

## 深海掘削計画とマンツルの直接観察

### Deep Ocean Drilling Project and *in situ* observation of the Mantle

名古屋大学

道林 克禎 (Katsuyoshi MICHIBAYASHI)

Ocean drilling project has historically been commenced by Project MoHole in 1961 drilling into mantle through the Mohorovičić discontinuity at 6km below seafloor at the same timing of the Apollo project sending human to the Moon. It has been more than 50 years since then, and it has been just 50 years since the launch of Deep Sea Drilling Project (DSDP) in 1968 after Project MoHole. A compilation of holes into the ocean crust cored by scientific ocean drilling since the beginning of DSDP to 2018 highlights that only 38 holes deeper than 100m have been cored in oceanic crust and the total recovered ocean crustal material represents < 2 % of the cores. However, despite this relative paucity of material, scientific ocean drilling has provided essential and hitherto unavailable observations for advancing our understanding of the processes that repave nearly 70% of Earth's surface over short geological time scales (<200 million years) : these include better knowledge of ocean crust architecture and the accretion in processes in the axial zone of mid-ocean ridge spreading centers. It is still our ambition to explore the deep interior of our planet by scientific drilling in ocean, the most successful, long-term international scientific collaboration in any field. The Mohole-to-Mantle (M2M) project will sample for the first time upper mantle peridotites at a fast-spreading mid-ocean ridge. This will be achieved by drilling by D/V *Chikyu* through intact fast-spread oceanic crust, and ~500m into the mantle lithosphere.

Key Words : ocean drilling project, Mohole, ocean crust, mantle drilling, Chikyu

#### 1. 緒言

2018年は「深海掘削計画」(Deep Sea Drilling Project : DSDP 1868-1983)が1968年に開始されて以来ちょうど50年の節目にあたり<sup>1)</sup>。DSDPは1983年から「海洋掘削計画」(Ocean Drilling Program : ODP 1983-2003)に引き継がれ、当初アメリカ合衆国で始まったプロジェクトが日本を含む国際共同科学プロジェクトに拡張され、

2003年から「統合海洋掘削計画」(Integrated Ocean Drilling Program : IODP 2003-2013)、2013年から「国際海洋研究計画」(International Ocean Discovery Program : IODP 2013-2023)として今も続く海底探査に関する国際共同研究である。国内では国際深海科学掘削計画と総称されるが、本論では便宜上当初の計画名に従って「深海掘削計画」と称する。

1960年代に地球科学のパラダイム変換をもた

らしたプレートテクトニクス理論の検証として、深海掘削計画初期に実施された深海底堆積物掘削が果たした役割は大きい<sup>2)</sup>。そして開始以来半世紀が過ぎた現在においても、深海掘削計画は地球内部を探索するツールとして未だに高い意義を持ち続けている。しかし、深海底堆積物で覆われた所謂「基盤岩」とよばれる海洋プレートの主成分物質である岩石（主に火成岩）の掘削は、現在においても技術的に困難であり、これまでに得られた知見は限られ今後のさらなる研究並びに掘削技術の向上を必要とされる分野である。本論では、海洋を支える海底基盤岩の掘削研究について、深海掘削計画黎明期であるモホール計画の概要とそれに続く50年間の成果の抜粋と現状、さらに今後の展望について紹介したい。これらの詳細については、別稿<sup>3)</sup>を参照されたい。

## 2. モホール計画とペンローズモデル

深海掘削計画は、アメリカ合衆国で1961年に実施されたモホール計画と呼ばれる研究プロジェクトを発端とする<sup>4)</sup>。モホール計画は、海底から海洋地殻を約6km掘削して、地震学的に観測されるモホロビッチ不連続面の下位に存在するマントル層まで到達することが目的であった。それは当時のケネディ大統領が人を月に送るアポロ計画と並んで地球科学分野で立ち上げた巨大研究プロジェクトだった。また、モホール計画発案の背景として、月の石がアポロ計画によって手に入る前から、宇宙開発計画の視点から惑星としての地球の意味が考えられるようになっていた<sup>2)</sup>。

