



モホ点描-超深部掘削で何がわかるのか？

モホ点描—超深部掘削 で何がわかるのか？

—総論—

道 林 克 禎

**A Moho Sketch : what we expect to obtain
through ultra-deep drilling in ocean?**

Katsuyoshi Michibayashi

みちばやし かつよし : 静岡大学理学部地球科学科

超深部掘削船ちきゅうによって海洋地殻を掘削貫通させてマントルに到達するマントル掘削（またはモホール計画）では、海洋地殻形成・進化からモホ面の実体、そして最上部マントルの物性・化学組成などを探求しながら、熱水循環プロセスとそれに伴う地下生命圏限界、さらにグローバルな水・炭素循環過程の解明への寄与が期待される。これに加えて、マントルまでの連続した孔内の物性や、地温勾配、電気伝導度などのその場観測、さらに地球最深部の実験環境として利用可能である。本特集号では、マントル掘削のもつ科学的可能性や利用法など各方面の研究者に自由に語ってもらった。

1. はじめに

地球表層の7割を占める海洋の基底部を構成する岩石は、私たちの住む日本列島をはじめとする島弧を発達させ、大陸を成長させる原材料である。さらにこれらの岩石は、短期的には生命活動のフレームとなり、長期的には表層環境変動を支配するバッファとして働き、地球が生命を宿す惑星として機能する役割を担う物質である。

しかしながら、これらの岩石が深い海底のさらに堆積物の下に存在するため、掘削を除けば直接アプローチする手段はない。また、一部の海底起源岩石は陸上で部分的に観察されるものの、物理化学的な2次作用による変質を含んでおり、海底下における真の様相を知るには限界がある。特に表層で採取できるマントル断片は著しい2次作用によって変質しており、一度溶けた地球型惑星の本質が反映されていない（図1）。

これまでの掘削科学を含めた海洋底研究によって、地球表層を覆う海洋プレートは、全てが同じ構造と均質な物性をもつのではなく、プレートの構造と構成物質に多様性が存在すると考えられるようになった。このような海洋プレートの本質を探るために計画されたマントル掘削（別名、モホール計画^[1]）は、海洋地殻を貫通してマントルに到達する推定総額500億円の超大型プロジェクトとして知られている。統合国際深海掘削計画

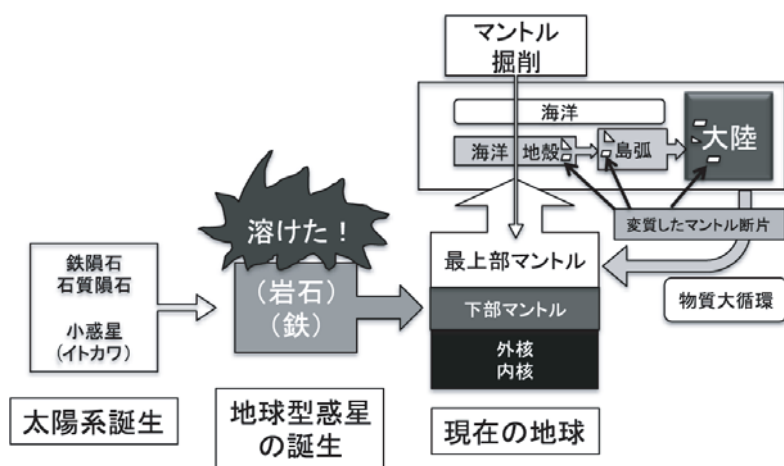


図1 地球の層構造とマントル掘削の概念図。地殻の形成はマントルを源とする。マントル掘削はその源を直接観察する手段を提供する。

(IODP)では、人類の挑戦的課題として最重要課題の1つに掲げられている^[2,3]。この計画によって、約100年前に発見されたモホロビッチ不連続面(モホ面)の実体が明らかになり、さらにその直下の地表の変質を受けていないマントル物質が直接採取されて海洋プレートのみならず地球型惑星の進化研究を飛躍的に発展させることが期待される^[1]。

