



総説

## 中央海嶺産海洋プレート深部起源岩石掘削の成果と展望

Drilling into deep-seated hard rocks of the oceanic plate formed at the Mid-Ocean Ridge: results and future perspectives: Deep-seated Hard Rock Drilling

### Abstract

Petrological and geochemical results from Integrated Ocean Drilling Program (IODP, 2003–2013) analyses of deep-seated mid-ocean ridge rocks (gabbros and peridotites) are summarized. Three important contributions to our understanding of the nature and origin of oceanic core complexes were obtained from: (1) a >1400 m gabbroic section from the Atlantis Massif of the Mid-Atlantic Ridge (site U1309, drilled by Expeditions 304/305), (2) sampling of intact oceanic gabbro after drilling through basaltic and sheeted dike complex layers from the fast-spreading Cocos Plate (leg 206 of site 1256D, drilled by Expeditions 309, 312 and, 335), and (3) sampling of layered gabbro from the Hess Deep of the East Pacific Rise (site U1415, drilled by Expedition 345). Future deep-seated hard-rock drilling projects by the research drilling vessel CHIKYU, including mantle drilling projects, are introduced.

Keywords: deep-seated hard rocks, gabbro, peridotite, ocean drilling, mid-ocean ridge, open magmatic system, hydrothermal activity

森下知晃\*

*Tomoaki Morishita\**

2016年8月10日受付.  
2016年12月13日受理.

\* 金沢大学理工研究域自然システム学系  
Faculty of Natural System, Institute of Science and Engineering, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

Corresponding author: T. Morishita,  
tomo\_make\_a\_wish@icloud.com

### はじめに

地球の表層の約80%は海洋プレートで覆われており、ほとんどの海洋プレートは中央海嶺で形成される。また、海洋プレートは海溝で沈み込み(消滅)、島弧火成活動やプレート境界型地震などを引き起こす要因となっている。海洋プレートは海嶺下での火成活動によって形成された後も、構造運動、それらに伴う海水などの浸透による変成・変質作用によって化学的・物質学的に変化する。海洋プレートの実態解明は、地球科学の最も基本的な情報の一つであるが、海の有在によって未だに現場検証が難しい研究分野でもある。

海洋プレートを構成する岩石類は、海洋プレートが陸上に露出したオフィオライト研究などによって、玄武岩質の海洋地殻と玄武岩質マグマを形成した後の溶け残りかんらん岩の上部マントル物質で構成されていると考えられてきた(Geotimes, 1972)。しかしながら、オフィオライト研究においては、その岩石群が形成されたテクトニクス場が中央海嶺以外、もしくは複数のテクトニクス場で形成されていることも知られてきた(荒井, 1995; 石渡, 2010; 森下ほか, 2010; Dilek and Furnes, 2014; Ishizuka et al., 2014)。そのため、中央海嶺産海洋プレートの実態解明に重要なことは、中央海嶺で直接形成された海洋プレート試料を採取・解析することである。科学掘削船による海洋掘削は、岩石試料が形成されたテクトニックセッティングが明瞭であることに加え、海洋底から深さ方向に連続的に採取できることなどが利点である。

海洋掘削科学計画の歴史は、1957年4月カリフォルニア La Jolla の Walter Munk 氏の自宅で開催された非公式朝食会議で、海洋地殻、そしてモホロビッチ不連続面を掘り抜き、地球のマントルから直接試料を採取するというアイデアが Walter Munk 氏から提案されたことであった(Bascom, 1961)。この未曾有の科学アイデアを真剣に海洋掘削計画として提案したのは Harry Hess であった(Hess, 1959)。そして、1961年の3月–4月に Guadalupe 島 240 km 沖の Baja California の西で行われた CUSS I による掘削航海によって、海洋底から基盤岩の試料採取し、海洋地殻表層が玄武岩でできていることを明らかにした様子が Steinbeck (1961)によって生き生きと描かれている。その後、海洋掘削計画は深海掘削計画(Deep Sea Drilling Project, DSDP)として引き継がれ、名称を変えながら国際化し(International Phase of Ocean Drilling, IPOD; Ocean Drilling Program, ODP)、多くの研究成果を上げ、地球科学の発展に貢献してきた。1968–2003年に行われた深海掘削において、玄武岩層を中心とした研究成果は海野(2003)でまとめられている。

海洋掘削計画によって100 m以上の深度まで中央海嶺で形成された海洋プレートの基盤岩を掘削した掘削孔は、最新の超低速拡大系南西インド洋海嶺アトランティス・バンク(Atlantis Bank)で行われた Expedition 360 航海(Dick et al., 2016)を含めても38掘削孔しかない(Ildefonse et al., 2014)。それでも、海洋プレートに産する中央海嶺玄武岩(Mid-Ocean Ridge Basalt: MORB)に関しては、海洋底

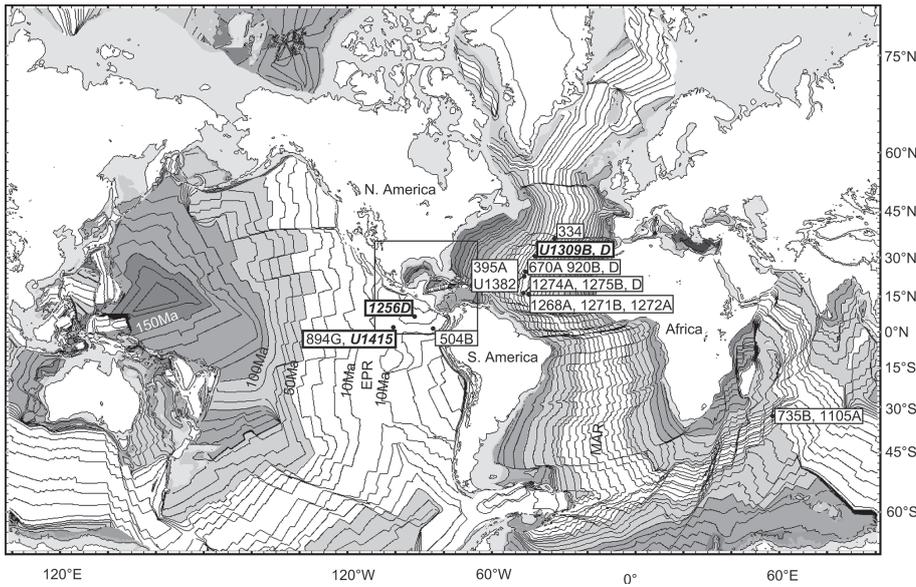


Fig. 1. Seafloor age based on Müller et al. (2008; www.earthbyte.org/) showing holes drilled to >100 mbsf (meters below seafloor) in mid-ocean ridge gabbros and peridotites by DSDP, ODP, and IODP. The age map was prepared using GeoMapApp (Ryan et al., 2009).

表面からのドレッジや潜水艦での試料採取により研究例が多い(例えば, Klein, 2003; 宮下・前田, 2003; Iwamori and Albarede, 2008; 佐藤ほか, 2008). しかしながら, 海洋プレート深部を構成する斑れい岩, かんらん岩の研究例は多いとは言えない.

海洋プレート深部を構成していると考えられる斑れい岩や蛇紋岩化したかんらん岩が海洋底から初めて掘削されたのは, 1974年のDSDP Leg 37航海による大西洋での掘削孔334である(Aumento et al., 1977) (Fig. 1). そして, 1986年のODP Leg109航海による大西洋の掘削孔670で蛇紋岩の採取が試みられた(Detrick et al., 1988) (Fig. 1). さらに大西洋のKane断裂帯南部からは, ODP Leg153航海による掘削孔920において200mの深度の蛇紋岩化したかんらん岩の掘削に成功した(Cannat et al., 1995) (Figs 1, 2). 中央海嶺系では, 大西洋の15°20'N断裂帯近傍ではODP Leg 209(掘削孔1268–1275)によりかんらん岩, 斑れい岩類が掘削されている(Kelemen et al., 2007b). また, 超低速拡大系南西インド洋海嶺のアトランティス・バンクにおいては, 掘削孔735Bで1500mを超える斑れい岩が掘削されている(Dick et al., 2000).