モホールは、MohoとHoleを合わせたMoHoleという造語である（ちなみに日本語でも「モホ」と「掘る」を合わせると偶然にもモホールとなる）。この計画の目標であったモホロビッチ不連続面は、クロアチアの地震学者モホロビッチ博士が1909年に発見した地震学的不連続面であり、大陸地殻では地下30~80km、海洋地殻では海底6~7kmで観測される不連続面である<sup>2)</sup>。この不連続面は全球的に観測されることから地殻とマントルの境界と見なされている。しかし、特に海洋

プレートにおいてモホロビッチ不連続面は地殻-マントル境界ではなく、マントル内の主成分物質であるカンラン岩とその変質物質である蛇紋岩の変質境界とする説も古くから支持されてきた（Fig. 1）<sup>5)</sup>。そのため、モホール計画ではモホロビッチ不連続面の物質解明も重要な課題であった。

1961年4月、第1期モホール計画としてメキシコのGuadalupe島近くのLa Jolla沖において水深3558mから掘削を開始して170mの堆積物を貫通し、その下位の火山岩（玄武岩）を13mまで掘削した。この掘削成功によって、海洋の基盤岩が玄武岩質の火山岩であることが、人類史上初めて明らかにされた。ケネディ大統領から「素晴らしい成果であり、歴史的な事件」との祝辞が届く程の地球科学史に輝く歴史的画期的出来事であった<sup>6)</sup>。しかし、モホール計画はこの偉業の後に政治的予算的理由によってこれ以降一度も掘削されることなく1966年に中止された。一方、アポロ計画は1971年に人類を月に送ることに成功している。残念ながら、モホール計画が掲げたマントルに到達する目標は未だに達成されておらず、モホロビッチ不連続面までの約6kmの距離は「月より遠い道」となった。

モホール計画は初期段階で中止されたが、1961年の最初の掘削成功は、当時の掘削技術として深海底を覆う表層物質のデータを収集する道を拓いた。これが1968年から現在まで続く深海掘削計画の始まりである。深海掘削計画の初期は主にプレートテクトニクス理論の検証として海底堆積物を掘削してその最下部の年代を決定することが主目的であった<sup>2)</sup>。

一方、陸上地質学の分野ではプレートテクトニクス理論の確立によってオフィオライトとよばれる岩体の研究が進展し、これを海洋地殻の断片とする学説が広まった。そして1972年、アメリカ合衆国で開催されたペンローズ会議において海洋地殻の模式断面が提案されたのである<sup>7)</sup>。この模式断面では、海洋地殻は下位から上位に向けて超苦鉄質岩からハンレイ岩、シート状複合岩脈、玄