2. マントル掘削への期待と課題

太平洋海域を構成する海洋プレートは、年間10cm程度の高速拡大海嶺で形成されている。この海域におけるプレート構造は、オマーンオフィオライトなどの陸上地質で確立されたペンローズモデルとよばれる「海洋地殻の層構造」と同じとする説が、従来から定説とされてきた^[4]。しかし、最近の我が国における高精度な地震波構造探査によって、地殻深部に陸上地質では確認されないモホ面から斜め上方へ続く反射面が確認された^[5]。さらに、その直下のマントル最上部に陸上地質でたびたび確認されてきた10%近い異方性が存在することが明らかにされた^[5]。これらの地震波構造は、特に海洋地殻について従来の定説とは相容れないことを明らかにし、新しい中央海嶺モデルが提案された^[5]。その検証には超深部掘削による地殻深部物質の採取と孔内検層が必要

であるが、それと同時に特にレオロジーなど従来よりも幅広い分野の研究者の役割が期待される。また、陸上に露出した海洋プレート断片とみなされてきたオフィオライトが、本当に典型的な海洋プレートであるのか岩石学的に疑問をなげかける指摘もあり、オフィオライト問題に対して掘削科学による検証が期待される。

マントル掘削計画が登場した50年前に最も重要視された研究課題は、モホ面の実体とは何か?であった^[1,6]。そして、それは21世紀の今なお未解決の課題である。陸上のオフィオライト研究から「マフィック岩(又はハンレイ岩)と超マフィック岩(又はカンラン岩)の境界がモホ面」とする従来の定説は、先に述べた通りオフィオライト構造が最新の地震波構造探査の結果と合わないことから再考すべき問題である。

モホ面の実体として、「マントル内の蛇紋岩とカンラン岩の物質境界がモホ面」とする説が存在する。蛇紋岩は、マントル物質であるカンラン岩が約400度以下の低温で水と反応して形成される変成岩である。この蛇紋岩説は、ヘスモデルと言われ^[4]、50年前から論争が続く海洋プレート構造の最重要課題の1つである。もしモホ面が蛇紋岩であるならば、水みちが海洋地殻を貫いて最上部マントルまで続くことを意味する。さらに水の存在は生命活動を示唆し、地球内部のどのくらいの深

度までどのような条件で生命が存在するのかを問いつける、地下生命圏の重要課題に深く関係する。これらの課題に挑むべく微生物分子温度計などの新しいアイデアがだされている。

マントル掘削には様々な期待があるため、マントル掘削で得られる岩石試料は、大気等に汚染されず「マントルの状態」を保存していることが重要である。例えばハヤブサから回収された試料と同様に、地球表層環境で汚染されない試料の確保なしに、地球内部の希ガスや微量元素の正確な分布や炭素質物質による生命の痕跡などを明らかにすることはできない。掘削試料が汚染されない技術の確立はマントル掘削の成功のひとつの鍵となりうるだろう。

その他、マントル構造探査の視点から、マントル掘削によって得られる地殻・最上部マントルを構成する岩石の温度・化学組成・部分熔融などに関する情報は、上部マントル全体の大スケールの地震波速度構造・電気伝導度構造などの解釈に不可欠であり、海洋超深部マントルダイナミクスのより深い議論を可能にする^[1]。マントル掘削によって実現する海底下 6km の掘削孔は、地球内部に最も近い地点である。この最深部を利用した地球内部探査は、例えばハッブル望遠鏡と同じ役割を地球内部探査に与えるはずである。マントル掘削は、海洋プレートの実体を解明する物質科学だけでなく、地球ダイナミクス研究にとっても貴重な情報を提供する機会となるのは間違いない。

マントル掘削は、海洋地殻を貫通してマントルに到達する目的が明快である一方で、技術的経済的課題が重い足枷となっている掘削計画である。温度 250 度と海底下 6km を安定に掘り抜く超深部掘削技術の確立は、他分野とは比較にならないチャレンジングな課題である^[7]。しかし、見方を変えれば、超深部掘削技術の確立は我が国に新しいテクノロジーの創出を引き起こす契機になるだろう。

3. マントル掘削に向けた最近の動向

マントル掘削は、まだ実行段階には至っていない。

い、その実現には多額の資金が必要であり、それを確保するために専門内外の科学者を納得させる科学目的と実施計画の構築、資金を提供する国民の理解と賛同、海洋地殻を貫通するテクノロジーの実現等、ハードルは低くない。また、他分野と比べてこれほどの超大型プロジェクトは地球科学には存在しておらず、マントル掘削に関わる研究者にとっても実現に向けて何をすべきなのか手探りを続けているのが現状である。とはいえ、これまでに国内外でマントル掘削に関するシンポジウムやワークショップが開催されてきた。以下に過去 2 年間の動向をまとめる。

