



海洋科学掘削によるマントル到達への挑戦
—地球最大のフロンティアに挑む—

マントルと地殻の境界 (モホ) を決めるもの

阿部 なつ江^{1,2}

**What defines the boundary between the
mantle and the crust (Moho)**

Natsue Abe

1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構研究プラットフォーム運用開発部門マントル掘削プロモーション室
2. 金沢大学大学院自然科学研究科

地殻とマントルの境「モホロビッチ不連続面(モホ面)」は、岩石種の違いや変質程度の差、または変形や破碎程度の違いなどで地震波速度が急激に変化する場所である。モホを形作る岩石とその物性について、これまでの科学掘削で得られた岩石試料や孔内計測データを元に考察する。

1. はじめに

モホロビッチ地震波不連続面は、地球内部にある層構造の境界の内、最も浅部にある明瞭な物性境界で、陸海問わず地球上のほぼ全ての地域で確認できる。1909年10月9日に起こった地震記録を解析して発見され、発見者のモホロビッチの名を取って“Mohorovicic discontinuity(モホロビッチ不連続面)”略して“Moho(モホ面)”と呼ばれている。日本語では反射面を意識してか「モホ面」と「面」を付けることが多いが、数百メートルの幅を持つ「帯」だと考えられる。モホ反射面は、確認される場合とされない場合があるし、複数重複して確認できる場合もある(Fujie et al., 2013; Ohira et al., 2017, 2018 など)。マントル掘削では、地殻からモホ面を掘り抜いたことが確認されて初めて、マントルに到達したことになる。マントル物質を手に入れる為には「モホ(面)とは何か?」という問いに対して、掘削以前にできる限りの研究を行い、仮説を建てておくのが重要であろう。

一般的な海洋モホに関する海域観測データについては、笠原ほか(2008)などに纏められているが、その後、日本海溝や中米における沈み込み手前の海洋プレート上での速度低下の状況(Fujie et al., 2013; 2018; 2020 など)や、太平洋プレート上での多様なモホ面の観測(Ohira et al., 2017; 2018 など)が進み、より詳細で多様なモホ面が確認されている。モホを構成する物質要素としては、1) 岩相境界、2) 同じ岩石種でも変質程度が異なる(蛇紋岩/かんらん岩境界-; Hess, 1962)、3) 同じ岩石種で変成度が異なる(斑れい岩/エクロジャイト境界)、4) 岩石種に寄らず破砕度や空隙率が異なるなどの要因が考えられる。後述するように、3の斑れい岩/エクロジャイト境界説以外

は、明確に否定する根拠が無く、これらの要因の組み合わせがモホ面を形成していると考えられる。モホを形づくる物質は何かという問いについては、これまでも阿部・荒井（2007）や荒井・阿部（2008）などでも繰り返し議論しているが、その後の成果を踏まえて考察する。

2. モホを構成するもの？

現在最も支持されているのが「岩相境界」、つまり玄武岩質深成岩である斑れい岩（マフィック岩）と、かんらん岩質（超マフィック岩）の境界であるという説である。モホ面よりも下の部分のP波速度（以下Vp）は、大陸か海かによらずおおよそ8.0 km/s以上である(Prodehl et al., 2013など)。Hess (1964)は、1961年に実施したモホール計画の掘削候補地点における海域調査で、最上部マントルに10%を超える強い速度異方性があることを発見し、かんらん石の結晶異方性と一致することを指摘した。Vpが8 km/s以上で上部マントルに存在しそうな物質には、かんらん石を主体とする岩石（かんらん岩）と、玄武岩質深成岩でざくろ石と輝石で構成される岩石（エクロジャイト；超マフィック岩の一種）の2種類がある。Hess (1964)以前は、この2種類のどちらが最上部マントルを構成しているのか議論に決着がついていなかった。エクロジャイトはこの強い異方性を示さないことから、最上部マントルは、かんらん石を主体とするかんらん岩であることがほぼ明らかになった。さらにRingwood and Green (1966)が実施した高圧実験では、玄武岩質深成岩である斑れい岩（斜長石と輝石）がエクロジャイトに相転移する圧力が、およそ12 kbar（地下約36 km）である事が分かった。つまり、海洋のモホ相当の圧力（約2 kbar）で、下部地殻の岩石は斑れい岩であり、その下のVp = 8.0 km/sの物質はエクロジャイトではなくかんらん岩であることが、物質科学的にも明らかになった。

