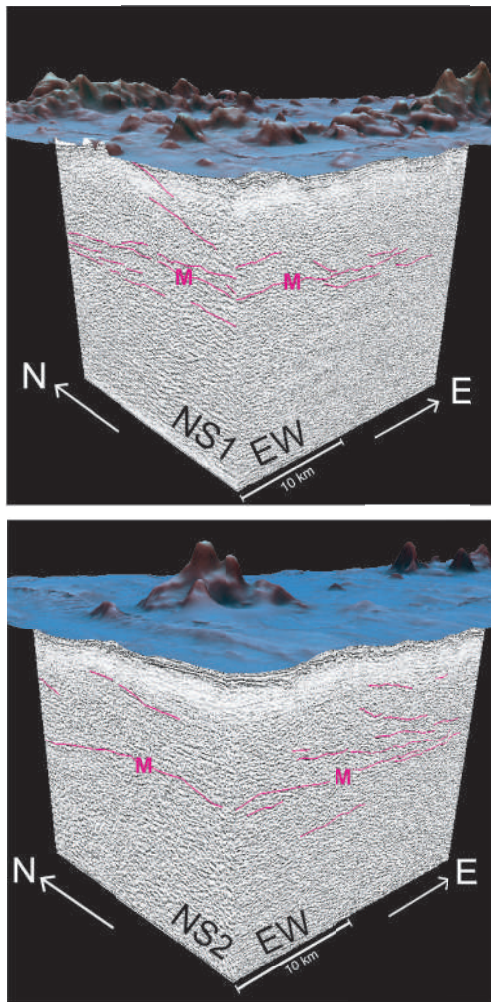


図6 掘削候補点直下の反射断面 (Morishita et al., 2019) (上).OBS1 地点, (下) OBS2 地点.

海を実施したためエアガン発振中には観測されず、調査全体でイルカ類が一度音響的に認められたのみであった。最後に、R/V Kilo Moana による KM1714 航海において 2017 年 9 月 28 日～10 月 3 日の日程で 5 台の OBS を回収した。すべての航海において海況が良好であったため、予定していた調査内容を実施できた。

OBS から得られた成果は、Ohira et al. (2018) により詳細に報告されている。全記録から第 2 層、第 3 層、最上部マントルからの屈折波が確認された。OBS の設置間隔が約 150 km と離れていることから成層構造を仮定したフォワード走時解析によってモデリングを行っている。得られた速度構造 (図 5) は東北日本弧沖 (図 1, 2) に見られるような典型的な古い海洋地殻と同様の特徴を持っており、地殻の厚さはノースアーチの北東部においても変化していないことが確認されている。最上部マントルの P 波速度は海洋底の拡大方向に速く 10% 近い強い異方性を示しており、中央海嶺付近で生成した最上部マントル構造を保持していると考えられている。

MCS による反射法地震探査では、ハワイ諸島から十分離れた太平洋中央部の海洋地殻から掘削候補エリアまでの構造イメージングを行った。その測線は海洋底の拡大方向と平行である東西測線 (EW)、および海洋底の拡大方向に直行する南北 3 測線 (NS1, NS2, NS5) の計 4 測線であり (図 4)、その総延長 1150 km において良好な反射断面が取得された。EW 測線では水深が 4000m から

5500km まで変化している。船上記録では反射面の連続性が不明瞭であったことから、Ohira et al. (2018) の P 波速度構造を導入して重合前マイグレーション処理の適用を行った。その結果、モホ面からと思われる反射面が測線全体で確認できた (Morishita et al., 2019)。また EW 測線での堆積層の基盤は、西側では明瞭であるが、NS2 測線と交差する OBS2 地点から西側にかけて不明瞭になり、プレートの屈曲に伴う表層構造の改変の可能性が考えられる。また、候補エリア周辺での堆積層厚は約 150 m であることが明らかになった。掘削候補点となる西側の OBS1 地点と OBS2 地点の直下では空間的にモホ面と思われる反射面が拡がり、南側に傾斜する地殻内の反射面も存在している (図 6)。

6. マントル掘削に向けた現状と実現するために残された課題

マントル掘削に向けて、着々と進められてきたことがある反面、手がつけられずに残されている課題も多い。進めることができたことは次の通りである。2012年3月に、IODPのMDP (Multi-phase Drilling Project) 提案に、『MoHole to Mantle (M2M)』(代表:海野進)として提案でき、Lead proponentsには多くの日本人研究者が含まれている。また、2013年の4月に行われたChikyuu+10 International Workshop (Coffin et al., 2013)では、Flagship Projectの1つとして、M2Mを挙げている。そして、5節で述べたハワイ沖での事前調査を受けて、M2Mの手始めとして海洋地殻の第二層と第三層の境界を掘り抜く full の掘削提案を2020年10月に行っている。

残された課題として、事前調査の不完全さと必要な掘削技術開発の未達が上げられる。5節で述べた事前調査では、OBSの設置台数が少ない調査しかなされてない。マントル掘削を進めるためにはより詳細な地震波構造研究が必須であり、これに対応した稠密 OBS 設置による屈折法・反射法地震探査を計画している。この探査により、海洋リソスフェア屈曲に伴う構造改変もより正確に把

握する。一方、必要な掘削技術は、ハードロックでの深掘りと水深4000+kmでのライザー掘削技術であるが、これらの実施・開発は停滞している。ハードロックライザー掘削による深掘りは、その掘削サイトとして水深が2500 mまでである IBM-forearc を1つの候補として想定していた。IBM-forearc の「ちきゅう」での掘削は、その掘削提案としてはすでに十分な科学的評価を得ており、実際の掘削スケジュールに載せる段階である。しかしながら、「ちきゅう」での掘削計画が滞っており、現在のIODPの終わりである2023年までには実施されないことが決まり、新たな枠組みで再提案する必要が生じている。また、水深4000+kmでのライザー掘削技術の方も、SDGsのCO₂排出削減の流れを受けて、このような水深での資源開発の必要性が遠のいたこともあり停滞している。このように解決すべき課題が残っており、掘削にかかる費用も多大であるが、ぶれることなくこれらの課題を解決し、かかる費用に見合う科学成果とその魅力を引き出せる体制づくりが、マントル掘削を実現するためには必須である。

参考文献

- [1] Carlson (2004) : Geophys. Res. Lett.
- [2] Christeson et al. (2019) : Rev. of Geophys.
- [3] Coffin et al. (2013) : CHIKYU+10 international workshop Chikyuu report.
- [4] Detrick et al. (1994) : Nature.
- [5] Fujie et al. (2018) : Nature Communications.
- [6] Fujie et al. (2020) : Geology.
- [7] Heuer et al. (2020) : Science.
- [8] Ildefonse et al. (2007) : Sci. Dril.
- [9] Ildefonse et al. (2010) : The MoHole : A Crustal Journey and Mantle Quest workshop report.
- [10] Karato et al. (2008) : Ann. Rev. Earth Planet. Sci.
- [11] Kodaira et al. (2014) : Nature Geoscience.
- [12] Korenaga and Sager (2012) : J. Geophys. Res.
- [13] Miura et al. (2004) : Tectonophysics.
- [14] Morishita et al. (2019) : Sci. Dril.
- [15] Ohira et al. (2018) : Earth, Planets and Space.
- [16] Teagle et al. (2009) : Melting, Magma, Fluids and Life : Challenges for the next generation of scientific ocean drilling into the ocean lithosphere workshop report
- [17] Watts et al. (1985) : Nature.

☐