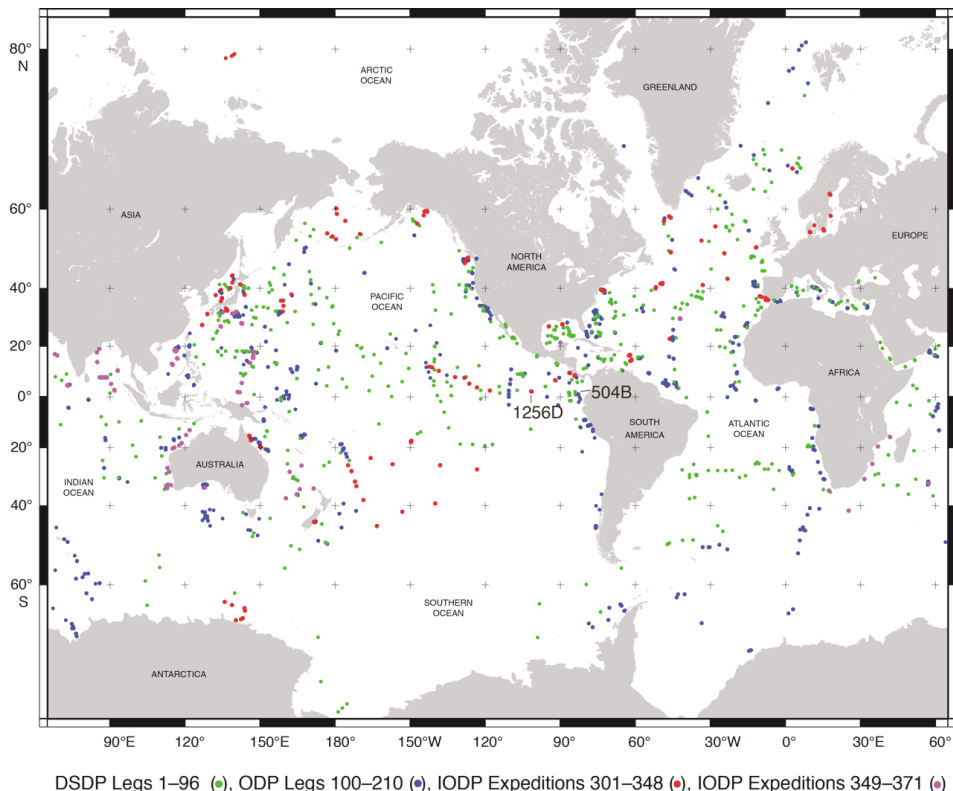


Fig. 1 The world drill site map in the 50 years since 1968<sup>1)</sup>. Two drill sites of 504B and 1256D are shown.

玄武岩質溶岩までの基盤岩に加えて玄武岩質溶岩を覆う堆積岩まで整然と重なった層構造をもつ。さらに、太平洋における海洋底の地震波速度構造をうまく説明できた。海底面の堆積物が Layer 1 (2-3 km/s)、火山岩からシート状複合岩脈が Layer 2 (3-5 km/s)、ハンレイ岩が Layer 3 (5-6 km/s)、そして、超苦鉄質岩が Layer 4 (7-8 km/s) である。このように高い整合性をもつことから現在でも海洋地殻の標準模式断面と見なされている。会議名から「ペンローズモデル」と呼ばれるこの模式断面は、深海掘削計画においても作業仮説として常に引用される重要なモデルである (Fig. 2)。

ペンローズモデル提案の翌年である 1973 年に実施された DSDP 第 34 次掘削航海では、東太平洋のナスカプレートにおいて水深 4296m の深海底から 157m 掘削されて 59m の玄武岩が採取さ

れた<sup>8)</sup>。1974 年の DSDP 第 37 次掘削航海では、大西洋中央海嶺付近において水深約 1800m の深海底から 100m 以上の掘削に成功して上部海洋地殻である玄武岩が数多く採取された<sup>9)</sup>。しかし、深海掘削計画 50 年間で世界中の海底で実施された掘削孔は 1000 以上あるが、堆積物下位の基盤岩内を 100m を越える深度まで到達した掘削孔はわずかに 38 箇所しか存在しない<sup>10)</sup>。さらに、これら 38 の掘削孔から実際に回収された岩石の割合は掘削深度総延長に対してわずか 2% 以下である。従って、深海掘削計画において基盤岩掘削では、掘削深度が長くなるに従って増加する先端部の岩圧に耐えながら掘削を進めていく技術や、円筒形に掘削した岩石を掘削船まで失わずに回収する技術など、既存の技術を越える多くの技術革新が今なお求められている。

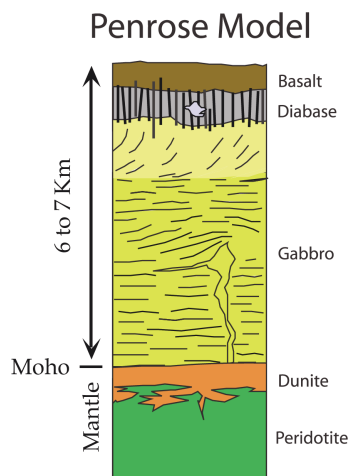


Fig. 2 The Penrose Model of crustal stratigraphy for a fast spreading ridge based on the Oman ophiolite<sup>5)</sup>.