3. 海洋下部地殻の多様性

前章の結論から、モホ直下はかんらん岩で構成

表1 海洋下部地殻~最上部マントルに想定される岩石種とその物性値。

広義の岩石種	狭義の岩石種	Vp (km/s)	密度(g/cm ³)
斑れい岩	斑れい岩、ノーライト	6.8	2.9
	かんらん石斑れい岩	7.5	2.95
	トロクトライト	7.8	3
かんらん岩	ダナイト	8.3	3.2
	ハルツバージャイト	8.2	3.2
	100%蛇紋岩化	5.5	2.6
	30%蛇紋岩化	7.0	3

されていることは疑いようがないだろう。ではモホ面の多様性（不鮮明、多重、極めて鮮明）はどのような要因で作られるのだろうか？異なる媒質が接しているとき、それぞれの媒質の密度とその媒質を伝わる弾性波速度の積（音響インピーダンス）の差が大きければ大きいほど、反射率は高くなり、反射面が明瞭になる。逆にその差が小さければ、反射率は低く、反射面は不鮮明になる。つまり地殻とマントルそれぞれの音響インピーダンスの差が大きければ大きいほど、モホ反射面は明瞭になる。Hess (1964)が指摘した最上部マントルの異方性の効果を差し引いても、モホ反射面には多様性があることから、反射面の多様性を作るのは、基本的に下部地殻の物性の違いによるものと考えられる。

これまでの海洋科学掘削の結果やオフィオライトの調査から、海洋の下部地殻から最上部マントルは、主に表1に示すような多種の斑れい岩とかんらん岩で構成されていると考えられている。斑れい岩の中で最もかんらん石に富むトロクトライトのVpは、最大7.8 km/sであり、ダナイトの8.3 km/sとあまり差が無い。そのためトロクトライトが地殻最下部にあると、モホ面は不鮮明になる。一方かんらん石に乏しい斑れい岩の速度は6.5 km/s程度で、ダナイトの速度との差が大きいため、モホ面は鮮明になる。実際に海域調査で観測されている下部地殻のVpも、6.0 km/sから7.5 km/sで幅があり、この差がモホの多様性を作っていると考えられる。トロクトライトでもかんらん

