特集号「マントル物質研究の最前線」巻頭言

荒井 章 司*

Introduction to the Special Issue "The Forefront of Mantle Material Research"

Shoji ARAI*

I. はじめに

本特集号「マントル物質研究の最前線」は、マントル、とりわけその上部（浅部）の物質的側面に関する研究の最前線の総説 10 編をまとめたものである。マントル物質の研究の最前線がさまざまな視点から論じられており、将来への展望も述べられている。マントル物質といってもここでは主として上部マントル (upper mantle) が対象となっている。マントルはさらに深部まで続き、中心部には核が存在するが、一般に物質の実体は深部ほど不確かとなる。上部マントルは辛うじて物質の実体がわれわれの手で実証可能な深さにあり、より深部物質への束縛条件を提出するものとしてもきわめて重要である。上部マントルはモホ（モホロビッチ不連続面；Moho）を介して地殻の下部を覆い、地球表層部と地球内部との境界をなし、地球の進化を考察する上でも重要な存在である。本特集号が多くの読者の地球への理解にとって有用であることを願うものである。

II. マントル物質の探査

マントルは、層状構造を有する固体地球で、核をとり巻く部分をなし、70 重量%を占めるとされる。したがって、地球を理解するためにマントルの理解は必須であることは明瞭である。にもかかわらず、マントルはわれわれ人類にはなかなか直接手の届かない遠い存在である。地球の半径 6300 km 強に対して最外殻である地殻は 6 km（海洋）～ 40 km（大陸）の厚さしかないのにも

かわらず、その下のマントル物質を随意に採取するにはわれわれは無力すぎるのである。そこで、さまざまな「地球の変動」によりマントルから運ばれたと思われる物質を探し出し、マントルの物質の実体を知ろうとする努力が続けられて来た。このようにして得られるマントル由来物質は主としてかんらん岩類 (peridotites) であり、大きく二分される。1 つはいわゆる固体貫入岩体 (solid intrusive massifs) をなすものである（口絵 1 参照）。他は、マントル由来のマグマ中の礫としてもたらされるもので捕獲岩（ゼノリス＝外来岩片；xenoliths）と呼ばれるものである（口絵 2 参照）。

前者の固体貫入かんらん岩は、主としてプレート収束境界において上盤側のマントルが他方の地殻にのし上げたものである。いわゆる造山性かんらん岩 (orogenic peridotites) やアルプス型かんらん岩 (Alpine-type (or alpine) peridotites) と呼ばれるもの（両者はほぼ同一物）がこれに相当する。オフィオライト (ophiolites) は過去のある種の海洋底のリソスフェア（地殻＋固いマントル最上部；lithosphere）がのし上げたものであるが、そのマントル部分 (mantle section) も重要な情報源である。海洋底から得られるマントル起源物質も広い意味の固体貫入岩である。前弧部（海溝と島弧本体の間）には海山をなしたり、陸側斜面にそのまま露出している。プレート収束域ではないが、低速拡大海嶺付近の海洋断裂帯には海洋コアコンプレックスと呼ばれる深部起源の高まりがあり、マントル起源物質が得られる（口

* 金沢大学理工研究域自然システム学系地球学教室

* Department of Earth Sciences, School of Natural System, Kanazawa University, Kanazawa, 920-1192, Japan

絵 1 参照)。これらのマントル起源物質の長所は、しばしば膨大な露出が得られることである。最大規模とされる中東のオマーン・オフィオライトでは、マントル部は 500 km × 50 km の露出を誇る (口絵 1 参照)。また、直上の地殻部との関係も明瞭に観察できる。すなわち、モホの物質的実体も明らかになる可能性がある (口絵 1 参照)。一方で短所は、低温低圧含水条件下で変質をさまざまな程度に被っていることである。かんらん岩は容易に蛇紋岩に変わってしまい、マントルの情報をさまざまな程度に失う (口絵 1 および 3 参照)。したがって、古い時代のオフィオライトほど、初生的性質の解明は困難となる (口絵 1 参照)。