### 3. 高速拡大軸で形成された海洋地殻の 基盤岩掘削

中央海嶺は海洋プレートを形成する場であり、そこからプレート（海底）が両側に広がるので拡大軸と呼ばれる。さらに、中央海嶺における両側拡大速度から6cm/年以上の高速拡大軸と6cm/年以下の低速拡大軸に分類される<sup>11)</sup>。高速拡大軸は東太平洋海膨、低速拡大軸は大西洋中央海嶺や南西インド洋海嶺などがある。このうち、中央海嶺全体における高速拡大軸の割合は約20%である。ところが、高速拡大軸で形成した海洋地殻が海洋を覆う割合は全体の約50%である<sup>10)</sup>。また、高速拡大軸で形成された海洋地殻は、拡大軸直下のマントル湧昇による火成作用が活発なことからペンローズモデルに近い海洋地殻断面をもつことが期待される。このように高速拡大軸の海洋地殻断面を解明する研究は、モホール計画から現在まで続く深海掘削計画にとっても重要な課題の一つとなっている。

深海掘削計画の基盤岩掘削における最長到達深度は、太平洋東側の赤道に近い南米大陸から北西に位置するDSDP第504B掘削孔である。水深3470mの深海底から2111mまで掘削され、その

うち基盤岩掘削としては1836.5mである<sup>10)</sup>。この掘削孔は1979年にDSDP第69次掘削航海によって掘削が開始されてから17年間、1996年のODP第148次掘削航海まで計7回掘削された<sup>12)</sup>。結果として第504B掘削孔ではペンローズモデルで提案された通り274.5mの堆積物、571.5mの火山岩、571.5mの火山岩—岩脈遷移層、1050mのシート状複合岩脈を掘削した。さらなる深掘りが期待されたものの、最終的に掘削ドリルが孔内に詰まって掘削不可能になった<sup>12)</sup>。

海洋地殻をできるだけ深く掘り下げようとする試みは水深3635mのODP第1256D掘削孔で続けられている。この掘削孔では、2002年の最初の掘削から2011年まで計4回の掘削航海が実施され、海底下1521mの地震波速度構造のLayer 2とLayer 3の境界付近まで到達し、シート状岩脈下部に部分的に貫入したハンレイ岩を回収することに成功した<sup>13)</sup>。ハンレイ岩は中央海嶺下のマグマだまりの固結した岩石とみなされており、このマグマだまりまでの深度は拡大速度が速くなると浅くなると予想された。まさに第1256D掘削孔では海底下1407mでハンレイ岩が回収され、理論的に推定された深度とほぼ調和的であった（Fig. 3）。これによってペンローズモデルにおける海洋地殻上部の模式断面が検証されたのであるが、実際のシート状岩脈とハンレイ岩の境界深度は拡大速度によって変化することも明らかになった<sup>13)</sup>。

このように高速拡大軸で形成される海洋地殻上部の岩石構造については第504B掘削孔と第1256D掘削孔の研究成果によって理解を深めた一方、海洋地殻下部の岩石構造については2012年12月から2013年2月に実施されたIODP第345次掘削航海によってHess Deepとよばれる海底の亀裂に露出する海洋地殻下部物質を水深4674mから4850mの深海底から掘削した<sup>14)</sup>。この掘削航海で回収されたのは、ペンローズモデルのシート状岩脈から約2km下位に位置するハンレイ岩類である。ところが、このハンレイ岩類の一部にペンローズモデルの根拠とされた陸上のオフィオラ