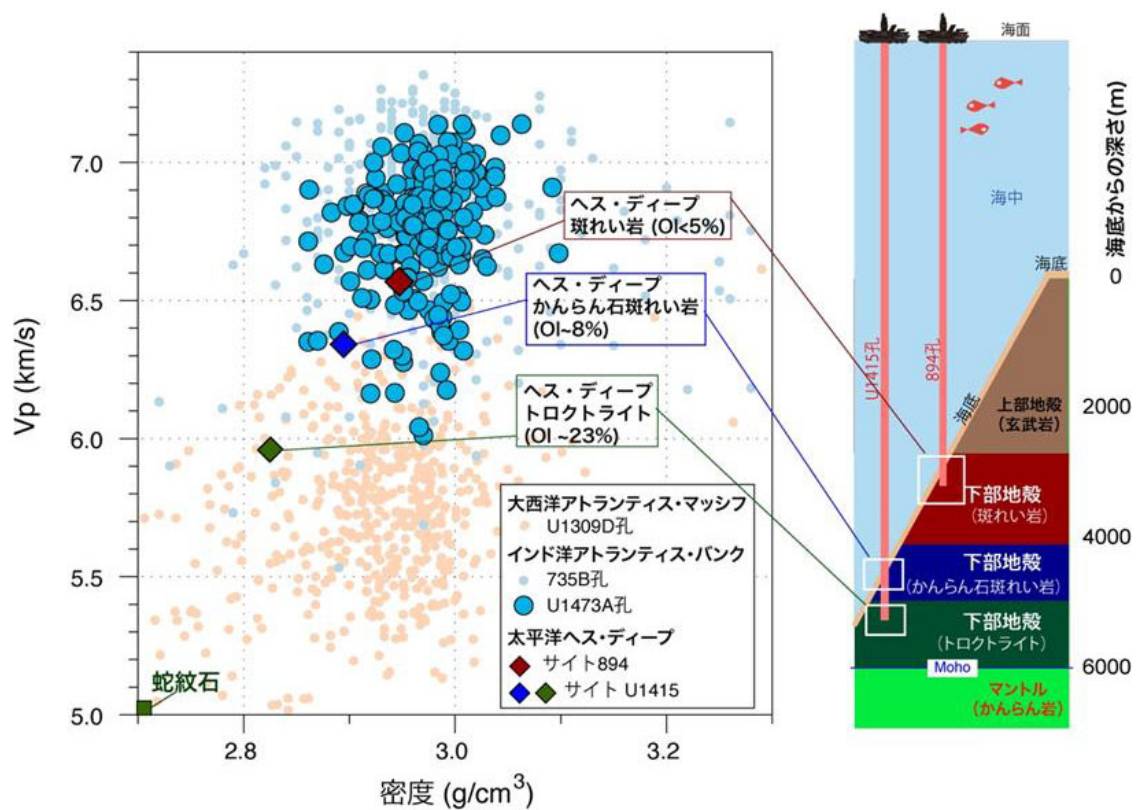


図1 ODP第118次航海, 176次航海およびIODP第360次航海によるインド洋アトランティス・バンク (735B孔とU1473A孔; 青系色) と, IODP第304および305次航海による大西洋アトランティス・マッシフ (U1309D孔; オレンジ), ODP第147次航海およびIODP第345次航海による太平洋ヘスディープからの掘削試料のVpと密度の関係と, それらが海底下で位置するおおよその場所を示した柱状図。データは, ODP Initial ReportおよびIODP Proceedings^[5,7,13,21]より引用。

石が蛇紋岩化した場合, Vpは5.5 km/s程度に低下し, モホ反射面は明瞭になることが予想される。東北日本弧に沈み込む古い太平洋プレートにおいて, モホが鮮明なのは, このような変質した下部地殻が原因である可能性がある。

4. 海洋科学掘削における成果

深海科学掘削において, 1400 mを超える深掘りは4本ある(道林, 2021)。中央海嶺の拡大速度が遅い(低速拡大系)インド洋と大西洋に1本ずつ, 拡大速度の速い(高速拡大系)太平洋で2本掘削されている。低速拡大系ではマグマ供給量に時間的な斑があり, 定常的にマグマが供給される高速

拡大系に比べて, 地殻構造が複雑であることが分かっている(Dick et al., 2015など)。低速拡大系では, マグマ供給量の少ない時期に海嶺が拡大して形成された海洋コアコンプレックスと呼ばれる岩体が形成され(Tucholke et al., 1998; Escartin and Canales, 2011), 斑れい岩や蛇紋岩化したかんらん岩などの深成岩が海底に露出していることから, 海洋地殻深部物質へのアクセスが容易である。インド洋と大西洋における深掘りの掘削孔から得られた試料は, どちらもほぼ全て斑れい岩で構成されている。一方, 太平洋の2孔は高速拡大軸で形成され, いわゆるオフィオライトと同じ“ペンローズタイプの層序(Anonymous, 1972)”を持つ。

表2 Uu1309D孔(大西洋)と735B孔(インド洋)から掘削した斑れい岩の岩石学的特徴.

	U1309D (大西洋)	735B (インド洋)
Vp (km/s)	5.8	6.7
密度 (g/cm ³)	2.95	2.98
かんらん石量 (vol %)	19.7	8
変質率(%)	27	13

そのため玄武岩層から岩脈群と掘り進めており、504B孔は岩脈群の途中まで、1256D孔ではわずかながら斑れい岩層まで掘削しているが玄武岩層と岩脈群が掘削岩相の主体であった。海洋コアコンプレックスとペンローズタイプの掘削は、どちらも未だモホ面までは到達しておらず、モホの実体解明には至っていない。しかし Blackman et al. (2019) などに示すように物性研究において、面白い結果が得られているので紹介しよう。