この蛇紋岩/蛇紋岩化作用は、一昔前までは初生的なマントルの情報を消し去るものとして、岩石学者に嫌われていた。しかし最近では、その特異な性質の重要性が明らかになり、さながら時代の寵児のごとく多くの地球科学者の注目を浴びている (例えば、笠原ほか, 2003)。かんらん岩 (すなわち上部マントル) の主要構成鉱物であるかんらん石は、低温・低圧・加水条件下では容易に蛇紋石等に変化する (蛇紋岩化作用) (口絵 3 参照)。したがってかんらん岩は地殻にもたらされると、時間の経過とともに蛇紋岩へと変化する。逆に、蛇紋岩は加熱・加圧されれば脱水分解し、かんらん岩に戻る。かんらん岩⇄蛇紋岩の変化は、海洋底や島弧下の地殻〜マントルで起きており、固体地球の力学的性質、水などの元素の収支・移動や生命活動に深く関わっているらしい (例えば、Ohara *et al.*, 2012)。かんらん岩は蛇紋岩化に伴い、その物性は劇的に変化することが知られる。例えば、蛇紋岩は地殻の物性を有するようになるため、ある種のモホの生成にも関与している可能性がある (いわゆる Hess モデル; Hess, 1962)。

かんらん岩捕獲岩は、マグマにより急速に地表に運ばれるためにマントルの情報を保存しやすい長所を有する。一方で、個々の捕獲岩のサイズは直径数十 cm 以下と、マントルの情報源としては小型であり、深部物質としての代表性には問題がつねにつきまとう。また、岩片であるために、他の捕獲岩との関係は明瞭ではない (口絵 2 参照)。

さらに、捕獲〜運搬の過程で高温のマグマにさらされるために多少の改変は免れない。

マントルの物質的研究は、これらの制約 (二次的改変、小型試料の代表性等) との戦いであるという側面もある。これらのマントル物質は、地球のプロセスに頼っている以上由来するテクトニクな環境は限られており、いわば「受動的」サンプリングとならざるを得ない。仮にわれわれが望むセッティングでのマントル物質が随意に入手できたら、マントル物質科学を含む地球科学は夢の大発展を遂げるであろう。「能動的」マントル物質サンプリングとして話題のわが国の地球深部探査船「ちきゅう」を使用しての「モホール (海洋マントル掘削)」があげられる。技術的制約もあり、海洋底の任意の地点を掘れるわけではないが、地球物理学的、地質学的な予想のもとにマントル物質を目指すことができることは画期的である。本特集号にはこの手法 (モホール) のみを解説した論文は収録されていないが、いくつかの論文でも注目され触れられている (例えば、道林, 2015; 高野・大河内, 2015; 森下, 2015)。

以上のマントル探査法は、由来物質を探し求め、手にとり、観察や分析をするもので、いわば「岩石学的 (地質学的) 手法」である。限られた条件のなかではあるものの、マントルを物質的・化学的に直接把握できる。一方、マントルの地震波、磁気などの特性はほぼ汎地球的な把握が可能である。これらいわば「地球物理学的手法」は岩石学的手法とさまざまな点で相補的である。さらに、揮発性の低い元素について固体地球とほぼ同一の組成を有すると見なされる炭素質コンドライトから、地球の層状構造から核の組成を引き去ってマントルの平均的組成を見積もることが可能である (例えば、Ringwood, 1975)。これはいわば「宇宙地球化学的手法」と呼ばれるもので、岩石学的手法と相補的に、下部マントルの組成を推定する際にとくに有効である。未分化なコンドライトはかんらん石に富み、かんらん岩に類似する (口絵 4 参照)。これらの手法すべてが、マントルの「かんらん岩の組成」を示唆する。

III. 本特集号の構成内容

小平・藤江 (2015) は、海洋底リソスフェアの地震学的性質を論じ、海洋プレートの駆動要因にまで言及した自身の最新の研究成果のレビューである。上記のように、直接的に得られるマントル起源の物質は限られており、それらからの情報を一般化するのに、汎地球的に得られる固体地球の物理的性質、とりわけ地震波伝播速度特性はきわめて重要な情報である。モホをはじめとする固体地球内部の不連続面（層状構造）は地震波伝播速度で決められているからである。

