

マントル掘削計画 モホール計画と前弧モホール計画, そしてオマーン陸上掘削

道林克禎
(静岡大学理学部地球科学科)

1. はじめに

人類は1960年代に月に降り立った。アメリカ合衆国のアポロ計画である。アポロ計画と平行して地球科学分野にモホール計画という巨大プロジェクトが進んでいた。アポロ計画では月を目指し、モホール計画では地震学的に観測されるモホロビッチ不連続面を貫通し、その地下深くのマントルとよばれる岩石層を目指した¹⁾。

モホール(Mohole)は、モホロビッチ不連続面のMohoと掘削孔(hole)を合わせた造語であるが、日本語でも「モホ+掘る」=「モホール」と語呂合わせできる覚えやすい用語である。アポロ計画ではロケットが開発されたが、モホール計画ではマントル層を覆う地殻を掘削貫通するための掘削船が開発された。

モホール計画では、太平洋の海底を掘り抜くことを目指した。掘削船カス1号は、水深3558mから170mの堆積物を貫通して、その下位の玄武岩を13m掘削し、ケネディー大統領から「素晴らしい成果であり、歴史的事件」と賞賛された。しかし、モホール計画はアポロ計画が着実に進んでいる間に諸事情によって1966年8月に中止されてしまった²⁾。アポロ計画では1969年7月にアポロ11号が月面着陸に成功した。モホール計画は失敗に終わり、マントルへのわずか6kmの道程が「月より遠い道」になった。この道は今もなお遠い。一方、人類は月よりも遙かに遠い火星に向かおうとしている。

2. ちきゅうによるマントル掘削計画

モホール計画は短期間で失敗したが、計画のために開発された技術は、その後から始まった国際深海科学掘削計画(Deep Sea Drilling Project /Ocean Drilling Project /Integrated Ocean Drilling Project /International Ocean Discovery Program)に引き継がれている³⁾。カス1号による最初の掘削成功は、世界中の海洋底に浅い掘削を実施してデータを収集する道を拓いた。しかし、モホール計画のような超深部掘削は封印されてしまった。今までに海洋地殻で行われた最も深い掘削は約1.8kmにとどまっている。

21世紀に入ってモホール計画が再び始動した。しかも今回は日本主導である。その原動力となっているのは

2005年に就航した地球深部探査船ちきゅうである。ちきゅうは、太平洋の海底からマントルまでの月よりも遠い道を進むために開発・建造された超深部掘削船である。順調にいけば10年後に人類発のマントル掘削が成し遂げられる予定である⁴⁾が、10年後も同じことを書いているかもしれない計画である (Fig.1)。

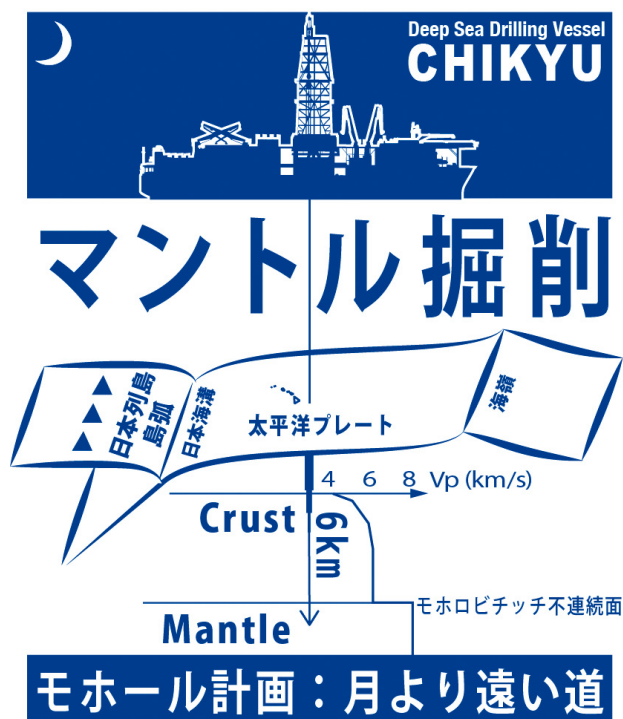


Fig.1 Schematic model for Mantle Drilling Project. the riser-drilling vessel Chikyu has made drilling through the oceanic crust and into the upper mantle, ~6 km below the seafloor, technically feasible.