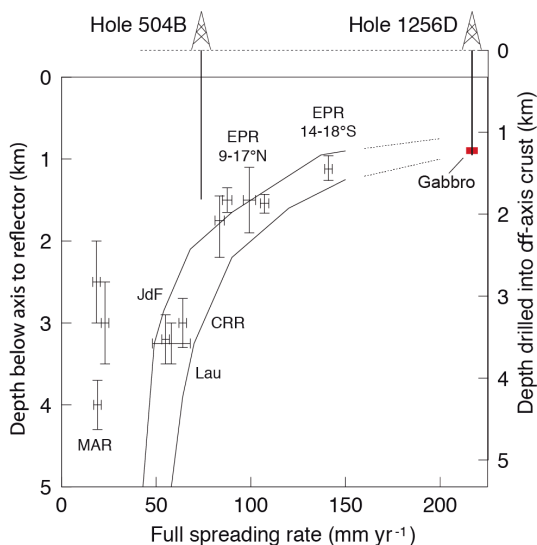


Fig. 3 Depth to axial low-velocity zone plotted against spreading rate<sup>13)</sup>. EPR: East Pacific Rise, JdF: Juan de Fuca Ridge, Lau: Valu Fa Ridge in Lau Basin, CRR: Costa Rica Rift, MAR: Mid-Atlantic Ridge. Two model lines for depth versus spreading rate predictions are shown along with penetration to date in Holes 504B and 1256D.

イト岩体のハンレイ岩にほとんど確認されない鉱物を含む岩石が確認され、海洋地殻とオフィオライト岩体に明確な相違点が見つかっている<sup>14)</sup>。ただし、Hess Deepのハンレイ岩は海底の亀裂に露出した岩石なので、ペンローズモデルのように海洋地殻上部から続く下部地殻を構成するハンレイ岩類と同じ成因をもつとは限らない。いずれにしても高速拡大軸で形成される海洋地殻下部の岩石と構造については、現時点でも未解決な問題として残されている。

#### 4. 深海掘削計画とマンツルの直接観察

深海掘削計画の究極の目標は、高速拡大軸で形成された海洋地殻を貫通して、海底下6kmのモホ面とその下位のマンツルに到達することである。それは1960年代のモホール計画で最初に立案された「月より遠い道」である。実際のところ、海は深く暗く水面から3000m以上掘削パイプをつ

なげて実施せざるを得ない深海基盤岩掘削は順調とは言い難い。水深3000m以上の海底から岩圧の高い基盤岩を掘削していく技術は容易ではない。特に、断層面を掘削貫通する場合に掘削孔が不安定になって掘削の持続が不可能になることはよくある顛末である。第504B掘削孔のように2km以上深掘りした後で掘削不可能になる場合までである。海底に一箇所マンツルまで掘削すれば海洋地殻の全てがわかる訳ではない。

しかし、海底から約6000mのマンツルまで一箇所でも掘削できれば、その技術は新たな理工学分野を拓くに違いない。一箇所でもマンツルまで到達できれば、これまで断片的間接的であった海洋地殻の物質化学モデルが大きく真に変わっていくに違いない。100年以上前に発見された地殻とマンツルの境界とみなされているモホロビッチ不連続面がどのような物理境界であるのか一箇所でも明らかになれば、我々の地球観は変わっていくに違いない。

2012年4月1日に深海掘削計画にMohole-to-Mantle (M2Mと略す)という掘削提案書が申請された<sup>15)</sup>。この掘削提案書は、2005年に竣工した地球深部探査船ちきゅうによるマンツルまで掘削するための準備書と位置づけられている。M2Mでは、高速拡大軸で形成された海洋地殻を貫通してモホロビッチ不連続面とその下位のマンツル物質を回収する現代版モホール計画である。