図1は、インド洋アトランティス・バンク(735B孔とU1473A孔)と、大西洋アトランティス・マッシュ(U1309D孔)で採取された斑れい岩の船上物性計測結果である。この2ヶ所は共に1400m以上掘削され、高いコア回収率(約80%)で、物性計測が十分実施出来た希なケースである。図1を見ると分かるように、インド洋(主に735B孔)と大西洋(U1309D孔)の試料は、密度が3.0 g/cm³程度で差が無いのに、Vpは1.0 km/s近い差があることが分かる。これは、海域の違いと言うよりは、同じ「斑れい岩類」という下部地殻を構成する岩石であっても、構成鉱物の量比に違いがあり、U1309D孔の試料方が、735B孔のものに比べてかんらん石含有量が倍近く多いこと、さらにそのかんらん石の変質程度(蛇紋石化度)にも大きな違いがあることが原因であると考えられる(表2)。一般的に、かんらん石は蛇紋石化するとき、蛇紋石と磁鉄鉱を形成する。蛇紋石の密度は低く(2.5 g/cm³) Vpが遅い(4.5 km/s)が、磁鉄鉱は密度が高い(> 4.5 g/cm³) 割にVpが遅い(6.5

km/s) ことから、密度の変化無しにVpのみが低下していると考えられる。

高速拡大プレートにおける斑れい岩掘削が行われたヘス・ディープ(ODP Leg 147とIODP Exp. 345)の成果も図1に示している。ヘス・ディープは、中央海嶺が拡大しかけて停止したために、上位にあるはずの玄武岩と岩脈群の層が欠損した状態で、下部地殻相当の斑れい岩と上部マントル相当のかんらん岩(蛇紋岩)が海底に露出している場所である。ここで得られた掘削試料は、下部地殻のなかでも深度の異なる3種類の斑れい岩が得られている。そして深度が深いほどかんらん石に富む上、海水と反応して蛇紋石化が起こっているため、Vpが遅くなっているのがハッキリと分かる(図1)。

5. オマーン・オフィオライト陸上掘削の成果

国際陸上科学掘削としてオフィオライトをターゲットに2016年12月に始まったオマーン掘削計画(ICDP Oman Drilling Project; Kelemen et al., 2021; 高澤, 2021)では、オフィオライトの上部地殻、下部地殻、モホ遷移帯、上部マントルの各セクションとオフィオライト基底において300~400mの断片的な掘削を実施し、100%の回収率でコアを採取している。この高いコア回収率のお陰で、断層帯や変質帯などのこれまでの海洋科学掘削では得られなかった著しく変質した試料や、破碎された試料の観察や物性計測が可能で、新しい知見が多く得られている。静岡県清水港に停泊中の地球深部探査船「ちきゅう」船上ラボにおいて2017年と2018年の合計4ヶ月間かけて行ったコア試料の記載、化学分析、物性計測の結果は高澤(2021)にまとめられているので、ここでは、その物性計測に関して述べたい。地殻-マントル境界(CM1)サイトでは、かつてのモホ面に相当する部分を挟む400m長の掘削を行い、モホ遷移帯を含むコア試料を採取した。図2はそのCM1サイトの岩石層序と、船上で計測した岩石物性データを示している。青色系統で示した斑れい

