

サイエンスとしてのマントル掘削： そのインパクトと展望

荒井章司*

(2013年3月6日受付, 2013年5月1日受理)

Mantle drilling as a science: its impact and perspective

Shoji ARAI*

* Department of Earth Sciences, Kanazawa University,
Kakuma machi, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

We seriously desire mantle drilling to observe and sample in-situ mantle materials. Our understanding of the mantle has been so limited because of our very limited access to the mantle materials, which inevitably lost mantle signatures. The mantle drilling should be performed on the ocean floor, especially of the Pacific, which shows a thin crust and the simplest geological context. All the signatures that are shown by the mantle peridotite obtained in the drilling are representative of mantle processes. The results will provide a new standard for our understanding of the mantle: the mantle drilling will be really a window to the Earth's interior.

Key words: Mantle drilling, Fresh peridotite, Pacific Ocean

1. はじめに

マントルの理解は地球科学にとって重要であるの言うまでもない。また、マントルは地殻（厚さ、海洋底で6~7, 大陸で30~40 km）の下位にあり、アクセスが容易ではないことも理解できる。しかし、ある種のマントル由来物質が手に入るために、マントルは物質的に十分にわかっていると考えられがちである。しかし、このような物質は、「その場」のマントル物質ではなく、上昇・冷却の過程で様々な化学的・組織的改変を被っている「元マントル物質」なのである。我々は、マントルまでの掘削によるマントルのその場観察とサンプリングを必要とし熱望している（荒井・阿部, 2008）。マントル掘削により何が得られ、将来の展望がどう開けるのであろうか？ また、どこまで掘削すべきなのであろうか？

2. マントル物質はどのように入手されているか：現状と限界

マントルに能動的にアクセスできないために、我々は地球の営みにより地表にもたらされたマントル起源の物質を利用して来た。いわば受動的なマントルへのアクセスである。以下に簡単にまとめる。

2.1 かんらん岩体およびオフィオライト

変動帯に分布するかんらん岩体が古来知られている。これらは固体のまま深部から貫入したもので、「アルプス型かんらん岩体」と総称された。代表的なものはオフィオライトのマントル部である。オフィオライトとは、上位より堆積岩—火山岩—ガブロ（はんれい岩）—かんらん岩（蛇紋岩）よりなる複合岩体である。この「オフィオライト層序」は地震学的な海洋底モデルと類似しており、オフィオライトはある種の海洋リソスフェアの断片（「海洋底の化石」）とされた（Coleman, 1977）。一方、高度変成岩に伴うかんらん岩体は、しばしば新鮮であり、大陸のマントルを代

* 金沢大学理工研究域自然システム学系地球学教室
〒920-1192 石川県金沢市角間町

表しているとされる。

これらのマントルかんらん岩は、深部から地表までの条件をゆっくりと経験するために様々に低温・低圧で改変される。蛇紋岩化はマントル鉱物を容易に消し去る。また、蛇紋岩化ほど顕著でないにせよ、地殻流体が粒界やクラック沿いに移動し流体移動成分を加減するであろう。例えば、新鮮さで有名な北海道日高帯の幌満かんらん岩体は岩相変化に富み、様々なマントル過程の研究に好適とされるが、二次的にフロゴパイト、パーガス閃石などが形成されている（高橋ほか、1989）。このアルカリ交代作用は、少なくともマントル交代作用のアナログにはなるものの、どこで起きたかは自明ではない。

2.2 海洋底に露出するかんらん岩

低速拡大軸の海洋断裂帯の海嶺に挟まれた部分（インサイド・コーナー）が高まりとなっており、蛇紋岩（かんらん岩）などの深部起源の岩石が露出し（Tucholke and Lin, 1994）、海洋コア・コンプレックス（OCC）と呼ばれる。低速拡大軸ではマグマの供給量が少なく、一部では非マグマ的に拡大が行われ、深部の岩石が固体の状態で海洋底に引きずり出されOCCが形成される。一方、海洋底で多くの部分を占める高速拡大軸起源の太平洋では海洋断裂帯の発達が弱く、またマグマの供給量が多いためにOCCは形成されない。しかし、断裂帯やかつての拡大中心付近に深部岩石が露出しており、掘削などでマントルかんらん岩が得られている。

これらのかんらん岩は、活発な熱水活動のために激しく蛇紋岩化している。また海水と接するために、海洋底風化を強く被っている。何よりも、断裂帯で得られる深部起源の岩石は、海嶺セグメント端という熱構造が特殊な場で形成されたものであり、海嶺セグメント内で形成された通常の海洋底の深部を代表しない。このほか、島弧の前縁部、すなわち前弧域にも蛇紋岩がしばしば蛇紋岩海山という高まりを作って露出する。沈み込むプレート上盤側のマントル・ウェッジの先端部が破碎され上昇するが、この部分のマントル物質もプレートから放出される水で強く変成作用や変質作用（蛇紋岩化）を被っている（Parkinson and Pearce, 1998）。

