



超深海海溝のマントル直接研究 —惑星探査みたいなフィールドサイエンス—

道林克禎 Katsuyoshi MICHIBAYASHI

地球の層構造の中心的存在であるマントルの主成分組成はカンラン岩という物質である。この岩石は、地球で最も存在量が多い普通の岩石にもかかわらず、地球表層では希少で貴重な物質である。最深部が1万mを超えるマリアナ海溝やトンガ海溝にはマントル最上部のカンラン岩が分布している。これらのカンラン岩の研究から太平洋プレートが沈み込みを開始して島弧が発達成長するまでのマントルの状態がわかりつつある。超深海海溝のマントル直接研究は、惑星探査に類似したフィールドサイエンスであり、地球探求の魅力にあふれている。

はじめに ～惑星地球で最も普通な岩石～

地球はその体積の80%以上を岩石という物質から構成されている。この岩石は、川縁に転がっている「身近な物質」である。泥岩、砂岩、礫岩、石灰岩などの堆積岩やハンレイ岩、閃緑岩、花こう岩などの深成岩、さらには緑色岩、泥質片岩、片麻岩など彩りや模様が鮮明な変成岩など、中学校までの理科で覚えた方も多いはず。ところが、別の視点で見直すと、これらの身近で手に取ることのできる岩石は「惑星にはほとんど存在しない貴重な物質」に思えてくる。堆積岩は水がかなり存在しないと形成できない。そもそも地表に水循環がなければ堆積作用が存在しないので、水がない惑星では堆積岩を形成できない。最近、火星に水があった（ある）証拠が見つけ出されている¹⁾が、地球と比べるとないも同然である。御影石として墓石によく使われる花こう岩もまた、水を含むマグマの結晶分別作用がないと形成できない物質である。堆積岩や花こう岩が他の惑星で見つかったら大発見に違いない。このように身近な岩石は、他の惑星では手に入れることのできない水惑星の進化を語る超貴重な物質と考えてもおかしくない。

惑星科学の視点でみると、存在量が最も多い「地球

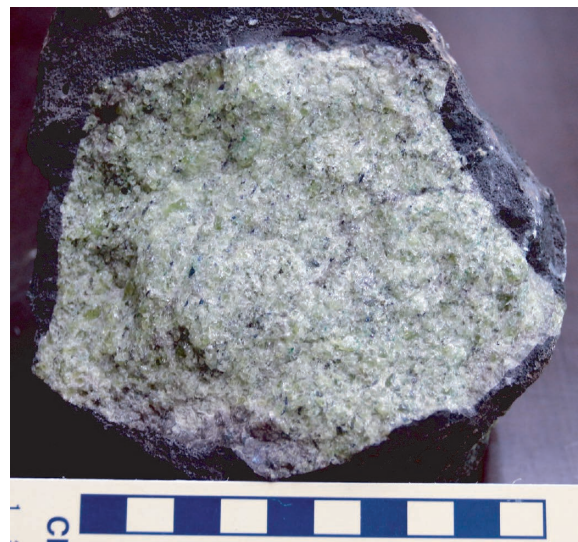


写真1 上部マントルの主成分組成であるカンラン岩
緑色を呈した物質がカンラン岩であり、それを覆っている黒い物質はマグマが冷えて固まった玄武岩である。マントル内でマグマの中に捕獲されて火山噴火によって地表まで運ばれたので、カンラン岩捕獲岩と呼ばれる。オーストラリア・ビクトリア州で採取されたもの

で一番普通な岩石」はカンラン岩という深成岩に分類される物質である（写真1）。カンラン岩は、地球の岩石の大部分を占める極めてありきたりの物質であり、他の惑星にも間違いなく存在するはずの岩石。ところが、この地球で最も普遍的に存在するカンラン岩は、海洋地殻と呼ばれる海底の岩石層の下側地下6kmよりも深い上部マントル層にある（図1）。意外かもしれないが、マントル層にあるカンラン岩としては、地表に最も近いマントルリソスフェアのカンラン岩でさえも、人類史上一度も直接観察されたことがない。地球で最も多い物質であるカンラン岩は、「私たちにとって手が届かない希少で貴重な岩石」なのである。