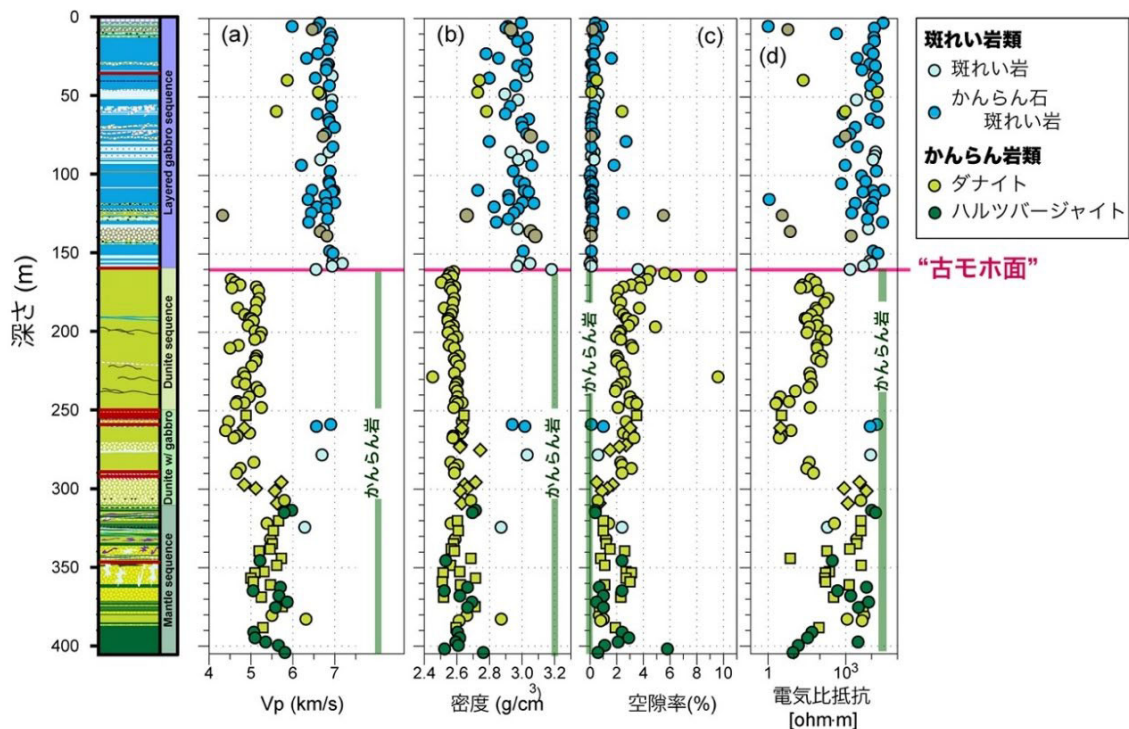


図2 ICDPオマーン掘削計画による地殻-マントル境界 (CM1) サイトからの掘削試料の岩石物性結果. 薄緑色で示した線は、かんらん岩に予想されるそれぞれの物性値. オマーン掘削で得られたマントルセクションの試料の物性値は、かんらん岩の予想値と大きく異なることがわかる.

岩類を主体とする上位 160 m と、その下の緑色系統で示したかんらん岩を主体とするモホ遷移帯およびマントル・セクションで、予想された値と大きなずれがあることが明瞭に示されている。これは、水との反応によって元々あった海洋地殻-上部マントルの岩石が変質し、物性が大きく変化してしまっていることを示している。特に顕著なのは、古モホ面の下で V_p が大きく下がり、5.5 km/s よりも遅い値を示すことである。これほどの V_p の低下は、今のところ海域観測では見つかっていない。これは主にかんらん石 ($V_p \sim 8.0$ km/s) が蛇紋石 ($V_p \sim 4.5$ km/s) 化したことによる速度の低下であると説明できる。また、Katayama et al. (2020) では、船上で、乾燥状態と薄い塩水で飽和させた状態の電気比抵抗を同一試料で測り、その値の差から透水性を計算によって求めている。そ

の結果は、モホ直下の遷移帯(ダナイト)の透水性が最も高くなることが示された。

図2に示したデータは、「ちきゅう」船上ラボにおける常温・常圧での測定値であるため、海底下 6 km 程度の深さの圧力では、もっと速い V_p が期待される。しかし Hatakeyama et al. (2021) による 200 MPa の加圧条件下の計測値でも、6.0 km/s を超えるような V_p は得られず、古モホ面を挟んだ上下の速度構造は、予想に反して逆転している結果となっている。日本海溝などの沈み込み帯手前で激しく破碎され、下部地殻～上部マントルにかけて速度が低下している海洋プレートにおいても、このような速度逆転は起こっていない (Fujie et al., 2013 など)。これらの研究結果から、オマーン・オフィオライトに見られるのような最上部マントルの著しい蛇紋岩化作用は、現在の海域(海

洋プレート)で起こっている可能性が低いことが示唆される。

6. 斑れい岩の破碎の可能性

Akamatsu et al. (2021)では、岩石の脆性変形に伴うクラック形成が、物性を容易に変化しうることに着目し、変質していない天然の斑れい岩やかんらん岩試料を用いた常温・加圧(600 MPaまで)での三軸変形実験(拘束圧20 MPa)を行い、弾性波速度を計測した。そしてかんらん岩に比べて斑れい岩の方が細かい亀裂が多く形成され、斑れい岩とかんらん岩で変形による速度の低下率が異なる事が分かった。この結果から、差応力が生じる条件において、つまり沈み込みやプレート衝突、またはプレートの移動などによって生じるプレート内での水平方向の応力差によって、下部地殻に速度低下が起こり、上部マントルとの速度および密度差が大きくなる。そしてこの差が、モホ反射面を鮮明にする可能性があることを示している。