本論では, 海野(2003)以降の2003年–2013年の10年間の統合海洋掘削計画(Integrated Ocean Drilling Program: IODP)で行われた掘削のうち, 中央海嶺で形成された海洋プレート深部起源である斑れい岩やかんらん岩が採取された航海について, その成果の中でも, 記載岩石学的, 地球化学的内容を中心にまとめる. この10年間の主たる成果は, (1) 中~低速拡大系に特徴的に発達する海洋コアコンプレックスの一つである大西洋中央海嶺のアトランティス・マッシューフ(Atlantis Massif)で行われた深度1400mに達する掘削孔U1309Dの斑れい岩・かんらん岩試料採取(Expedition 304/305航海)による海洋コアコンプレックスの実態への貢献, (2) 高速拡大系であるココスプレートにおける掘削孔

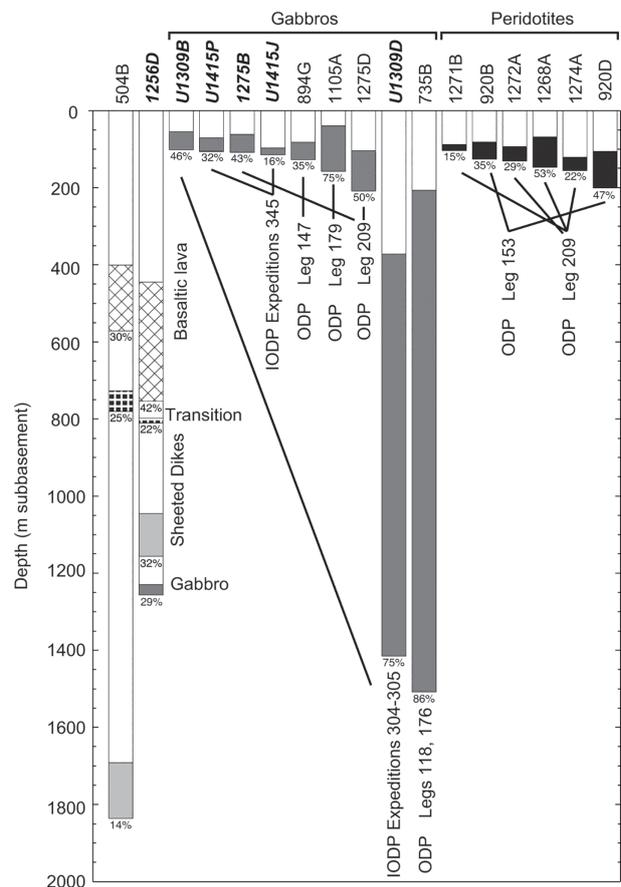


Fig. 2. Compilation chart showing all >100 mbsf holes in intact crust (excluding those holes that recovered only basalts) and tectonically exposed gabbros and serpentinized peridotites from oceanic plates formed at mid-ocean ridges. Drill-hole locations are given in Fig. 1. Each hole is labelled by hole number, and the recovery (%) for each lithology is shown. Bold italicized labels indicate holes of this study.

1256Dでの、世界で初めて玄武岩層、シート状岩脈群を貫通し、斑れい岩の採取(ODP時代のLeg 206航海も含めて、Expedition 309, 312航海)、そして(3)東太平洋海膨のヘス・ディーブ(Hess Deep)における掘削孔U1415から、層状斑れい岩の採取(Expedition 345航海)による高速拡大海嶺での下部地殻形成メカニズムへの貢献である。宮下ほか(2008)でも、これらの掘削成果について紹介されているため、重複する部分は簡単に紹介し、それ以降の成果を中心に紹介することとした。地球物理観測データ、磁化構造に関する研究成果については、筆者の力量不足で十分に解説できないため、本稿の解説に関連する場合と、掘削孔内の物理検層の重要性の紹介にとどめた。

これらの掘削以外には、大西洋で行われたExpedition 336、掘削孔U1382Aから堆積性角礫岩のクラストに蛇紋岩化したかんらん岩の存在が報告されている(Harigane et al., 2016)。海洋プレート深部物質の掘削試料は、中央海嶺で形成された海洋プレートであるというテクトニックな制約条件が明瞭なため、採取された試料の記載はデータベースとしての役割も大きい。例えば、Satsukawa et al. (2013)では、掘削孔1256D試料を含めた中央海嶺近傍で掘削された斑れい岩試料を用いて、斑れい岩の変形による斜長石の結晶定向配列の特徴を明らかにした。Grimes et al. (2007, 2009, 2011)では海洋底のジルコンの微量元素組成の特徴が、大陸地殻中のジルコンのものとは違うことを指摘している。また、海洋底の岩石に生息する微生物学的研究などは、今後も興味深いデータを供給してくれることが期待される(Mason et al., 2010)。これらの研究成果については、今後の専門家による解説を期待したい。このように、海洋底プレート深部物質の採取は、地球科学を大きく進展させている。

さらなる海洋底深部掘削には、日本が建造し所有する科学掘削船「ちきゅう」の貢献が期待される。そこで、本稿では、現在進行中である科学掘削船「ちきゅう」による岩石掘削計画と将来的な超深度掘削への展望についても簡単に紹介する。

#### 海洋コアコンプレックの実体と形成メカニズム解明への貢献：大西洋中央海嶺、アトランティス・マッシーフ (Atlantis Massif)における掘削孔U1309

##### 1. (超)低速拡大系の中での海洋底形成とアトランティス・マッシーフの関係

拡大速度の違いによって形成される海洋プレートの構造は異なることが知られている(例えば、荒井, 1995; 宮下・前田, 2003; Dick et al., 2006)。一般的には、高速拡大海嶺では、オフィオライトで観察されるペンローズ・タイプ(Anonymous, 1972)とよばれる上位から玄武岩層、シート状岩脈群、斑れい岩、かんらん岩の層状構造が想定されている。これは、中央海嶺でのマグマ生成が活発な場合の海洋プレート形成過程の端成分として、玄武岩質海洋地殻とその溶け残りかんらん岩が海洋プレート上部に形成されるとするものである。一方、超低速～低速拡大海嶺では、掘削を含めた海洋プレートからの直接試料採取および物理探査から、海洋プレ

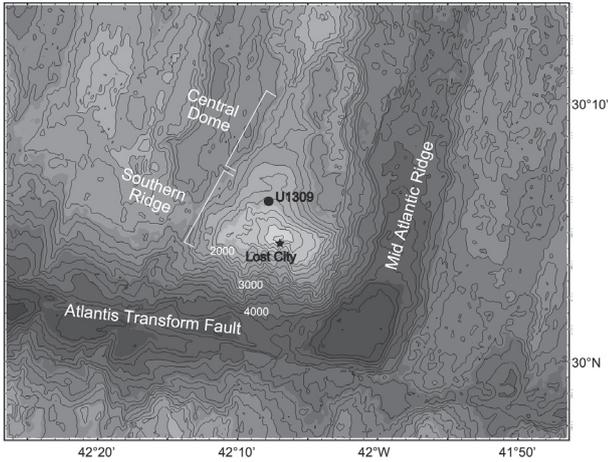
ト深部を構成していたと考えられる斑れい岩や蛇紋岩化したかんらん岩が海洋底に露出していることが明らかにされた(Cann et al., 1997; Cannat et al., 1997; Dick et al., 2003; Escartín et al., 2008; Sauter et al., 2013; Zhou and Dick, 2013; Morishita et al., 2015)。これらの斑れい岩・蛇紋岩の一部は、大規模な断層運動(デタッチメント断層)を伴い海洋コアコンプレックスと呼ばれる地形的な高まりを作って海洋底に露出している(Tucholke and Lin, 1994; Blackman et al., 1998; Tucholke et al., 1998; Escartín et al., 2008; Kumagai et al., 2008)。