2.3 マグマ中のかんらん岩捕獲岩

マグマにより地表にもたらされるかんらん岩などの超マフィック岩の捕獲岩（Nixon, 1987）は、深部からの運搬時間が短く、噴出時代も新しいものが多く、

比較的マントルの条件を凍結している。しかし、高温のマグマにさらされることによる加熱と、化学平衡にないマグマと接することによる反応を考慮せねばならない。

多くの捕獲岩を運ぶアルカリ玄武岩マグマは、低圧では斜方輝石と強く反応し、しばしばかんらん岩の分解を促進する。単斜輝石はしばしば部分溶融し、スポンジ状の高温低圧の輝石に改変される。角閃石が存在する場合は、しばしば分解する。これらの改変は捕獲岩が小型ほど顕著である。島弧マグマ中の捕獲岩はマグマ溜りに滞留することが知られる（例えば、Takahashi, 1980）。島弧マグマ中のかんらん岩捕獲岩の多くがガブロやホルンブレンダイトと複合捕獲岩を形成することはそれを裏付けている。マグマ中の捕獲岩の最大の欠点はその「断片性」にある。捕獲岩は最大のもので径1 m 程度（多くは径数～数十 cm）であり他の岩石との関係や不均質性などの地質構造的な情報を知るのに本質的に不向きである。

3. マントル掘削はなぜ必要か：地球化学的インパクト

マントル掘削は、上述した現在入手可能なマントル物質に関する問題点の多くを解決し、地球化学に新たな展望を与えると期待される。

3.1 どこを掘るか？

海洋リソスフェアは、数あるテクトニクな環境の中で最も単純な地殻—マントル系を形成する。海嶺は生産的プレート境界であり、マントル物質の上昇→部分溶融により基本的に新たに地殻—マントルが形成される。島弧、大陸やホットスポットのリソスフェアは、基本的に既存のものがマグマ活動等で改変されており、複雑な履歴を有する。さらに中央海嶺玄武岩（MORB）は地球で最も優勢なマグマである。従って、海洋底、しかも最も優勢である太平洋をマントルまで掘らねばならない。掘削地点では、年代、地震波による地下構造などの情報が完備し、モホがきちんと見えていることが必須である。

3.2 どこまで掘ればよいか？

オマーン・オフィオライトや断片的な海洋底の深部物質からの情報を総合すると、太平洋底の岩石構成はFig. 1のようになっていると考えられる。すなわち、層状ガブロの下位にはダナイト〜トロクトライト層があり、さらにマントルかんらん岩（ハルツバーガイト）に漸移する。ただし、上位のハルツバーガイトは

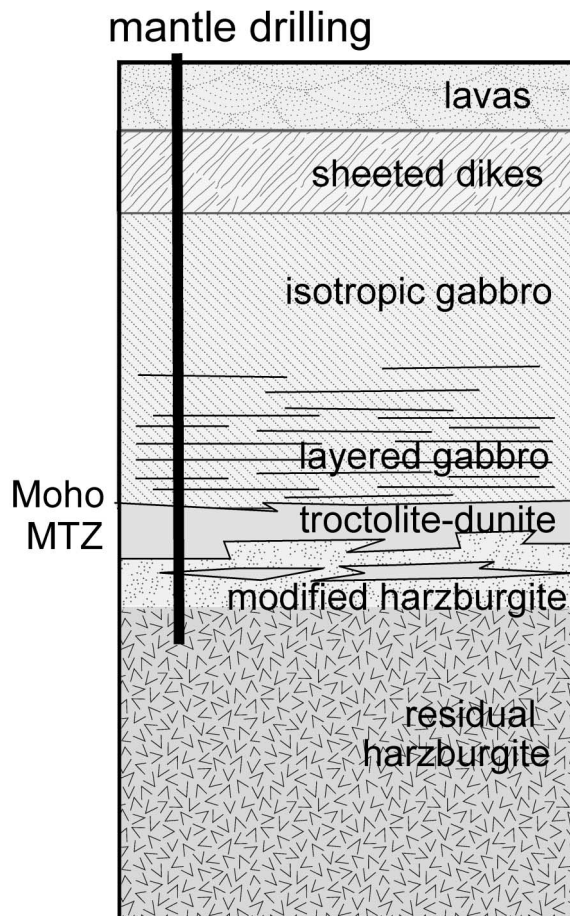


Fig. 1 Model petrologic profile of the oceanic lithosphere of fast-spreading ridge origin. Note that the depth to the bottom of the layered gabbro (possibly Moho) is 6 to 7 km. Constructed from observations on the Oman ophiolite as well as from ocean drilling results. The mantle drilling should penetrate the entire crust and uppermost part of the mantle to the residual harzburgite to obtain a complete set of oceanic igneous rocks. The layer dominated by troctolite-dunite is called the Moho transition zone (MTZ).