このように、斑れい岩は、それが含むかんらん石の量や、変質(蛇紋石化)程度、変形(破碎)程度に地域差があり、弾性波速度や密度に多様性がある。この多様性が、モホ反射面の強弱を決めていると考えられる。斑れい岩のみならず、最上部マントルまで含めて、海水との反応によって蛇紋岩化するという事は、海洋プレートが水の運び役となっているに他ならない。Hatakeyama et al. (2017)の研究結果は、蛇紋岩化した海洋プレートが、日本列島などの島弧下に沈み込むときに、マントルへと水を運び込む作用が続けば、最速で6億年程度で地球上の海水が干上がることを示唆している。どの程度の水が海洋プレートに含みうるのか、さらに詳しい研究が求められる。

7. まとめ

モホは、かんらん岩質の最上部マントルと、その上にあるマフィック岩(斑れい岩)との境界であるというのが、現状での理解である。海洋地殻であるマフィック岩は、かんらん岩の部分溶融によってできるマグマから形成されることから、地

球内部から地球表層物質を作る第一次分別作用であると言える。故に岩石学者や地球化学者は、海洋モホ面の深度(つまり海洋地殻の厚さ)を元に、マントルが部分溶融によって放出するマグマ生成量を見積もっている。しかし厳密には、海域のモホ面下のダナイトの成因として、マグマ-かんらん岩(マントル)との反応生成物も存在している(小澤, 2008など)ため、モホ深度から見積もる海洋地殻の厚さをそのままマグマ生成量としてとらえることは出来ない。掘削によるモホ面付近の連続サンプリングによって、このマグマ-かんらん岩反応の詳細が明らかになれば、今よりも更に詳しく、中央海嶺における固体地球のこの一次分化作用について知ることが出来ると期待される。モホを貫通し、マントルまでの連続孔を掘削することで、地球の分化過程や水の循環についてより詳しく理解し、地球の将来像の正確な予測ができる。

謝辞: 本稿を執筆するにあたり、IODP 第345次および360次航海乗船者一同、ICDPオマーン掘削計画参加者一同に深く敬意を表します。本稿の一部に使用されている同航海および計画の試料分析データは、JSPS 科研費18H01321の助成を受けて実施されています。

参考文献

- [1]阿部なつ江・荒井章司(2007) Mission Moho : Mission Proposalへの取り組み. 月刊地球, 29, 711-715.
- [2] Akamatsu, Y. et al. (2021) Changes in elastic wave velocity during brittle deformation of gabbro and peridotite: Implications for oceanic Moho reflectivity. Earth Planet. Sci. Lett., 568, 117036. doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117036
- [3] Anonymous (1972) Penrose field conference on ophiolites. Geotimes, 17, 24-25.
- [4] 荒井章司・阿部なつ江(2008) モホの岩石学的実態を探る - 21世紀モホールを目指して -. 地学雑誌, 117, 110-123. doi.org/10.5026/jgeography.117.110
- [5] Blackman DK, et al. (2006) In: Proceedings of the IODP 304/305: College Station TX (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi.org/10.2204/iodp.proc.304305.2006
- [6] Blackman, DK, Abe, N. et al. (2019) Seismic proper-