海洋コアコンプレックスは、プレート形成速度が遅い超低速～低速拡大系に特徴的に産すること、構造運動を伴う拡大様式であることから“中央海嶺での火成活動が乏しい”時の玄武岩質海洋地殻が形成されない海洋底形成メカニズムの端成分であると考えられていた(Tucholke and Lin, 1994; Tucholke et al., 1998; Escartín et al., 2008)。しかしながら、主に数値計算モデルの結果から、デタッチメント断層の発達にはある程度のメルト(マグマ活動)が必要であることが指摘されている(Buck et al., 2005; Tucholke et al., 2008; Olive et al., 2010; Schouten et al., 2010)。海洋コアコンプレックスについては小原(2012)で紹介されているので参照されたい。

海洋コアコンプレックスの重要性は、海洋プレートの形成が従来のペンローズタイプの火成活動による層状構造をもつものだけでなく、多様性があることを明瞭に示したことである(Cheadle and Grimes, 2010; Escartín and Canales, 2011)。この超低速～低速拡大系で一般的に観察される海洋コアコンプレックスの成因を理解することは、海洋プレートの実態解明、海洋プレートを介した海水・大気との物質収支、沈み込み帯での元素循環を理解するうえで重要である。

アトランティス・マッシーフは30°N付近(Fig. 1)の低速拡大系大西洋中央海嶺とアトランティス・トランスフォーム断層が交差する地点に発達したドーム型の地形的高まりで(Fig. 3)、大西洋中央海嶺に産する多くの海洋コアコンプレックスの一つである。

海洋コアコンプレックスの掘削としては、超低速拡大系の南西インド洋海嶺アトランティスII断裂帯に沿ったアトランティス・バンクの1500 mを超える斑れい岩が採取された掘削孔735Bがある(Dick et al., 2000)。アトランティス・バンク周辺では、海洋掘削だけでなく、潜水艇やドレッジによる試料採取が行われており、斑れい岩だけでなく、蛇紋岩が多く採取されている(松本ほか, 2003)。掘削孔735Bの特徴は次のようにまとめられる(宮下・前田, 2003; 宮下ほか, 2008)。1)上位ほど比較的未分化な斑れい岩と分化した鉄チタン酸化物斑れい岩のバイモーダルな産出が顕著である、2)下位は比較的均質、3)結晶作用末期に変形に伴う分化メルトの流動、4)推定される全岩組成から、マントルかんらん岩と平衡なメルト組成よりも分化したメルトが関与している。アトランティス・マッシーフとの比較は宮下ほか(2008)で解説されているので参照されたい。



**Fig. 3.** Bathymetric map of the Atlantis Massif showing the locations of hole U1309 and the Lost City hydrothermal vent field. The map was prepared using GeoMapApp (Ryan et al., 2009).

## 2. アトランティス・マッシーフの概要

アトランティス・マッシーフのドーム状の地形的高まりの地形は、海嶺軸方向に 20 km 程度、海嶺軸に直行する方向に 15 km 程度の大きさで、周囲よりも 2000 m 程度高い (Fig. 3)。アトランティス・マッシーフは、北側の中央ドーム (Central Dome) と南尾根 (Southern Ridge) とよばれる高まりからなる (Fig. 3)。海洋底の地磁気データから推定されるアトランティス・マッシーフの形成年代は 0.5–2 Ma で、この時代の両側拡大速度は ~24 mm/年 と見積もられている (Pariso et al., 1996)。このドーム状構造には、コルゲーションと呼ばれる海嶺軸に対して垂直な方向に発達する皺状構造が発達していること、ドレッジによる岩石試料回収によって斑れい岩や蛇紋岩が採取されたことや、蛇紋岩起源の断層岩が発見されたことから、この地形表面はデタッチメント断層であると解釈された (Cann et al., 1997; Blackman et al., 1998, 2002; Schroeder and John, 2004; Karson et al., 2006)。また、アトランティス・マッシーフの南尾根には蛇紋岩を基盤とする熱水噴出孔があり、そこに生息する特異な生態系で有名なロスト・シティ (Lost City) サイトが南側に位置する (Kelley et al., 2001; Früh-Green et al., 2003) (Fig. 3)。重力や地震波データはアトランティス・マッシーフの地下に周囲よりも高い重力異常 (密度差に換算すると周囲よりも 200–400 kg/m<sup>3</sup> 高い) (Blackman et al., 1998; Nooner et al., 2003)、速度異常 (周囲の地殻の地震波速度が ~3–5 km/s であるのに対し、上部数 km の地震波速度が 4–6 km/s : Canales et al., 2008; Collins et al., 2010) を示していたことから、アトランティス・マッシーフの海底数 100 m 地下には、新鮮なかんらん岩が分布していると予想された。

蛇紋岩化程度の少ないかんらん岩が採取されることが期待された掘削地点 U1309 であったが、掘削孔 U1309B で約 100 m、U1309D で約 1400 m の掘削に成功したものの、

ごくわずかな溶け残りかんらん岩層 (Tamura et al., 2008; Godard et al., 2009) を除けば、基本的には斑れい岩類であった (Blackman et al., 2006) (Figs. 4, 5)。このアトランティス・マッシーフの掘削成果に加え、南西インド洋海嶺の海洋コアコンプレックスであるアトランティス・バンクや大西洋の他の海洋コアコンプレックスに相当する場所からも斑れい岩が採取されている (Dick et al., 2000, 2008; Kelemen et al., 2007b)。海洋コアコンプレックスの形成は、中央海嶺でのマグマ活動が不活発な時の海洋プレートの端正分ではなく、むしろ局所的なマグマ活動が長期的なデタッチメント断層運動に重要な役割を果たしていると考えられた (Ildefonse et al., 2007; Blackman et al., 2009) (Fig. 6)。また、海洋コアコンプレックスが地形的高まりを形成する理由も蛇紋岩中の斑れい岩の存在のためかもしれない (Ildefonse et al., 2007; Blackman et al., 2011)。実際、超低速拡大海嶺では、海洋コアコンプレックスを形成せず、なめらかな地形で長期間にわたり蛇紋岩が露出していることが報告されている (Cannat et al., 2006; Sauter et al., 2013)。

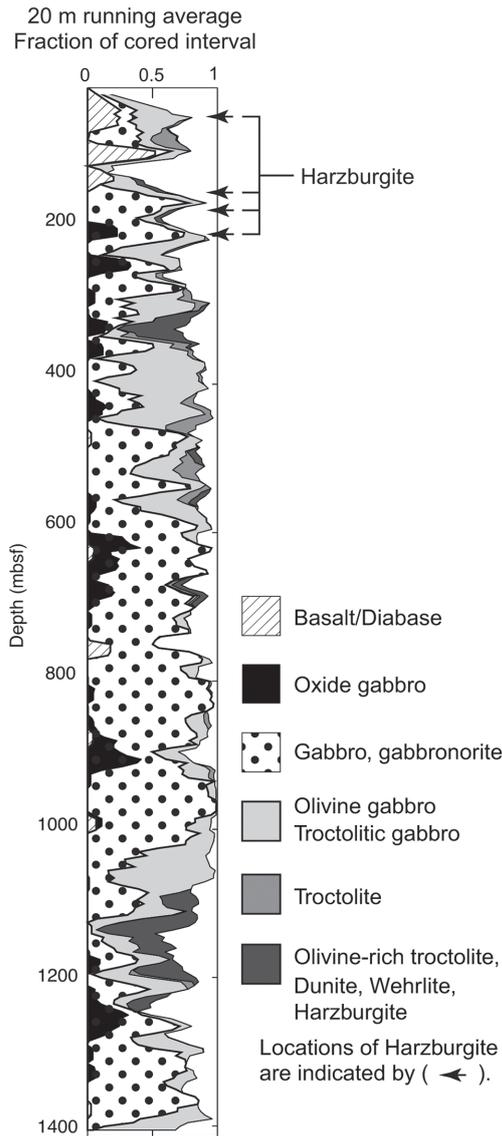
掘削孔 U1309D では、回収された試料の残留磁化構造の解析と後述する孔内検層の電気抵抗画像との比較から、世界で初めて掘削試料の残留磁化構造を明らかにし、アトランティス・マッシーフが大きく回転し、デタッチメント断層の発達初期には高角度であった断層が、時間経過とともに低角の断層へ変わっていったことが明らかにされた (Morris et al., 2009; Zhao and Tominaga, 2009)。