掘削に成功すれば世界で最初にマントルに到達した計画としてアポロ計画と同様に人類が存続する限り教科書に記述されそうなくらいの壮大な計画である。しかし、実行経費は惑星探査とほぼ同等なので当初計画通りに実施されるかどうかは不透明である。

3. ちきゅうによるマントル掘削計画の課題

ちきゅうには、これまでの科学掘削船には装備されていない最大の特徴がある。それはライザーシステムとよ

ばれる掘削技術である⁴⁾。通常の掘削では、海底面に穴をあけてドリルパイプで掘り進めるだけなので、掘削泥はそのまま海底に残される。一方、ライザーシステムによる掘削では、掘削泥は循環式となっているので、船上で回収される仕組みである。このライザーシステムこそがマンテル掘削のための最大の切り札となる技術である。

しかし、である。これまでのちきゅうによる掘削においてライザーシステムが稼働したことはほとんどない。それどころか、マンテル掘削計画では、海底面から堆積物を掘り抜いた後で約6kmの厚さの地殻を掘り抜かなければならないが、ちきゅうはこの10年間で地殻の主要構成岩石である玄武岩を少し掘った程度でその下位のドレイイトとよばれる半深成岩も、さらにその下位のハンレイ岩とよばれる深成岩も掘削した経験がない。いわゆるハードロック掘削をしたことがないのである。この経験不足はモホール計画を現実的なものから予算とは別の意味で大きく後退させている。

一方、現在ちきゅうとともに活躍するジョイデスレゾリューション号は、ハードロック掘削を度々実施している。私は2014年の第352次航海として実施された小笠原海溝陸側斜面の火山岩掘削⁵⁾と、2016年から2017年にかけて第366次航海として実施されたマリアナ海溝陸側斜面の蛇紋岩泥火山掘削⁶⁾に参加した。これらの掘削航海では当初200mの掘削孔を予定していたが、わずか20~30mで掘削ドリルが動かなくなって掘削孔をあきらめ別の地点で掘削することが行われた。このように事前に地震波速度構造などから掘削地点を詳細に検討した上での掘削であっても、実際に掘ってみると大小さまざまな困難が立ちはだかる。その結果として当初計画通りの深度まで掘削できないことはよくある話である。

ジョイデスレゾリューション号が世界中の海底面を掘削しながら経験値を蓄積しているように、ちきゅうについても壮大なモホール計画を達成可能にするために、ハードロック掘削の経験を積ませる必要がある。

また、ちきゅうには優れた研究設備が搭載されているが、これまで岩石コアを解析した経験がほとんどない。マンテル掘削では6kmの地殻を掘削する予定である。仮に船上に6kmの長大な岩石コアが次々に上がってきたらどうなるのだろうか？モホロピッチ不連続面付近を掘削して得られた岩石コアから掘削最深部の情報を船上の研究設備を使って迅速に得られるだろうか？モホール計画の事前段階として実現可能なハードロック掘削をちきゅうにも経験させたい。これらの課題を少しでも解消するために、現在、2つの計画が進んでいる。

4. オマーン陸上掘削とちきゅうの船上記載

モホール計画は魅力的であるが、今すぐ実現するわけではない。地球科学分野の地質学は基本的にフィールドサイエンスであり、地球表層の調査可能な地層や岩石を直接観察して、それらがなぜどのような過程でその場所に存在するのか理解していく学問である。しかし、マンテルは厚い地殻の下にあるので、地質学的にマンテルを直接研究できるわけではない。そこで、陸上に存在するカンラン岩からマンテルを間接的に研究することになる。

アラビア半島東端部のオマーン王国に分布するオフィオライトとよばれる岩体（オマーンオフィオライト）は、陸上に露出した世界最大の海洋プレートの断片と考えられており、そこに含まれるカンラン岩にはマンテルの化学組成や構造が保存されている(Fig.2)。