森下 (2015) は新たな視点で海洋マントルを見つめ直している。マントルの不均質性はきわめて基本的な問題である。マントルは部分熔融/メルト抽出によりメルト成分に枯渇し、さらにメルト成分（地殻）+ 枯渇マントル（最上部マントル）がプレート沈み込みにより付加され化学的（物質的）に複雑化する。海嶺はマントルからの物質の湧出口であり、海洋底マントルにはさまざまなかんらん岩が存在しうるのであろう。この物質的証拠を探し出そうとするものであり、野心的で重要なテーマを将来に投げかけている。

松影 (2015) では、われわれが地表で苦労して得た最上部マントルの物質的情報をもとにさらに深部（上部マントル深部）の物質的情報を予測しようとしている。自前の高温高压実験の成果が盛り込まれているが、松影自身が上部マントル物質に精通した岩石学者でもあるので、その手法はきわめて心強く感じられる。ここでは、岩石学的手法のマントル探査の重要性和限界が示されている。

平内・片山 (2015) では、蛇紋岩またはかんらん岩の蛇紋岩化の重要性がまとめられている。蛇紋岩は地殻中にかんらん岩の変質物として存在するのみならず、マントル・ウェッジ中（とくにその先端部付近）にかんらん岩の水和物として広く存在するらしい。ここでは、その地殻～マントルの広い領域における蛇紋岩の役割やテクトニクな重要性が述べられる。

道林 (2015) では、マントルダイナミクスを

読み解くツールとしてのかんらん岩の組織（とくに結晶方位ファブリック＝構成鉱物の並び方）とそれに起因する地震波（P 波）速度構造が解説される。かんらん岩は固体の水である水河が流れるように、固体のまま流動・変形する。ファブリックの解析は、マントルダイナミクスのみならず、地表への貫入過程を直接的に解説することも可能となる。この分野は、マントルの物理的性質と化学的性質とを結びつけるためにも重要である。この論文では、筆者の新たなアイデアと将来の展望が示される。

小畑 (2015) では、マントルかんらん岩のきわめて局所的な熔融や粉碎過程の産物である「超マフィックシュードタキライト」が、この解析に道筋をつけた筆者の研究史を交えてレビューされる。この一見奇妙で稀な岩石の解析が、マントルでの地震等の解析に有用であることが将来の展望とともに語られる。

山本ほか (2015) では、マントル鉱物中の二酸化炭素に富む微小包有物の解析がレビューされる。酸化還元状態の指示者として重要な炭素は上部マントルでは二酸化炭素として存在することが多い。筆者らの緻密な解析により、二酸化炭素の包有物がマントルの情報源としていかに重要であるかが理解できる。なお、彼らの用いている「衝上型かんらん岩」は「固体貫入かんらん岩」と同意である。

小林ほか (2015) では、ハロゲンや流体包有物の基本的なことから説き起こし、マントルでのハロゲンの振舞いが解説される。ハロゲンの振舞いの鍵となるのは、日本列島のような島弧の下での海洋スラブからの流体の放出である。筆者らの、創意をこらしたマントル・ウェッジ起源物質中のハロゲンの痕跡の追跡に注目したい。

川本 (2015) では、海洋スラブからマントル・ウェッジに放出された水に富む流体の振舞いが基本から解説される。水流体がマグマ生成に果たす役割は古くから知られた重要な事実であるが、水に富む流体とメルトが一体となった超臨界流体の生成や、その島弧マグマの多様性に果たす新たな役割が解説され、島弧マグマ成因に関する筆者の

新たなモデルが示される。

高野・大河内 (2015) では、マントル中の炭素および窒素の存在状態や起源から説き起こし、マントル中の有機物とその起源について簡潔に解説する。この問題は 1990 年前後に端緒があるものの、その後も未解決の問題として残っている。海洋底の極限環境生物圏とも関連する今後も注視せねばならない領域である。