Blackman et al. (2008) は掘削結果を使ってアトランティス・マッシーフ近傍の地球物理観測データを再検討し、海洋コアコンプレックスの地下に斑れい岩が分布していると仮定することで、多くの観測データが説明できることを明らかにした。これらの掘削成果は物理探査データを解釈する際にいくつかの解釈可能な地下構造モデルに対し、物質からの制約条件を与えたこととなる (Canales et al., 2008; Collins et al., 2009)。

## 3. アトランティス・マッシーフ掘削試料の概要：下部地殻の形成モデルへの貢献

約 1400 m の掘削では、最上部の数 10 m を除けばコアの回収率は約 75% と高かった。掘削試料としては、ごくわずかなかんらん岩が採取されたが、基本的には斑れい岩類が主要岩石であった (Fig. 3)。ただし、掘削孔の上位 120 m 程度までには、玄武岩や粗粒玄武岩が 35–40% 程度を占めており (Fig. 4)、斑れい岩に対して明瞭な急冷縁を持つことがあることなどから、貫入岩であると解釈されている (Blackman et al., 2006)。この粗粒玄武岩の化学組成は、周囲から採取された玄武岩の化学組成とほぼ一致する (Godard et al., 2009)。

主要な岩相である斑れい岩は多様で、かんらん石に富むトロクトライト (かんらん石と斜長石が主要構成鉱物である斑れい岩)、斑れい岩、鉄チタン酸化物斑れい岩などに区分され (Fig. 5)、掘削孔 U1309D では鉱物モードや各岩相同士の境界との関係から 770 もの岩石ユニットが認定された (Blackman et al., 2006)。一般により分化している岩相が



**Fig. 4.** Lithology of the core recovered at hole U1309D. Lithological units are shown as a 20 m running average (white = no recovery, mbsf = meters below seafloor). Modified from Blackman et al. (2006).

より初生的な岩相に貫入しているが、その逆も観察される (Blackman et al, 2006; John et al., 2009). 優白質岩石が分化した鉄チタン酸化物斑れい岩などとともに入射し、これらの岩石中から分離されたジルコンが示す年代は平均  $1.20 \pm 0.03$  Ma であった (Grimes et al., 2008). ジルコン年代とそのジルコンを含む岩石の採取位置が掘削試料全体に渡って広範囲であることから、少なくともジルコンを含むような岩石を作ったメルトは特定の深度に選択的に貫入・形成したとは考えられない (Grimes et al., 2008). また、南西インド洋海嶺アトランティス・バンク掘削孔 735B 孔のような未分化な斑れい岩と分化した斑れい岩の顕著なバイモダル活動は見られない (宮下ほか, 2008).

掘削孔 U1309 で採取された斑れい岩類の鉱物モード組成、

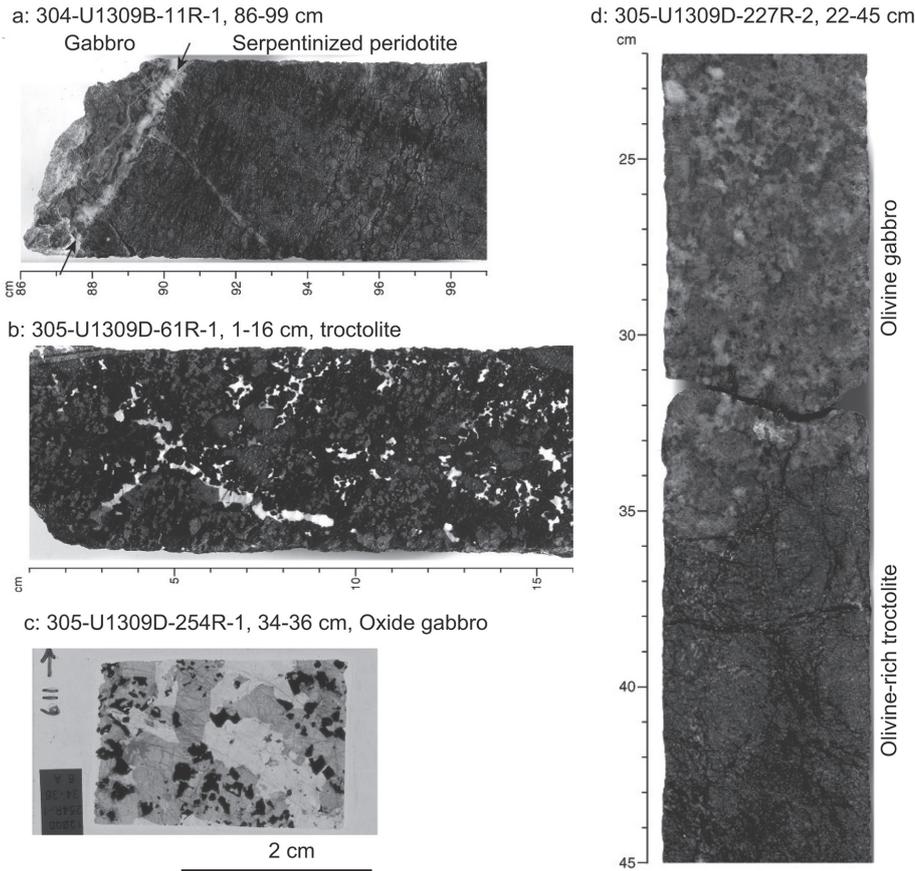
全岩化学組成は、比較的未分化な特徴を示す高い  $Mg\# (= Mg/(Mg+Fe)$  原子比) をもち微量元素成分に枯渇したかんらん石に富む斑れい岩から、非常に分化した鉄チタン酸化物斑れい岩、優白質岩石までと組成幅が広く、これまで海洋底から採取されてきた斑れい岩試料がもつ化学組成幅と同程度である (Godard et al., 2009) (Fig. 7). さらに、微量元素の特徴が近傍の中央海嶺の玄武岩のそれと類似していることから、基本的には、MORB と斑れい岩を作ったソースマントルは同じ特徴を持つと言える。掘削孔 U1309D で採取された岩石 (かんらん岩と粗粒玄武岩は除く) から、全岩化学組成は、MORB と同じ化学的特徴を持つことから、斑れい岩類が下部地殻を形成する際に、分化メルトの大規模な分離・移動が起きていないことが想定される (Godard et al., 2009). これは、海嶺軸でもトランスフォーム断層近傍 (セグメント境界) では、トランスフォーム断層から離れたセグメント中心よりも冷たいためにマグマが発生しても地下深部で固化してしまう可能性を示しているのかもしれない。

このような多様な岩相が多様な貫入関係で数 cm から数 m 規模で観察されるが、深さ方向の組成変化として斑れい岩だけに着目すると数 100 m 規模のスケールで全岩  $Mg\#$  と微量元素組成に大きな組成差を生じる深度がある (Godard et al., 2009; Blackman et al., 2011). このことは、この約 1400 m の斑れい岩層が、複数のマグマの注入によって形成されたことを示唆する (Blackman et al., 2009; Godard et al., 2009).