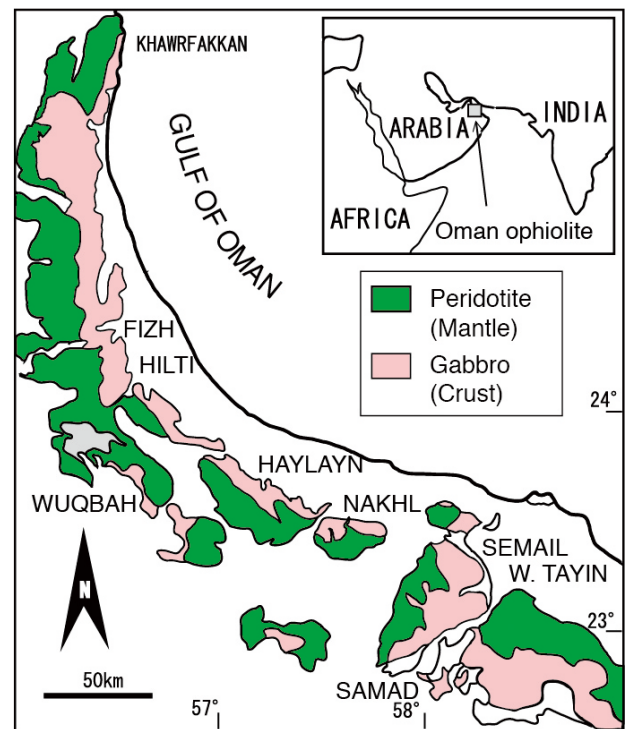


Fig. 2 Oman ophiolite consists dominantly of gabbro and peridotite. Oman drilling project is to core a series of rocks from the top to the bottom of oceanic crust and mantle.

これまで多くの研究がオマーンオフィオライトで行われてきたが、2016年12月から2年間の予定で国際陸上科学掘削プロジェクト(International Continental Drilling Project)としてオマーン陸上掘削が開始された⁷⁾。

モホール計画は海洋底から1本の掘削孔で約6km地下のマンテルまで到達することを目指すのに対して、オマーン陸上掘削では何本もの短い掘削を実施して地殻上部からマンテルまでのほぼ連続した岩石を揃える計画にな

っている。この計画が順調に進めば、間接的であるが海洋底の大構造を明らかにする手がかりが得られることが期待される。

しかし、オマーン陸上掘削では、2年間で長さにして4~5kmの岩石コアが得られる予定である一方で、これらの岩石コアをどのように記載するのかが課題であった。連続した岩石コアとみなすのであれば、最初から最後まで一貫して統一した手段で岩石記載をしなければ、地殻の大構造どころか小さな構造や特徴でさえも見逃すことになりかねない。この解決策として提案されたのがちきゅうによる船上記載である。ちきゅうは掘削船なので、掘削された岩石コアを記載する設備が搭載されている。この設備を活用する案が考え出された。先に述べたようにちきゅうは岩石コア分析の設備はあるが経験がないので、オマーンの掘削コアの記載によって経験を積み重ねることができる。海洋研究開発機構の全面的な協力によって2017年7月から2ヶ月間、ちきゅう船上でオマーン掘削コアの記載が実施される予定である。日本を含めて世界中から30名の研究者・学生が集結して一所懸命分析する計画である。大いに成果を期待されたい。

5. 前弧モホール計画

超深海海溝の陸側斜面にもカンラン岩が見つかった。伊豆—小笠原—マリアナ海溝は最深部が10kmを超える世界最深の海洋底である。なぜそこが超深海になったのか、超深海がどのように維持されているのか、この地球表層の特異点についても未解明の領域である。一方、これらの海溝陸側斜面の6kmよりも深い海底斜面にカンラン岩が存在することは1960年代から知られていた。これまでの海底調査から私たちの研究チームは、超深海海溝の陸側斜面にカンラン岩が分布するのは島弧側の最上部マントルが現れた結果と考えている⁸⁾。

さらに最近の研究結果から、海溝に露出したカンラン岩の組織に太平洋プレートが沈み込みを開始した約5200万年前の記録が残されていることが明らかになった。さらに、沈み込み開始当時だけでなく、その後の約1000万年間に発達した島弧地殻形成時のマントル流動の記録が重複して残されていることもわかってきた⁹⁾。

海溝研究が進む中で、オマーンオフィオライトのような陸上のカンラン岩と超深海海溝のカンラン岩に多くの類似性が認められるようになってきている。そのため、これらのカンラン岩の特徴を比較するために、海溝陸側斜面のカンラン岩を掘削する前弧モホール計画を立案して2016年の4月に国際深海科学掘削計画に提出した⁶⁾ (Fig. 3)。