みちばやし・かつよし
静岡大学大学院理学領域（理学部地球科学科）
教授・静岡大学研究フェロー

〔経歴〕1988年静岡大学理学部地球科学科卒業。94年オーストラリア・ジェームズクック大学理学研究科博士課程修了。Ph. D. 同年4月日本学術振興会特別研究員（東京大学理学部地質学教室）、同年10月静岡大学理学部地球科学科助手、2002年助教授を経て、13年教授、16年から現職。〔専門〕構造地質学、テクトノフィジックス。
E-mail: michibayashi@shizuoka.ac.jp



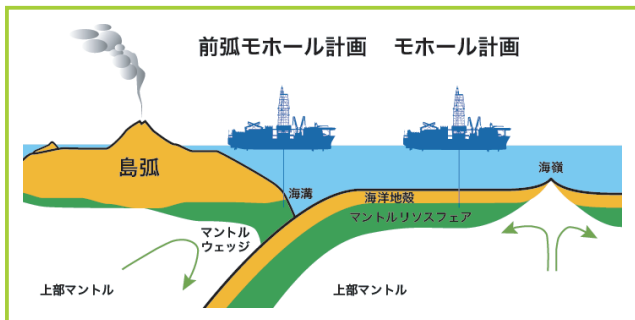


図1 マントルリソスフェアまで掘削するモホール計画の模式図
超深部探査船「ちきゅう」を使って太平洋プレートの海洋地殻を6km掘削してマントルリソスフェアのカンラン岩を採取する計画である。海洋地殻とマントルリソスフェアの境界と考えられている地震波反射面のモホロビッチ不連続面(モホ面)を掘るのでモホール計画と言われる。モホール計画はアポロ計画と並んで立案された。前弧モホール計画は筆者らの研究チームが提案した小笠原海溝の陸側斜面から前弧マントルリソスフェアを目指す最新の計画

マントル掘削計画 ～モホ面を掘るモホール計画～

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。この計画と平行して、同国の地球科学分野に「モホール計画」という似たような巨大な計画も進んでいた。モホール計画では、太平洋の海底を掘り抜いて地球で最も多いカンラン岩で構成されたマントルリソスフェアへの到達を目指した(図1)が、アポロ11号のアームストロング船長が月に降り立つよりもずっと前に諸事情によって終焉してしまった²⁾。モホール計画自体は失敗に終わり、マントルへのわずか6kmの道程が「月よりも遠い道」になった。しかしながら、その計画実行のために開発された諸技術は、現在まで続く国際深海科学掘削計画(iodp.org)へと引き継がれて数多くの成果が得られている。

21世紀になってモホール計画が日本から再び始動した。そのきっかけとなったのは、2005年に就航した超深部探査船「ちきゅう」である。ちきゅうは、太平洋の海底からマントルリソスフェア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り、順調にいけば10年後に人類初のマントル掘削が成し遂げられる予定である³⁾(図1)。もし掘削に成功すれば、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1000年後の教科書に記述されそうなくらい壮大な計画である。しかし、実行経費は1000億円単位なので、計画そのものが伝説化してしまう可能性もある。なにしろ月よりも遠い道に行くのである。

陸上のマントル直接研究 ～アラビア半島オマーン王国のオフィオライト～

モホール計画は魅力的だが、今すぐマントルに到達できるような類ではない。地質学は基本的にフィールドサイエンスである。地球表層のアクセス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46億年の地球史の上で理

解していく学問である。しかし、地質学的にマントルを直接研究できる場所は限られている。

世界で最もマントルらしいカンラン岩は、アラビア半島東端部のオマーン王国に分布する世界最大のオフィオライト岩体(オマーンオフィオライト)である。このオフィオライトは海洋プレートの断片であって、その中に含まれるカンラン岩はマントル由来と考えられてきた⁴⁾。しかし、頭では理解しつつも、このオフィオライトの山間部を歩きながら、これがたとえマントル由来だとしても「マントルの一部だった当時の状態」を保存しているのか疑問を持つようになった。なにしろ、実際のマントルは最短でも地下6kmより深い月よりも遠い場所なので、マントルと同じ状態を維持したまま地表まで移動してきたと考えるのは早計すぎた。