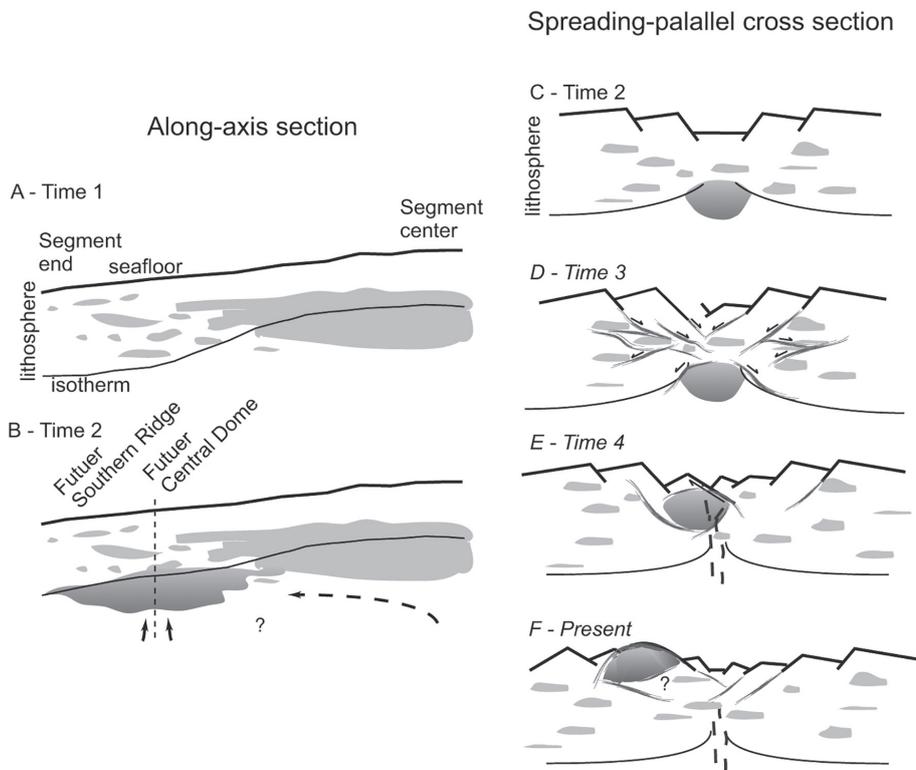
#### 4. マントルーメルト反応の証拠：かんらん岩、かんらん石に富むトロクトライト

かんらん岩試料は、掘削孔の上部 225 m 以内に産する (Blackman et al., 2006) (Fig. 4). かんらん岩は溶け残りかんらん岩で、斑れい岩質の岩脈の周囲で斜長石の形成や地球化学的な影響を強く受けている (Tamura et al., 2008, 2014; Godard et al., 2009). 少量とはいえ、溶け残りかんらん岩がはんれい岩層中に存在することは、下部地殻の主要岩石である斑れい岩を作ったメルトがかんらん岩に直接貫入した証拠である。次に紹介するような、かんらん岩-メルト反応によって形成されるはんれい岩質岩石の存在もあるため、地球科学の未解明問題であるモホロビッチ不連続面の物質学的な実態詳細解明にはかんらん岩とはんれい岩の関係に注意を払う必要があることを意味する (荒井・阿部, 2008).

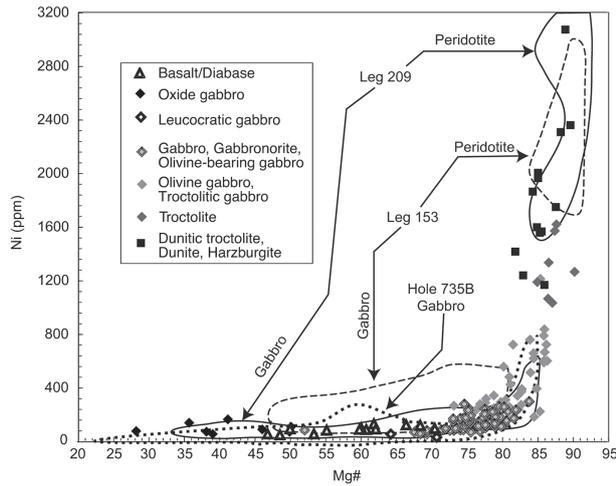
掘削孔 U1309D ではかんらん石を 70% 以上含むようなトロクトライトが採取されている (Blackman et al., 2006). U1309D のかんらん石に富むトロクトライト中の単斜輝石と化学的に平衡なメルトは MORB と類似した微量元素組成の特徴を持っているのに対し、かんらん石と化学的に平衡なメルトは MORB とは異なる微量元素組成を示している (Drouin et al., 2009). さらに、トロクトライト中のかんらん石の結晶方位解析から、トロクトライトのかんらん石はかんらん岩を構成していたかんらん石が起源となっており、それがメルトと相互作用でダナイト質岩石を形成する時に化学的・結晶方位の改変を受けたものであると解釈された (Drouin et al., 2009, 2010). 一方、Suhr et al. (2008) は、詳



**Fig. 5.** Typical examples of samples from site 1309. (a) Contact between gabbro and harzburgite. Note the thin talc-tremolite layer between the two rock types (indicated by arrows). (b) Troctolite. The white segregation veins are composed of plagioclase. (c) Oxide-rich gabbro. (d) Olivine gabbro and olivine-rich troctolite.



**Fig. 6.** Schematic diagram of the revised model for oceanic core complex formation (Ildefonse et al., 2007). (a, b) Along-axis sections; (c-f) spreading-parallel cross-sections. Location of cross-sections is indicated by a vertical dashed line in (b). For simplicity, only gabbro intrusions are shown. The white parts of the lithosphere are presumed to be composed dominantly of serpentized peridotite at a ridge segment end.

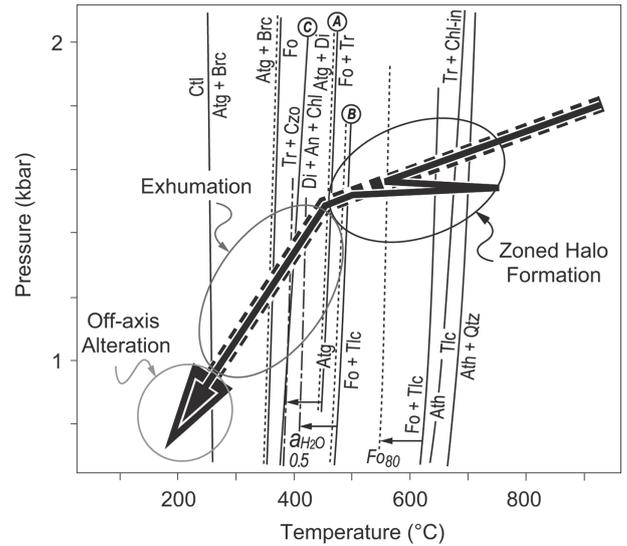


**Fig. 7.** Relationship between Ni content (wt.%) and Mg# (100 Mg/(Mg + Fe) mole ratio) for gabbros and peridotitic rocks from site U1309 (modified from Blackman et al., 2006).

細な鉱物化学組成を検討し、U1309D トロクトライトの形成にはより分化したメルトとかんらん岩との反応であると主張している。トロクトライトは掘削孔の深部から採取されており、上部からは逆にかんらん岩相が産出することから、掘削孔下部ではよりメルトの反応が進んで、反応前の岩石(かんらん岩)が残っていない可能性が高い(Godard et al., 2009)。このようなかんらん岩に富むトロクトライトは、高速拡大系のヘス・ディープ(Arai and Matsukage, 1996; Gillis et al., 2014)、低速拡大系の大西洋 14–16°N 海域 (ODP Leg 209: Kelemen et al., 2007b)、中速拡大系の中央インド洋(Nakamura et al., 2009; Sanfilippo et al., 2015, 2016)、および背弧拡大系であるフィリピン海のパレスベラ海盆などからも報告されている(Sanfilippo et al., 2013)。いずれもかんらん岩とメルトとの反応によって形成された岩石であると解釈されていることから、海洋プレートのモホ近傍を構成している岩石であるといえる。つまり、マントル起源と思われるかんらん岩が斑れい岩化(地殻化)することを意味する。

**5. 下部地殻・上部マントル起源岩石の変成・変質過程とテクトニクス**

変成鉱物・粘土鉱物とその微細組織の関係から、掘削孔 U1309 で採取された岩石類の温度圧力履歴が詳細に検討されている(Frost and Beard, 2007; Frost et al., 2008; Nozaka et al., 2008; Beard et al., 2009; Nozaka and Flyer, 2011; Tutolo et al., 2016)。また、かんらん岩に富む斑れい岩類が採取されたことで、かんらん岩の蛇紋岩化およびそれに伴う変成過程が詳細に検討され、シリカ活動度が蛇紋石化および斜長石に形成される小規模な交代岩(ロジンナイト)の形成に大きな影響を与えていることが指摘された(Frost and Beard, 2007; Frost et al., 2008; Beard et al., 2009)。Tutolo et al. (2016) では蛇紋石化をナノスケール観察し、水との反応による空隙の形成が継続的な蛇紋石化作用に重要



**Fig. 8.** Pressure–temperature path for gabbros from site U1309 of the Atlantis Massif, modified from Blackman et al. (2011) and Nozaka and Fryer (2011).