M2Mは、太平洋の三箇所を掘削候補地点としており、それぞれ中米沖(水深3400–3650m)、メキシコ沖(水深4000–4500m)、ハワイ沖(水深4050–4500m)である(Fig. 4)。この三箇所のうち、ハワイ沖については2017年に事前調査が実施された<sup>16)</sup>。1961年の第一期モホール計画と同様に、M2Mにおいてもハワイ沖で掘削が検討され始めたばかりであり、目指すのは10年後である。60年前との決定的な相違は、マンツルまで掘削する能力をもつ地球深部探査船ちきゅうがすでに存在することである。60年前は掘削船建造の段階で挫折したが、M2Mにはちきゅうがある。

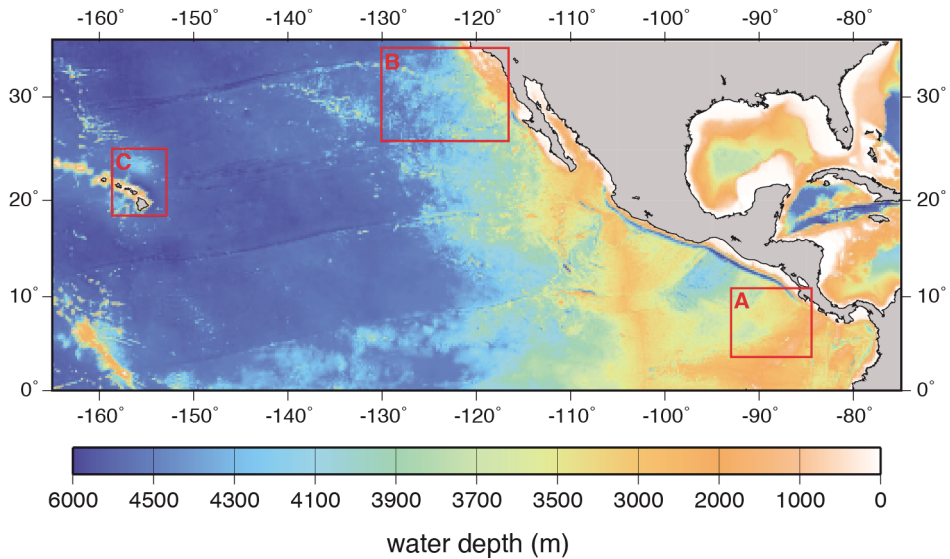


Fig. 4 Bathymetric map showing the three selected areas for large-scale MoHole site survey<sup>15)</sup>. A : Cocos plate region, B : off Southern/Baja California region, C : NE Hawaiian Arch region.

## 5. 結 言

深海掘削計画は、50年を過ぎても地球の進化を探求し続ける数少ない国際共同研究である。1974年に北大西洋中央海嶺で実施されたDSDP第37次掘削航海では、ハンレイ岩と蛇紋岩化したかんらん岩が深海掘削計画史上初めて回収された。これを発端として、大西洋などの低速拡大軸の海底からわずかに掘削して回収された岩石の種類は玄武岩からハンレイ岩、蛇紋岩化したかんらん岩まで含まれており、ペンローズモデルでは説明できない多様性が存在することも深海掘削計画で得られた重要な成果である。ところが、このような岩石の多様性に対して、海洋底のモホロピッチ不連続面の深度は海洋に関係なく6~7kmである。この観測事実は、モホロピッチ不連続面の物理境界としての多様性を示唆する。この不連続面は惑星地球の地殻とマンツルの境界とされており、その物質的物理的多様性は、惑星地球の表層の複雑性であり地球深部の不均質性の表れでもある。つまりそれは、地球のこれまでの進化過程の結果である。モホロピッチ不連続面を掘削