超深海海溝のマントル直接研究 ～まるで宇宙船のような「しんかい6500」～

マリアナ海溝とトンガ海溝は最深部が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、この地球上の特異点の原因について実はよくわかっていない。それはさておいて、これらの海溝陸側の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⁵⁾。筆者は、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(図1)。

海底調査であれば海洋研究開発機構が開発した日本の誇る有人潜水探査船「しんかい6500」や無人探査機「かいこう7000II」があるので、公募研究として申請すればしかるべき審査を経て利用できる。この仕組みは地方大学の研究者にとっては大変ありがたい制度である。モホール計画では地殻内を6km掘削して進まなければならないが、海洋底では海中を潜航して進める。しんかい6500の潜航では、海面に浮かんでいる間は小舟のようにゆらゆらと波に揺れるが、潜航を開始するとすぐに揺れなくなる。船の耐圧殻は意外に広く感じられ約9時間の密閉状態も何のそのである。

しんかい6500に乗船して暗闇の海中を音もなく降下する2時間半は、何度経験しても深海の宇宙を旅していく気分になる。海底調査では、着底地点から上方に斜面を観察しながら進む。所々でロボットアームを船内で操作して岩石を採取する。それは陸上調査で歩いて観察しながら岩石をロックハンマーで採取する感覚と変わりなく、文字どおりの超深海というフィールドで行うマントルの直接研究である。また、約4時間海底調査した後、浮上するためにバラスト(重り)を外して船が上昇を開始する瞬間は、惑星探査の後で離陸するときもこんな気分かもと妄想してしまうほど劇

的である。浮力でぐんぐん上昇していく船から光が届かなくなって徐々にぼやけていく海底をしんかい6500の観察窓に顔を押し付けるようにして見つめながら、地球で最も多いマントル層から「貴重な」カンラン岩を採取できた喜びが静かにわき上がる。これこそ有人潜水探査船の醍醐味であるが、水深6500mまでしか調査できないのがやしい。ジェームズ・キャメロンが達成した⁶⁾ように、いつか世界最深であるチャレンジャー海淵の10kmの海底に降り立ってマントルの直接研究をしたいものである。

カンラン岩の組織 ～マントル流動の証拠～

筆者たちの研究チームはこれまでの10年間で小笠原海溝、マリアナ海溝、トンガ海溝からカンラン岩を数多く採取してきた⁷⁾。カンラン岩は、カンラン石(化学組成は $(Mg,Fe)_2SiO_4$)という鉱物を主成分とする岩石の総称である。カンラン岩を切り出して厚さ0.03mmの薄片にしたプレパラートを作成すると、偏光顕微鏡を利用してカンラン岩に含まれる鉱物相や組織を観察できる(写真2)。さらに、組織を形成する個々の鉱物粒子の物理化学的性質を調べることによって、マントルの環境(応力、温度、圧力、含水量、熔融度など)や流れの性質(レオロジー)を推定できる。私たちの研究目的の1つは、カンラン岩の組織からマントルの構造を解明することである。

マントルの構造は、かんらん岩の主成分であるカンラン石が1000℃以上の高温環境でゆっくり変形するクリープという流動によって形成される。太平洋プレートはマリアナ海溝やトンガ海溝などの収束域でマントル層に沈み込んでいる。この沈み込むプレート(スラブ)と沈み込まれるプレートの間のマントル領域のことをくさび状の形状からマントルウェッジというが、ここでは流れの向きは水平から下方に変わっている(図1)。超深海海溝から採取したカンラン岩は、こ