2010 年 6 月 3 日～5 日の 3 日間、金沢市で「The MoHole : A Crustal Journey and Mantle Quest」と呼称された国際モホールワークショップが開催された (<http://earth.s.kanazawa-u.ac.jp/~Mohole/index.html>)。このワークショップは科学者と技術者が会してマントル掘削について様々な議論がなされた。特筆すべきは、マントル掘削の候補地点が 3 カ所に絞り込まれたことと掘削実現までのロードマップが作成されたことである^[7,8]。

2010 年 9 月 9 日～11 日には、ワシントン DC において国際マントルフロンティアワークショップ「Reaching the Mantle Frontier : Moho and Beyond」が開催された (<http://www.rsvpsignature.com/iod-pregistration.html>)。その結果、今年 (2012 年) から 2 年間の予定でマントル掘削の実現可能性について検討が IODP の活動と平行して開始されることになった。

このような国際的な動きのなかで日本国内では、2011 年から深海掘削検討会と呼称された会議が毎月開催された (http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu5/attach/1303603.htm)。3 月 11 日の東日本大震災で一時中断したが、5 月 21 日には東京において深海掘削検討会ワークショップが開催され、個別討議としてマントル掘削について議論された (http://www.j-desc.org/m3/events/110521_newparadigmWS.html)。この検討会で議論された内容を元にして深海掘削検討会報告書が 2012 年に公表される予定である。

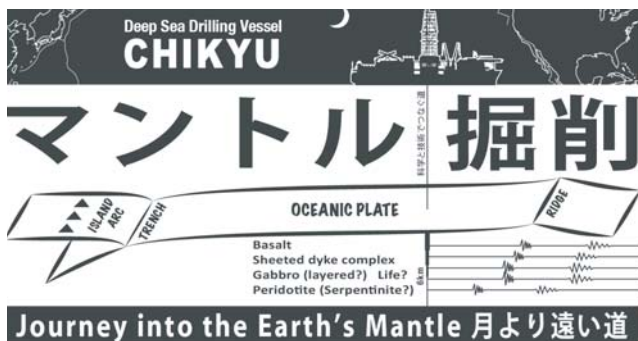


図2 マントル掘削のロゴマーク案の1つ。マントル掘削プロジェクトは50年前にアポロ計画と同時期に開始された。人類は月に降り立ったが、未だにマントルに到達していない。海底下約6kmのマントルへの道は月よりも遠いのである。

2011年9月9日には、日本地質学会と日本鉱物科学会の合同学術大会（茨城大学）において特別セッション「モホ点描：超深部掘削で何がわかるのか？」が開催された。本特集号は、このセッションを元に企画されたものである（詳細は次節を参照）。

このようにマントル掘削実現に向けて日本国内外で議論される中、2011年11月11日～12日に研究者有志による「モホール計画」国内研究者集会が東京で開催された。この会議では、国内のマントル掘削に関する情報の一元化と今後の体制について議論された。その結果、金沢大学の海野進教授を代表として国内活動をボランティアベースで推進・支援することになった（図2、<http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~s-moho/>）。

その後、2011年12月4日にサンフランシスコで国際モホール会議が開催された。日本国内の動向が紹介された後、これまで通り国際協力体制を維持することを確認し、掘削プロポーザル申請に向けた日程が調整された。2012年は、掘削プロポーザル申請とそれに関連した活動が展開される予定である。

先に述べたようにマントル掘削は超大型プロジェクトであり、現時点で予定されているプロジェクトではない。しかし、国内外にこのプロジェクト成功に向けて日々努力している科学者と技術者のコミュニティがいることを改めて明記しておきたい。

4. モホ点描—超深部掘削で何がわかるのか？

平成22年（2011年）9月9日（金）、日本地質学会・日本鉱物科学会合同学術大会（水戸大会）において、特別セッション「モホ点描—超深部掘削で何がわかるのか？」（世話人：道林克禎・阿部なつ江）が開催された。このセッションでは、マントル掘削に向けて分野を超えてさまざまなアイデアを自由に語ってもらうことを目指した。内容は表の通りである（名前は筆頭講演者のみ）。

本セッションは初日の午前中であつたにもかかわらず大勢の研究者・学生が参加されて盛況であつた。国内の地球科学コミュニティにおいても十分に関心が高いことを知る機会となつた。本特集号は、本セッションだけでなく一部関連したセッションの発表者にも執筆してもらつた。本特集号をきっかけに、多くの方がマントル掘削に興味を抱いてもらえたら幸甚である。