することは、地球史を理解するためにも重要な意味をもつのは間違いない。「月より遠い道」は、我々が歩みだすのを待っている。

## 謝辞

日本高圧技術協会ならびに海洋研究開発機構末廣潔博士には本特集号への投稿の機会をいただいた。本研究は国際深海科学掘削計画(IODP)と日本地球掘削科学コンソーシアム(J-DESC)、そして日本学術振興会基盤研究(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) International Ocean Discovery Program (<http://www.iodp.org/>)
- 2) ケネス・J・シュー著 高柳洋吉訳；地球科学に革命を起こした船 グローマー・チャレンジャー号，東海大学出版会，pp.483 (1999)。
- 3) Michibayashi, K., Tominaga, M., Ildefonse, B. and Teagle, D. A. H. ; "2.7 What Lies Beneath : The Formation and Evolution of Oceanic Lithosphere", *Oceanography*, Vol. 32, pp. 138-149

- (2019).
- 4) Bascom, W. ; “A hole in the bottom of the sea : The Story of the mohole project”, Doubleday and Company, 352 pp (1961).
  - 5) Dick, H. J. B. , Natland, J. H. and Ildefonse, B. ; “Past and future impact of deep drilling in the oceanic crust and mantle”, *Oceanography*, Vol. 19, pp. 72–80 (2006) (<https://doi.org/10.5670/oceanog.2006.06>).
  - 6) The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine ; “Project Mohole”, (2011) (<http://www.nationalacademies.org/mohole/index.html/>).
  - 7) Anonymous ; “Ophiolites”, Prepared by Participants of Penrose Field Conference, *Geotimes*, Vol. 17, pp. 24–25 (1972).
  - 8) Yeasts, R. S. , Hart, S. R. and DSDP Leg 34 Scientific Party ; “Initial Reports of the deep sea drilling project”, Vol. 34, Washington (U. S. Government Printing Office), 814 pp. (1976) (<https://doi.org/10.2973/dsdp.proc.34.1976>).
  - 9) Aumento, F., Melson, W. G. and DSDP Leg 37 Scientific Party ; “Initial Reports of the deep sea drilling project”, Vol. 37, Washington (U. S. Government Printing Office), 1008 pp. (1977) (<https://doi.org/10.2973/dsdp.proc.37.1977>).
  - 10) Ildefonse, B. et al. ; “Chapter 4, 2, 1–Formation and evolution of oceanic lithosphere : new insights on crustal structure and igneous geochemistry from ODP/IODP sites I245, U1309, and U1415”. *Developments in Marine Geology*, Vol. 7, pp. 449–505 (2014) (<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62617-2.00017-7>).
  - 11) 道林克禎 ; “固体地球の事典”, 朝倉書店, pp. 1–2 (2018).
  - 12) Alt, J. C., Kinoshita, H., Stokking, L. B. and Michael, P. J. ; “Proceeding of ODP, Scientific Results, 148”, Ocean Drilling Program, (1996) (<https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.148.1996>).
  - 13) Teagle, D. A. H. , Ildefonse, B. , Blum, P. and the Expedition 335 Scientists ; “Superfast Spreading Rate Crust 4, Proceeding of the Integrated Ocean Drilling Program”, Volume 335, the Integrated Ocean Drilling Program, (2012) (<https://doi.org/10.2204/iodp.proc.335.2012>).
  - 14) Gillis, K. M. , Snow, J. E. , et al. , “Primitive layered gabbros from fast–spreading lower oceanic crust”, *Nature*, Vol. 505, pp. 204–207, (2014) (<https://doi.org/10.1038/nature12778>).
  - 15) Umino, S. , B. Ildefonse, P. B. Kelemen, S. Kodaira, K. Michibayashi, T. Morishita, D. A. H. Teagle, and the MoHole proponents ; “805–MDP MoHole to Mantle (M2M)”, IODP Proposal, (2012).
  - 16) Ohira, A. , Kodaira, S. , et al. ; “Active–source seismic survey on the northeastern Hawaiian Arch : insights into crustal structure and mantle reflectors”. *Earth, Planets and Space*, Vol. 70, pp. 121 (2018) (<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0891-8>).