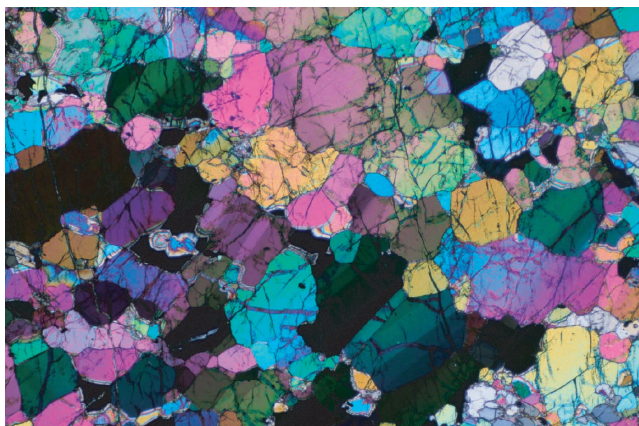


写真2 しんかい6500の第1234回潜航によって採取されたマリアナ海溝水深6000m付近のカンラン岩の組織
写真の横幅は約5mm。偏光顕微鏡で観察される干渉色で最も色彩が鮮やかな鉱物がカンラン岩の主成分のカンラン石 $((Mg,Fe)_2SiO_4)$ である

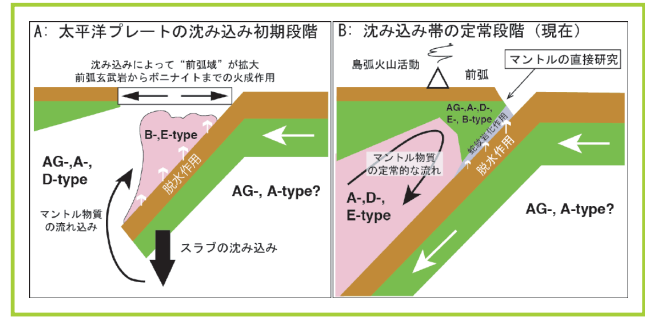


図2 沈み込み帯の発達過程の模式図

マントルを直接研究できる海溝陸側斜面のカンラン岩には、沈み込み初期段階(A)から現在の定常段階(B)に至る過程で形成されたマントルの構造(A-, B-, D-, E-, AG-type)が記録されている⁷⁾

のマントルウェッジ先端部の物質である。

筆者たちの研究チームは、海溝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を明らかにした(図2)。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。

また、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で採取したカンラン岩に多くの類似性が認められた。そのため、もしかすると陸上のカンラン岩の大部分が海溝起源なのかもしれない。筆者たちのカンラン岩研究に基づいたマントルの知見は、実はマントルウェッジ先端部についての知識であって、その他の大部分のマントルについての情報は意外に極めて限られているのかもしれない。このことを検証するために、筆者たちの研究チームは、オマーンオフィオライトの陸上科学掘削計画や超深部探査船「ちきゅう」を使った小笠原海溝の前弧モホール計画(図1)を立案して⁸⁾、陸のカンラン岩と海のカンラン岩の比較研究を開始するところである。

マントルの直接研究は、一筋縄ではいかないが、地球表層のラストフロンティアとして興味の尽きない学問分野である。海は広く大きく、海底は暗く深い、そこには私たちの惑星地球の大部分を占めるマントルが静かにその岩肌を現して私たちの到着を待っている。

- 1) L. Ojha, et al., *Nature Geoscience* **2015**, 8, 829.
- 2) W. Bascom, *A Hole in the Bottom of the Sea: The Story of the Mohole Project*, Doubleday & Co., New York, **1961**, 352 pp.
- 3) Chikyū+10 International Workshop Report, CDEX, JAMSTEC, Yokohama, **2013**.
- 4) 道林克禎, 日本レオロジー学会誌 **2006**, 34, 291.
- 5) R. L. Fisher, C. G. Engel, *Geological Society of America Bulletin* **1969**, 80, 1373.
- 6) ジェームズ・キャメロン, ナショナルジオグラフィック日本語版, 2013年6月号.
- 7) K. Michibayashi, et al., *Earth and Planetary Science Letters* **2016**, 443, 70.
- 8) 道林克禎, ほか, *ブルーアース* **2016**, BE16-33.