であることを指摘している。斑れい岩類は、かんらん岩の蛇紋岩形成の前に、海嶺軸近傍で角閃石相の条件下で局所的に加水の影響を受け、その後、海嶺軸から離れた場所で 200°C 以下の条件下で粘土鉱物が形成されたと解釈された(Nozaka et al., 2008; Nozaka and Flyer, 2011) (Fig. 8)。そして、かんらん岩と斑れい岩の境界には選択的にタルクが形成されること示し、タルクの形成が下部地殻物質の海洋底への露出に関与するデタッチメント断層に大きな影響を与えていることを指摘している(Nozaka and Flyer, 2011)。Niino et al. (2009) では、粗粒な単斜輝石中に熱水循環により形成されたと解釈されるより Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に乏しい 2 次的な単斜輝石と角閃石からなる細脈中に、鉄ニッケル合金を報告し、還元的な流体が存在している証拠であるとした。さらにジルコンの年代と熱履歴の解析から、掘削孔上部 800 m では 3 × 10<sup>-3</sup> °C/年、下部では 5 × 10<sup>-4</sup> °C/年の冷却速度が見積もられ、上位では海水による冷却の影響であると解釈された(Schoolmeesters et al., 2012)。ただし、上部からも 3 × 10<sup>-4</sup> °C/年の遅い冷却速度の時期があったことが指摘され、4 km 程度のデタッチメント断層深部での水循環の影響であると考えられている(Schoolmeesters et al., 2012)。

かんらん岩に着目すると掘削孔 U1309B で採取されたかんらん岩起源のタルク- Tremolite 片岩の微量元素組成パターンの特徴は Eu と Pb の正異常で、U1309D で掘削されたかんらん岩試料はこのような特徴を示さず、U や Li 含有量が高いという特徴を示す(Godard et al., 2009)。これは、タルク- Tremolite 片岩が高温で還元的な熱水循環の影響を受けたのに対し、U1309D かんらん岩が低温で酸化環境での蛇紋岩化を受けている可能性を示唆する(Godard et al., 2009)。蛇紋岩中の硫化鉱物、硫酸鉛鉱物やその同位体比からも掘削地点の深さの違いによるかんらん岩の蛇紋岩化に関連した流量、温度条件、酸素・硫黄分圧条件の違い

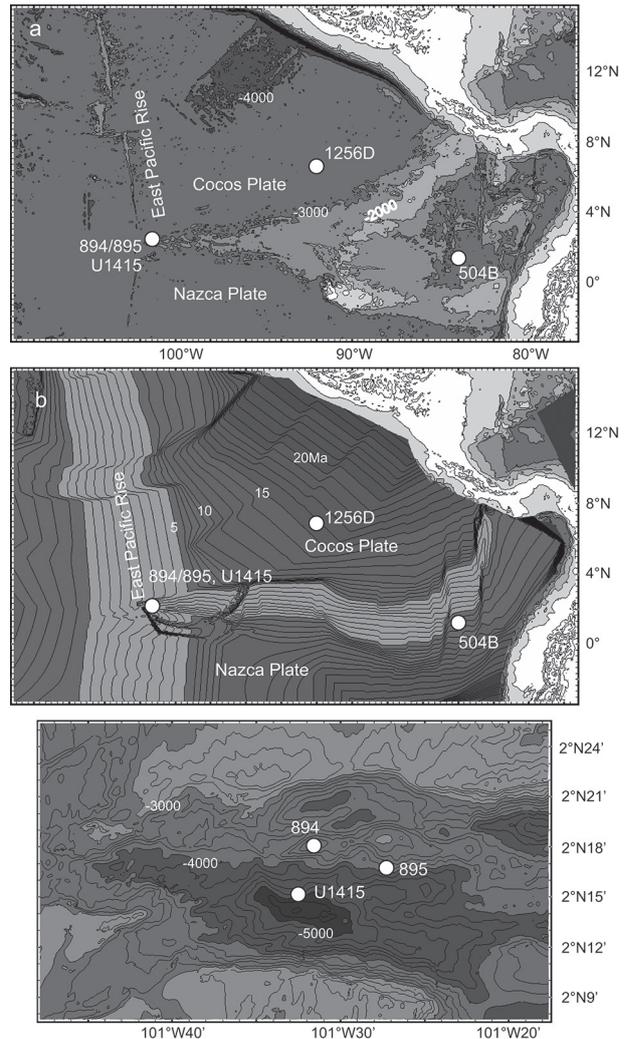
が記録されていることが明らかにされた (Delacour et al., 2008a).

U1309 かんらん岩は海水との反応を示す高い Sr 同位体比を示すのに対し、斑れい岩は MORB と同じ組成を示すことから、かんらん岩に選択的に熱水循環していることがわかる (Delacour et al., 2008b). また、掘削地点の南に位置する南尾根で採取された蛇紋岩は、Sr 同位体比だけでなく、Nd 同位体比組成も海水の影響を受けていることを示すことから、海水との化学的反応が進んでおり、通常は流体影響による化学変動の少ないと言われている希土類元素組成にも影響を与えていることが指摘されている (Delacour et al., 2008c).

Delacour et al. (2008b) は、U1309 を含めたアトランティス・マッシーフの蛇紋岩・斑れい岩類の炭素および炭質物の詳細な検討を行い、蛇紋岩を基盤とする熱水噴出孔であるロスト・シティの成果も含めて総合的に検討し、下部地殻物質や上部マントルでの海水の影響による炭素循環や、これらの物質の炭素貯蔵庫の可能性について議論している。

## 6. 検層(ロギング)と掘削試料による検証

掘削試料を用いた科学において注意しなければならないのは、掘削されなかった試料・場所の意味である。掘削試料の回収率はコアの長さに対してどのくらい試料が占められているのかを示す。掘削孔 U1309D では、回収率が 80% 程度であるが、深さ 746–751 m のところでは、回収率が 17% 低かった (Blackman et al., 2006; Michibayashi et al., 2008). 一方で、検層(ロギング)とよばれる掘削孔内の物理探査データと掘削試料の分析を総合的に検証することで、掘削孔内の状態をより詳しく把握することに成功している (Michibayashi et al., 2008; Hirose and Hayman, 2008; Pressling et al., 2012; Blackman et al., 2014). U1309D 孔では、掘削が行われてから 7 年後の検層 (Blackman et al., 2014) により、孔内の密度、電気抵抗、空隙率、および  $\gamma$  線強度などが測定された。孔内壁の電気抵抗は 2 次元的に 360° 回収することができるので、各岩相間の電気抵抗の差が大きい場合には、その 2 次元画像で示される。この電気抵抗 2 次元画像と実際に回収した試料で観察される構造と比較することで、孔内の構造の方向性を決定することもできる。この回収率が乏しかった部分からは、カタクレイサイトが採取され、その浸透率も測定され、浸透率は周囲の岩石よりも優位に高かったが、カタクレイサイトに予想される浸透率よりも高くなく、高温での含水鉱物の形成による隙間の充填効果であると解釈された。孔内の温度測定から、ちょうど断層が観察される 750 m よりも上位では熱水循環による対流による冷却が、それよりも下位では熱伝導による冷却が優勢であることが示された (Blackman et al., 2014). この結果は、岩石学的な変質・変成作用がこの深度よりも深いところでは、より局所的な部分に限定されていること (Blackman et al., 2006; Nozaka and Fryer, 2011) と調和的である。