IV. おわりに

上部マントルの物質的研究では本特集号の内容では直接触れられなかった重要なテーマも多い。各論文には適切な引用文献があげられているのでさらに興味のある読者はそれらを参考にしていただきたい。マントルの岩石学に関しては今まで他の雑誌の関連した特集号 (例えば、荒井・阿部, 2005; 森下ほか, 2012) や他のレビュー論文 (例えば, Arai and Ishimaru, 2008) でそちらも参照していただきたい。上部マントルには本特集号の各論文の主要対象物であるかんらん岩のほかに、輝石に富む岩石 (パイロクシナイトやエクロガイト) やクロミタイト (クロムスピネルよりなる) が存在する。クロミタイトはかんらん岩-マグマ相互反応やマントルダイナミクスの指示者として最近脚光を浴びている (例えば、荒井, 2010, 2012)。

本特集号は、定年退職を迎えようとしていた荒井に鹿園直建前編集委員長が出版を勧めたことから実現したものである。鹿園前委員長はその後急逝されてしまい、目を通していただけないのは誠に残念である。鹿園氏には深く感謝するとともに、改めて哀悼の意を表したい。論文をお寄せいただいた著者の方々に深く感謝する。また、査読者をはじめとする方々のご協力に感謝する。道林克禎、阿部なつ江、田中明子の諸氏には特集号の編集委員としてさまざまな点でご尽力いただいた。熊木洋太編集委員長にはさまざまな支援をいただいた。道林氏には巻頭言の原稿に目を通していただいた。

文 献

荒井章司 (2010): クロミタイト—不思議なマントル構

成岩—。地学雑誌, **119**, 392-410. [Arai, S. (2010): Chromitites: An enigmatic mantle rocks type. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **119**, 392-410. (in Japanese with English abstract)]

荒井章司 (2012): ポディフォーム・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. [Arai, S. (2012): Podiform chromitites possibly recycled within the mantle. *Japanese Magazine of Mineralogical and Petrological Sciences*, **41**, 247-256. (in Japanese with English abstract)]

荒井章司・阿部なつ江 (2005): 特集号「マントル捕獲岩の地球科学: 地球深部への窓」緒言。岩石鉱物科学, **34**, 131-132. [Arai, S. and Abe, N. (2005): Special issue "Earth sciences of mantle xenoliths: A window to Earth's interior" preface. *Japanese Magazine of Mineralogical and Petrological Sciences*, **34**, 131-132. (in Japanese with English abstract)]

Arai, S. and Ishimaru, S. (2008): Insights into petrological characteristics of the lithosphere of mantle wedge beneath arcs through peridotite xenoliths: A review. *Journal of Petrology*, **49**, 665-695.

Hess, H.H. (1962): History of ocean basins. In *Petrologic Studies: A Volume to Honor A.F. Buddington* edited by Engel, A.E.J., James, H.L. and Leonard, B.F., Geological Society of America, 599-620.

平内健一・片山郁夫 (2015): 蛇紋岩の力学的性質とそのテクトニックな意義。地学雑誌, **124**, 371-396.

[Hirauchi, K. and Katayama, I. (2015): Rheological properties of serpentinite and their tectonic significance. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **124**, 371-396. (in Japanese with English abstract)]

笠原順三・鳥海光弘・河村雄行編 (2003): 地震発生と水。東京大学出版会。[Kasahara, J., Toriumi, M. and Kawamura, K. eds. (2003): *The Role of Water in Earthquake Generation*. University of Tokyo Press. (in Japanese)]

川本竜彦 (2015): マントルウェッジ流体の化学組成。地学雑誌, **124**, 473-501. [Kawamoto, T. (2015): Chemical composition of mantle wedge fluids. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **124**, 473-501. (in Japanese with English abstract)]