また、合同学術大会において本セッションを企画するにあたり平賀岳彦准教授（東京大学）、橘省吾博士（東京大学）、河上哲生博士（京都大学）並びに鉱物科学会行事委員の大和田正明教授（山口大学）、そして日本地質学会と日本鉱物科学会には多くのご支援をいただいた。そして、発表者の方々には素晴らしい研究成果を本セッションにご投稿いただいた。ここに記して感謝の意を表します。マントルへの道は、未だに月よりも遠いが、思っているよりは近いかもしれない。

□海洋掘削の現状と課題

阿部なつ江 (JAMSTEC): 海洋地殻掘削進捗状況―モホール計画現状について―

富永雅子 (ウツホール海洋研究所): モホール超深部掘削における孔内物性計測 (ロギング) の重要性和手法改善―開発の必要性について

□掘削深度の温度推定に関する新手法の紹介

木村浩之 (静岡大学): 微生物分子温度計: 地下圏の温度プロファイリング

<特別講演>

高橋嘉夫 (広島大学): 表層環境地球化学者からみた超深部掘削計画

□モホ点描: 岩石学から

荒井章司 (金沢大学): モホの岩石学的イメージング: 海洋底そして日本列島

石渡明 (東北大学): M9 巨大地震とオフィオライト・高圧変成帯の銜上

<招待講演>

小平秀一 (JAMSTEC): 地震学的に見た海洋地殻, マントル, モホ

□モホ点描: レオロジーから

片山郁夫 (広島大学): 海洋モホ面でのレオロジー的不連続性

□モホ点描: 弾性波速度から

石川正弘 (横浜国立大学): オマーンオフィオライト北部にみられる下部地殻マントル断面の地質と地震波速度と地震波反射

<招待講演> 超深部掘削の可能性を探る

河野義生 (カーネギー地球物理研究所): 放射光X線と組み合わせた高圧下弾性波速度測定

藤村彰夫 (JAXA): ペネトレータによる海洋底の探索

馬場聖至 (東京大学地震研究所): 高速拡大中央海嶺下の電気伝導度構造

□ポスター発表

道林克嶺 (静岡大学): 海洋地殻地震波構造の解釈―フィリピン海ゴジラメガマリオンを例として―

森下知晃 (金沢大学): 海洋マントル最上部: 海洋底かんらん岩からわかったこと, わからないこと

Betchaida Duetes Payot (金沢大学): Concordant and discordant podiform chromitites in the Zambales Ophiolite Complex, Philippines

根岸紘規 (金沢大学): 北部オマーンオフィオライト, ワジ・スクバのモホ遷移帯ダナイト中の磁鉄鉱―硫化物からなる複合粒子

高野翔平 (金沢大学): リザード・オフィオライトにおける非調和性ダナイトの成因

稲村柁之 (金沢大学): アルバニア, ミルディータオフィオライト西帯かんらん岩体の岩石学的特徴: 中央海嶺起源マントルか?

参考文献

[1] 阿部なつ江他 (2010): 地球内部掘削: モホール, 孔内地震計測, 島弧地殻-マントル進化. 地球, 32, 94-103.

[2] Earth, Oceans and Life, Integrated Ocean Drilling Program Initial Science Plan, 2003-2013, pp 120 (2001) <http://www.iodp.org/isp/>

[3] Illuminating Earth's Past, Present, and Future, The International Ocean Discovery Program, Science Plan for 2013-2023, pp 92 (2011) [http://www.iodp.org/ Science-Plan-for-2013-2023/](http://www.iodp.org/Science-Plan-for-2013-2023/)

[4] Dick, H. J. B., Natland, J. H. & Ildefonse, B. (2006): Past and Future impact of deep drilling in the oceanic crust

and mantle. Oceanography, 19, 72-80.

[5] Kodaira, S., Fujie, G. & Yamashita, M. (2011): New insights of the oceanic lithosphere revealed from seismic studies in the Northwestern Pacific. AGU abstract, V511-07.

[6] 笠原順三他編 (2008): 「地殻からマントルへ-モホ(面) とは何か?」 地学雑誌特集号, 117, 1-269.

[7] The MoHole Workshop Report (2010): A Crustal Journey and Mantle Quest, Kanazawa, Japan, 3-5 June 2010, pp204.

[8] Teagle, D. & Ildefonse, B. Journey to the mantle of the Earth. Nature, 471, 437-439.