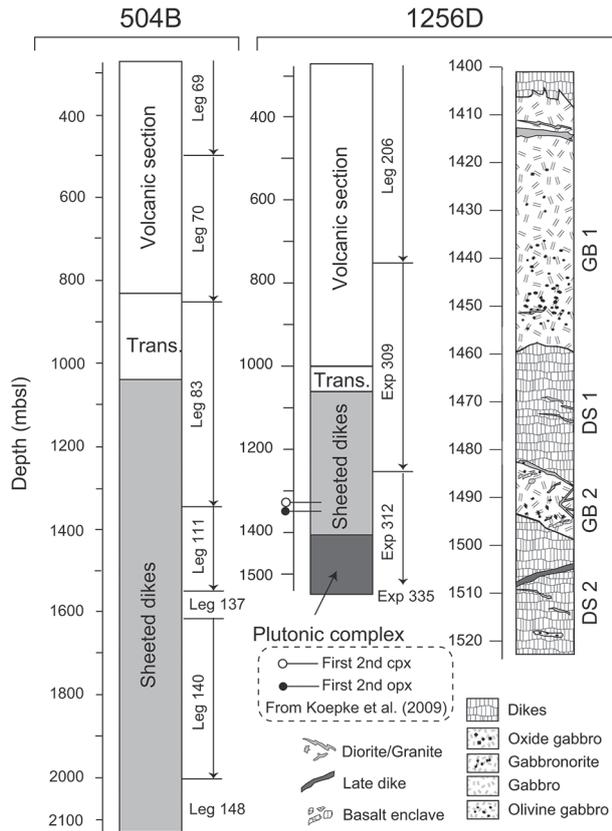
**Fig. 9.** Bathymetry (a) and ocean floor age (b) maps of the eastern equatorial Pacific Ocean. Locations of sites 1256D, 504B, and 894/895/U1415 (the same as 844/845 at this scale) are shown. (c) Bathymetry of the Hess Deep. Locations of sites 894, 895, and U1415 are shown. Bathymetry and age maps were prepared using GeoMapApp (Ryan et al., 2009). The seafloor age is based on Müller et al. (2008; www.earthbyte.org/).

## 初の海洋斑れい岩の直接採取： 高速拡大海洋プレート掘削孔 1256D

### 1. 掘削孔 1256D の概要

掘削孔 1256D は、海洋プレート基盤岩上部の玄武岩、シート状岩脈群を貫き、斑れい岩の採取に成功した世界初の掘削孔である (Wilson et al., 2006) (Figs. 1, 2, 9, 10). ただし、宮下ほか (2008) が記述しているように、採取された斑れい岩の下にも大規模な斑れい岩が分布するのか、採取された斑れい岩が海嶺軸から離れた場所での火成活動(オフリッジ火成活動)に伴う貫入岩起源であるかは、慎重に議論されるべき今後の課題である。

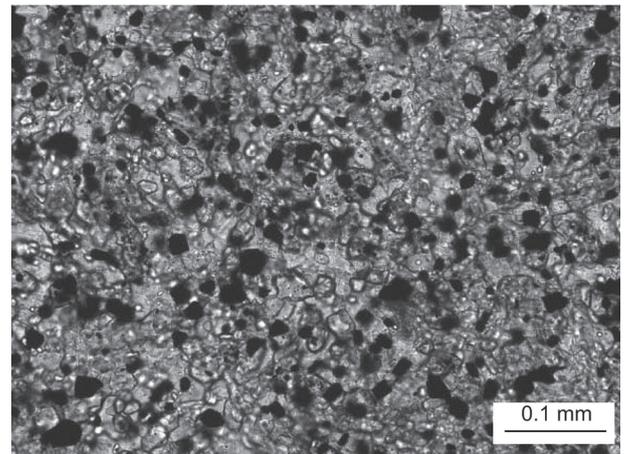
掘削孔 1256D 地点、15 Ma 頃に両側拡大速度が >200



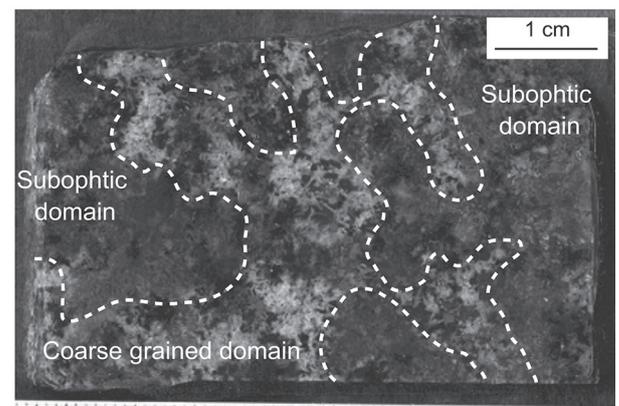
**Fig. 10.** Lithostratigraphic column of the basement at sites 504B and 1256 showing drilling leg records. Details of the plutonic section at site 1256 are also shown. Data are after Alt et al. (1996) and Teagle et al. (2012) for site 504B and site 1256, respectively. Depths at which the first secondary clinopyroxene (First 2nd cpx) and orthopyroxene (First 2nd opx) occur are indicated (after Koepke et al., 2009).

mm/年の超高速拡大時期に形成されたココスプレートの水深 3635 m に位置する (Wilson, 1996) (Fig. 9)。2002 年の ODP Leg 206 航海によって 250 m の堆積物と 502 m の基盤岩類の掘削が行われた (Wilson et al., 2003) (Figs. 10, 11)。その後、IODP の 2 回の Expedition 309, 312 航海によって 1507 m まで掘削され、斑れい岩は Expedition 312 航海時に、基盤から 1157 m、堆積物も入れた海底面からは 1407 m の地点で採取された (Teagle et al., 2006; Wilson et al., 2006) (Figs. 2, 10)。さらに、Expedition 335 航海により、掘削孔は海洋底から 1522 m まで到達した (Teagle et al., 2012) (Fig. 10)。同じ東太平洋海域での 2000 m を超える掘削孔 504B では地震学的 Layer 3 に達したが斑れい岩は採取されていない (Alt et al., 1996, Detrick et al., 1994)。掘削前は、地震学的 Layer 2/3 境界は基盤から 1200–1500 m の間に想定されていた (Wilson et al., 2003)。掘削孔の検層データや掘削試料の解析によって、掘削孔 1256D 最深部である 1522 m よりも深部に地震学的 Layer 2/3 境界相当が位置するとされている (Swift et al., 2008, Gilbert and Salisbury, 2011)。このことは、海洋上部地殻・下部地殻では、岩相の変化だけでなく、空隙率の変

a: 312-1256D-205R-1, 10-14 cm



b: 312-1256D-214R-2, 78-81 cm



**Fig. 11.** (a) Representative examples of a dike recrystallized to a granoblastic texture consisting of equant secondary plagioclase, clinopyroxene, and magnetite (Teagle et al., 2006), and (b) a gabbro from Gabbro 1 (GB1 of Fig. 10) characterized by a subophitic domain and a coarse-grained domain (Yamazaki et al., 2009).