小林真大・角野浩史・遠山知亜紀 (2015): マントル物質のハロゲン組成にみられるスラブ起源流体の痕跡。地学雑誌, **124**, 445-471. [Kobayashi, M., Sumino, H. and Toyama, C. (2015): Traces of slab-derived fluids revealed by halogens in mantle-derived rocks. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **124**, 445-471. (in Japanese with English abstract)]

小平秀一・藤江 剛 (2015): 北西太平洋での海洋地殻・マントル構造探査—新しい知見とその意義—。地学雑誌, **124**, 321-332. [Kodaira, S. and Fujie, G. (2015): New insights from seismic images of the oceanic plate in the Northwestern Pacific. *Journal*

- of Geography (*Chigaku Zasshi*), **124**, 321-332. (in Japanese with English abstract)]
- 松影香子 (2015): 上部マントル深部における含水下での残留岩—高温高压融解実験からわかること—. 地学雑誌, **124**, 355-370. [Matsukage, K.N. (2015): Residues of hydrous peridotites in the deep Earth's upper mantle: Implications of melting experiments at high pressures and high temperatures. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **124**, 355-370. (in Japanese with English abstract)]
- 道林克禎 (2015): 最上部マントルかんらん岩の結晶方位ファブリックとP波速度構造. 地学雑誌, **124**, 397-409. [Michibayashi, K. (2015): Olivine crystallographic fabrics and their P-wave velocity structures within peridotites in the uppermost mantle. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **124**, 397-409. (in Japanese with English abstract)]
- 森下知晃 (2015): 中央海嶺下のマントル多様性を形成した古融解イベント—その検出方法と固体地球ダイナミクスにおける意義—. 地学雑誌, **124**, 333-354. [Morishita, T. (2015): Ancient melting residual peridotites producing variable source mantle beneath mid-ocean ridges: Detection and geodynamic implications. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **124**, 333-354. (in Japanese with English abstract)]
- 森下知晃・阿部なつ江・水上知行・小澤一仁・高澤栄一 (2012): 特集号「マントル起源物質解説: 知りたいこと, 読めること, 読みたいこと」緒言. 岩石鉱物科学, **41**, 171-173. [Morishita, T., Abe, N., Mizukami, T., Ozawa, K. and Takazawa, E. (2012): Special issue "Decoding the mantle-derived materials: What we want to know, what we can know, and what we will be able to know" preface. *Japanese Magazine of Mineralogical and Petrological Sciences*, **41**, 171-173. (in Japanese with English abstract)]
- 小畑正明 (2015): 超マフィックシュードタキライト—上部マントル震源過程のロゼッタストーン—. 地学雑誌, **124**, 411-427. [Obata, M. (2015): Ultramafic pseudotachylytes: A rosetta stone for seismogenic processes in the upper mantle. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **124**, 411-427. (in Japanese with English abstract)]
- Ohara, Y., Reagan, M.K., Fujikura, K., Watanabe, H., Michibayashi, K., Ishii, T., Stern, R.J., Pujana, I., Martinez, F., Girard, G., Ribeiro, J., Brounce, M., Komori, N. and Kino, M. (2012): A serpentinite-hosted ecosystem in the Southern Mariana Forearc. *PNAS*, **109**, 2831-2835.
- Ringwood, A.E. (1975): *Composition and Petrology of the Earth's Mantle*. McGraw-Hill.
- 高野淑識・大河内直彦 (2015): マントルゼノリスの炭素と窒素の起源について. 地学雑誌, **124**, 503-514. [Takano, Y. and Ohkouchi, N. (2015): Origins of carbon and nitrogen in mantle xenolith. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **124**, 503-514. (in Japanese with English abstract)]
- 山本順司・高畑幸平・島本淳司・石橋秀巳 (2015): マントル捕獲岩の流体包有物から読みとれる情報. 地学雑誌, **124**, 429-443. [Yamamoto, J., Takahata, K., Torimoto, J. and Ishibashi, H. (2015): Fluid inclusions in mantle xenoliths: A probe for the physical and chemical state of the lithospheric mantle. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **124**, 429-443. (in Japanese with English abstract)]