MORBにより改変されている (Akizawa *et al.*, 2012)。モホは層状ガブロの下端付近に相当すると思われる。従って、ダナイト層に到達すればマントル掘削と言えるが、ここでは是非溶け残りハルツバーガイト層までを掘削して完全な深部岩セットを入手せねばならない。

3.3 掘って何がわかるか？

このようにして得られたマントル最上部のかんらん

岩類 (ダナイト, ハルツバーガイト) は新鮮なはずであり, 観察されるすべてがマントル過程の産物である! 粒界も保存されており, マントル中の *in-situ* の結晶粒界が初めて観察できるであろう。流体包有物 (そのレリックも含む) を形成した流体はすべてマントル流体である。海洋底かんらん岩は地殻を形成した MORB と非平衡であり, 初生メルトからの MORB の生成過程は第一級の難問である。この解決はこの深度の試料では難しい (Johnson *et al.*, 1990 参照) と予想されるが, 太平洋の最上部マントルで初生 MORB 起源の集積岩が発見されており (Arai and Takemoto, 2007) 可能性はある。謎の岩石クロミタイトは掘削で遭遇する確率は高くはないであろうが, 掘り当てたら面白い (荒井, 2012)。海洋マントルダイナミクス解明へと夢が広がる。

モホの実体が解明される。モホは本当にガブロとかんらん岩の境界で, 単なる常識の確認に終わるのだろうか? オフィオライトとの比較も岩石学者には興味深い。オフィオライトは海洋リソスフェアそのものではないというのは今や常識であるが, どの程度の類似性/相違性があるのだろうか? オマーン・オフィオライトで得られたイメージとどの程度違うのかこの目で確かめたい。

4. ポスト・マントル掘削

太平洋にマントル掘削が成功すると, まさに地球深部への窓ができたことになり, 海洋底の岩石学/物質科学にとってはまさに新時代の到来となる。マントル物質学の基準物質ができることで, マントル物質の解析は新たな局面を迎えるであろう。ある意味では, 今までのマントル物質学はすべて仮説なのである。これにより, 次のマントル掘削の機運が高まるであろう。太平洋のマントル掘削は標準となるが, 地球の多様性を理解する上では第一歩に過ぎない。低速拡大軸, 背弧海盆など次なるターゲットの候補は多い。特に, 低速拡大軸の OCC (インド洋のアトランティス・バンクなど) の超深度掘削は面白い。蛇紋岩化前線の実体の確認のほか, 新鮮なマントル物質の入手やマントルの不均質性の吟味はこちらのほうが手取り早い。太平洋のマントル掘削より早く実現するかもしれない。

謝 辞

海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の高野淑識氏には本稿を書く機会を与えていただいた。

引用文献

- Akizawa, N., Aral, S. and Tamura, A. (2012) Behavior of MORB magmas at uppermost mantle beneath a fast-spreading axis: an example from Wadi Fizz of the northern Oman ophiolite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **164**, 601–625.
- 荒井章司 (2012) ボディフォーム・クロミタイトはマントル内を循環するか? 超高压クロミタイトの謎. 岩石鉱物科学, **41**, 247–256.
- Aral, S. and Takemoto, Y. (2007) Mantle wehrlite from Hess Deep as a crystal cumulate from an ultra-depleted primary melt in East Pacific Rise. *Geophysical Research Letters*, **34**, L 08302, doi:10.1029/2006 GL 029198.
- 荒井章司・阿部なつ江 (2008) モホの岩石学実体を探る—21世紀モホールを目指して—. 地学雑誌, **117**, 110–123.
- Coleman, R. G. (1977) Ophiolites. Springer-Verlag, pp. 229.
- Johnson, K. T. M., Dick, H. J. B. and Shimizu, N. (1990) Melting in the oceanic upper mantle: An ion microprobe study of diopsides in abyssal peridotites. *Journal of Geophysical Research*, **95**, 2661–2678.
- Nixon, P. H. (1987) Mantle Xenoliths. Wiley, pp. 844.
- Parkinson, I. J. and Pearce, J. A. (1998) Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc (ODP Leg 125): Evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting. *Journal of Petrology*, **39**, 1577–1618.
- Takahashi, E. (1980) Thermal history of lherzolite xenoliths-- Petrology of lherzolite xenoliths from the Ichinomegata crater, Oga peninsula, northeast Japan, Part I. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **44**, 1643–1658.
- 高橋奈津子・荒井章司・室田祐一 (1989) 北海道, 日高帯のかんらん岩体にみられるアルカリ交代作用. 地質学雑誌, **95**, 311–329.
- Tucholke, B. E. and Lin, J. (1994) A geological model for structure of ridge segments in slow spreading ocean crust. *Journal of Geophysical Research*, **99**, 11937–11958.