前弧モホール計画では、海溝陸側斜面の水深6500mあ

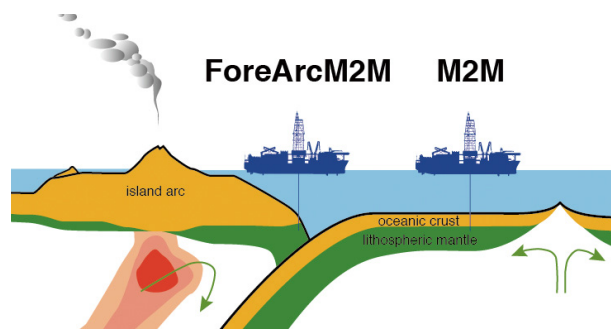


Fig. 3 M2M is Mohole project, whereas Fore Arc M2M is a project to drill into mantle at the land-side of the Bonin Trench. These are future drilling projects submitted to IODP for Chikyu.

るいは7000mから掘削を開始する必要がある。このような超深海掘削は従来にはなく数々の掘削経験をもつジョイデスレゾリューション号でも困難である。ところが、ちきゅうには超深海掘削の経験がある。ちきゅうは2014年3月11日に東日本大震災を引き起こしたマグニチュード9の大地震による日本海溝の断層すべり帯の掘削に2015年5月に成功した⁹⁾。この掘削でちきゅうは水深約6890mから約845m掘削して断層すべり帯に到達している。この成果を受けて計画されたのが、前弧モホール計画である。

前弧モホール計画といっても、掘削予定地点で地震学的にモホロビッチ不連続面は観測されていない。そのため、これは前弧マントル掘削、もっと厳密にするなら前弧カンラン岩掘削とよぶべき計画である。海溝は深いため、海面からの物理探査には限界がある。できれば深海底に海底地震計を設置して観測したいと考えていたところに、2019年から2020年にアメリカの探査船が北西太平洋にくる可能性がでてきた。そのため、前弧モホール計画の掘削予定地点で地震波探査が実施されるように準備を開始している。

前弧モホール計画は超深海から掘削するため、海底面から最大でも数100mまでが掘削限界と考えられている。しかし、それでもモホール計画のように地殻を約6km掘り進めるかわりに、海水中を6~7kmまでパイプをつなげた先でマントルの主要構成物質であるカンラン岩を掘削する作業の方が現時点では現実的に思える。

このようにモホール計画とそれに関連した掘削計画が少しずつ進んでいるが、特に前弧モホール計画を実現するためには、水深6500mから8000mの海底調査と掘削候補地点の海底地震波探査、さらに超深海掘削の技術が必要である。海溝近くでモホロビッチ不連続面が観測できれば、前弧モホール計画は真の意味でモホール計画になりうる。しかし、このような超深海の調査は現在の海洋技術では簡単には実施できないのが現状である。将来

のモホール計画を見据えて、海底調査の技術が今後一層発展することを期待してやまない。

6. 謝辞

海洋調査技術学会には特別セッションにおける発表と本号への投稿の機会をいただいた。本研究は、日本学術振興会・科学研究費・基盤研究(S)（課題番号：16H06347）による支援を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) W. Bascom, 1961. A Hole in the Bottom of the Sea: The Story of the MoHole Project. Doubleday & Co., New York, 352 pp.
- 2) URL: <http://www.iodp.tamu.edu/>
- 3) Chikyu+10 International Workshop Report, 2013, CDEX, JAMSTEC, Yokohama.
- 4) URL: <http://www.jamstec.go.jp/chikyu/j/>
- 5) M. Reagan et al., 2015. Expedition 352 summary. Proceeding of the IODP, 352: College Station, TX.
- 6) P Fryer et al., 2017. Expedition 366 summary. Proceeding of the IODP, 366: College Station, TX.
- 7) URL: <http://www.omandrilling.ac.uk/>
- 8) K. Michibayashi et al., 2014. 898-Pre: Fore Arc M2M. IODP preliminary proposal.
- 9) F. M. Chester et al., 2012. Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST). IODP Preliminary Report, 343/343T.

【訂正とお詫び（編集委員会）】

本誌第29巻第1号（p.37～40）掲載の道林克禎氏の講演録「マントル掘削計画：モホール計画と前弧モホール計画，そしてオマーン陸上掘削」につきまして，著者による校正が反映されていない版が掲載されておりました。

ここに著者をはじめ関係各位にお詫び申し上げるとともに，訂正した講演録を改めて本号に掲載いたします。