- ties of gabbroic sections in oceanic core complexes: constraints from seafloor drilling. *Mar Geophys Res* 40, 557-569. doi.org/10.1007/s11001-019-09385-7
- [7] Dick HJB, et al. (1991) Tectonic evolution of the Atlantis II Fracture, Zone. In: Von Herzen RP, Robinson PT et al (eds) *Proceedings of the ODP scientific results vol 118*, pp 359-398, Ocean Drilling Program, College Station
- [8] Dick, HJB. et al. (2015) Southwest Indian Ridge lower crust and Moho: the nature of the lower crust and Moho at slower spreading ridges SloMo-Leg 1. *International Ocean Discovery Program Scientific Prospectus*, 360.
- [9] Escartín, J. and Canales, J. P. (2011) Chapman Conference on Detachments in Oceanic lithosphere: Deformation, Magmatism, Fluid Flow and Ecosystems (Conference report) . *EOS*, 92, doi: 10.1029/2011EO040003.
- [10] Fujie, G. et al. (2013) Systematic changes in the incoming plate structure at the Kuril trench. *Geophysical Research Letters*, 40, 8893.
- [11] Fujie, G. et al. (2018) Controlling factor of incoming plate hydration at the northwestern Pacific margin. *Nature Communications*, 9, doi:10.1038/s4146701806320z.
- [12] Fujie, G. et al. (2020) Spatial variations of incoming sediments at the northeastern Japan arc and their implications for megathrust earthquakes. *Geology*. doi:10.1130/G46757.1.
- [13] Gillis, K.M., Snow, J.E., Klaus, A., and the Expedition 345 Scientists, 2014. *Proc. IODP*, 345: College Station, TX (Integrated Ocean Drilling Program). doi:10.2204/iodp.proc.345.2014
- [14] Hatakeyama, K. et al. (2017) Mantle hydration along outer-rise faults inferred from serpentinite permeability. *Sci Rep* 7, 13870. doi.org/10.1038/s41598-017-14309-9
- [15] Hatakeyama, K. et al. (2021) Effects of alteration and cracks on the seismic velocity structure of oceanic lithosphere inferred from ultrasonic measurements of mafic and ultramafic samples collected by the Oman Drilling Project. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2021JB021923. doi.org/10.1029/2021JB021923
- [16] Hess, H. (1962) History of ocean basins. In *Petrologic Studies: A Volume in Honor of A.E. Buddington* ed. By Engel, A.E.J., James, H.L., and Leonard, B.F., Geological Society of America, Boulder, 599-620.
- [17] Hess, H. (1964) Seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans. *Nature*, 4945, 629-631. doi.org/10.1038/203629a0
- [18] 笠原順三ほか (2008) 西太平洋のマルチチャンネル地震波反射記録断面に見られるモホ反射面の特徴とモホ遷移層の性質. *地学雑誌*. 117, 5-44.
- [19] Katayama, I., Abe, N. et al. (2020) Permeability profiles across the crust-mantle sections in the Oman Drilling Project inferred from dry and wet resistivity data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2019JB018698. doi.org/10.1029/2019JB018698
- [20] Kelemen, PB et al. (2020) Scientific drilling in the Samail ophiolite, Sultanate of Oman proceedings of the Oman drilling project. *International Ocean Discovery Program Publications*. doi.org/10.14379/OmanDP.proc.2020
- [21] Mevel, C., Gillis, K., and Shipboard Scientific Party, 1993. Introduction and principal results. In Gillis, K., Mével, C, Allan, J., et al., *Proc. ODP, Init. Repts.*, 147: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 5-14. doi:10.2973/odp.proc.ir.147.101.1993
- [22] 道林克禎 (2021) 深海掘削計画における基盤岩掘削科学の貴種流離. *地学雑誌*, 130, 461-482. doi:10.5026/jgeography.130.461
- [23] Ohira, A. et al. (2017) Structural variation of the oceanic Moho in the Pacific plate revealed by active-source seismic data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 476, 111-121. doi.org/10.1016/j.epsl.2017.08.004
- [24] Ohira, A. et al. (2018) Active-source seismic survey on the northeastern Hawaiian Arch: insights into crustal structure and mantle reflectors. *Earth Planets Space* 70, 121, doi.org/10.1186/s40623-018-0891-8
- [25] 小澤一仁 (2008) 海洋モホ面形成におけるダナイトの役割. *地学雑誌*, 117, 146-167. doi.org/10.5026/jgeography.117.146
- [26] Prodehl, C. et al. (2013) 100years of seismic research on the Moho, *Tectonophysics*, In "Moho: 100 years after Andrija Mohorovicic" special issue, 609, 9-44. doi.org/10.1016/j.tecto.2013.05.036.
- [27] Ringwood, A.E. and Green, D.H. (1966) An experimental investigation of the gabbro-eclogite transformation and some geophysical implications. *Tectonophysics*, 3, 383-427.
- [28] 高澤栄一 (2021) ICDP Oman Drilling Projectの成果と今後の展望. *地学雑誌*, 130, 507-525. doi:10.5026/jgeography.130.507
- [29] Tucholke, BE. et al. (1998) Megamullions and mullion structure defining oceanic metamorphic core complexes on the Mid-Atlantic Ridge. *Journal of Geophysical Research*, 103, 98579866, doi:10.1029/98JB00167.