化がより地震波速度の観測に影響を与えていることを示唆する。

掘削地点 1256 では、海嶺軸から 5–10 km 程度離れた地点での火成活動 (オフリッジ火成活動) によって形成された溶岩流が確認された (Crispini et al. 2006)。オフリッジ火成活動の重要性については宮下ほか (2008)、海野ほか (2008) でまとめられているので参照されたい。また、掘削試料の詳細な観察は、野外では見落としがちな小さなスケールまでの観察を促す。玄武岩中の微量の無色鉍物脈・領域の産状などから、マグマから岩石へと固結するときの分化メルトの形成・移動が記録されている (Panseri et al., 2010)。火山岩層は海底面下 1004 m まで続く (Teagle et al., 2006)。その後、海底面に垂直に近い方向の貫入岩が観察されるようになり、海底面下 1061 m から貫入岩が卓越するようになる (Teagle et al., 2006)。シート状岩脈群の厚さはおよそ 350 m で、中速拡大海洋プレートを掘削した掘削孔 504B ではシート状岩脈群のが暑さ 1000 m 以上あることと対照

的である(Figs. 2, 10). この厚い溶岩層と薄いシート状岩脈群という溶岩と岩脈の量比は、高速拡大海嶺での火成活動の特徴である可能性が高い(Umino et al., 2008). 拡大速度と玄武岩層、シート状岩脈群の厚さとの関係については、宮下ほか(2008)で解説されている。

掘削孔の状態により試料の回収率が様々であり、回収されなかった部分の情報をどう組み込んでいくかは、特に回収率の低い岩石掘削では難しい問題である。そこで、掘削孔の検層によって得られたデータを総合的に定量的に解析し、実際の掘削試料との比較を行うことで、回収できなかった部分も含めた掘削孔情報を得ることが進められている(Tominaga et al., 2009; Fontana et al., 2010)特に、掘削壁面の電気信号や音波を使ったFMS(formation microscanner)やUBI(ultrasonic borehole imager)と呼ばれる方法で、掘削壁の高解像度の画像を解析し、溶岩の海嶺軸からの時間経過に伴う噴出量の変化を定量的に見積もることに成功している(Tominaga and Umino, 2010)。また、掘削孔内のFMS画像からの構造解析や古地磁気の復元などから、溶岩流が流れた方向が推定されている(Fontana and Tartarotti, 2013)。

斑れい岩層の上限は、シート状岩脈群に斑れい岩や花崗岩質岩石が貫入する場所とされている(Wilson et al., 2006; Teagle et al., 2006)。シート状岩脈群の下方は、細粒緻密のホルンフェルス組織を持つ岩石が卓越し、原岩組織を失い再結晶によって細粒・緻密な斑れい岩ノーライト、原岩組織を残しながらも変成作用による単射輝石・斜方輝石が出現する岩相が観察され、これらは、グラノプラスティックダイクと呼ばれた(Fig. 11)(Wilson et al., 2006; Teagle et al., 2006; Koepke et al., 2008; 宮下ほか, 2008)。グラノプラスティックダイクは、下位にあたる斑れい岩や花崗岩質岩石の貫入による熱変成作用により形成され、その熱変成作用の影響は斑れい岩の境界から60 m以上まで達していることから、現在観察される斑れい岩のサイズ以上の熱源が必要であると考えられる(Teagle et al., 2006; Koepke et al., 2008)。グラノプラスティックダイクからは、グラニュライト相に相当する温度圧力が見積もられており、その一部は含水条件での部分熔融を受けている可能性が指摘されている(Koepke et al., 2008; 宮下ほか, 2008)。実際に掘削孔1256Dから採取された玄武岩とグラノプラスティックダイクを出発物質として用いた熔融実験によって、形成されたメルトは優白質岩石組成に、熔融実験で残渣岩石の組成は、両輝石を含むグラノプラスティックダイクと類似していることが確かめられている(Erdmann et al., 2015; Fischer et al., 2016)。これらのことから、採取された斑れい岩はシート状岩脈群に貫入するが、この下位には、中央海嶺下の上部マグマ溜まりの存在を強く示唆する(Koepke et al., 2008)。

斑れい岩相は、24mの厚さを持つグラノプラスティックダイク(Dike Screen 1)を挟んで52mの上部斑れい岩(Gabbro 1)と24mの下部斑れい岩(Gabbro 2)に分けられる(Teagle et al., 2006, 2012; Wilson et al., 2006)(Fig. 10)。Gabbro 1は斑れい岩、鉄チタン酸化物を含む斑れい

岩、および閃緑岩・花崗岩質岩石で構成されている。鉄チタン酸化物の量は下位に向かって徐々に減少し、かんらん石は下部に富む。Dike Screen 1は上部斑れい岩の上部に位置する変成作用を受けた岩脈と類似した記載岩石学的特徴を示し、石英を含む斑れい岩、花崗岩質の岩脈状岩石が観察される(Teagle et al., 2006; Wilson et al., 2006)。Gabbro 2は上位のDike Screen 1に貫入する。Gabbro 2は斑れい岩、鉄チタン酸化物を含む斑れい岩、斜方輝石を含む斑れい岩および花崗岩質岩石によって構成されている。Gabbro 2にはグラノプラスティックダイクと同様な組織を示すシート状岩脈起源の岩片が捕獲岩として取り込まれている(Wilson et al., 2006; Teagle et al., 2006; France et al., 2009; Koepke et al., 2011)。主要な構成岩石は斜方輝石を含む斑れい岩(斑れい岩ノーライト)である。Gabbro 2の下位には、Dike Screen 1と同様の記載岩石学的特徴を示すDike Screen 2と呼ばれる岩相となる。IODP Expedition 335で、Dike Screen 2と同様な岩石類が多く採取され、さらに、分化した特徴を持つメルト起源の岩石が伴うことが明らかにされた(Teagle et al., 2012)。1256D斑れい岩は、多くの場合、(1)粗粒な単斜輝石が斜長石を包有するオフィティック組織を示す斑れい岩と(2)不透明鉱物に富み粗粒結晶で特徴づけられる斑れい岩が薄片スケール(数cmスケール)で不均質にネットワーク状に産する(Teagle et al., 2006, 2012; Yamazaki et al., 2009; Koepke et al., 2011)(Fig. 11)。(1)のオフィティック組織斑れい岩はより未分化な特徴を、(2)の粗粒斑れい岩より分化した特徴を示す(Koepke et al., 2011)。掘削孔1256D斑れい岩の記載岩石学的特徴は、Varitextured gabbroとよばれるオフィオライトで観察されるメルトが固結したと解釈されている斑れい岩相(MacLeod and Yaouancq, 2000)と類似している(宮下ほか, 2008; France et al., 2009; Koepke et al., 2011)。

掘削孔1256Dでは、深さ方向の熱水変質・変成についても詳細に検討されている。鉱物組み合わせ・地質温度計、同位体比も含む化学組成、および流体包有物の検討から、階段状に浅部から深部に向けて温度が上昇し、シート状岩脈群のグラノプラスティックダイクではグラニュライト相の温度が記録され、この岩石はさらに、緑色片岩相程度の低温変成作用を受けていることが明らかにされている(Alt et al., 2010; Castelain et al., 2014; Harris et al., 2015)。この再結晶化したグラニュライト相の斜長石の拡散パターンから見積もられた冷却速度は10–30年程度で1000–1050°Cから600°Cまでの冷却(13–45°C/年)であり、この深さまで熱水循環による対流型冷却が起きたことを指示する(Zhang et al., 2014)。シート状岩脈群にはカタクレーサイト化し、硫化鉱物の濃集を伴う岩相も観察されることから、火成活動と熱水活動が同時期に起きていることを示唆する(Alt et al., 2010)。掘削孔の上部から溶岩とシート状岩脈群境界までは、海水が割れ目にそった水道で循環することによる低温変成作用が優勢的であるのに対し、それ以下の掘削孔下部では斑れい岩を形成したメルトの貫入・定置によるマグマ起源熱水による変成作用が優勢である(Alt et al., 2010; Harris et al.,

2015). シート状岩脈群では、岩脈周辺部がより高い<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 同位体比であることから、この岩脈境界が優先的な水道となっていることが示唆される(Höfig et al., 2014; Harris et al., 2015). 溶岩は基本的に海水との反応が限られているが、高い Sr 同位体比を示す部分があり、この部分は低温での海嶺軸からやや離れた領域での水道であったと考えられる。高い<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 同位体比はシート状岩脈群と斑れい岩境界にも観察される。掘削孔 504B と比較すると、掘削孔 1256D はシート状岩脈群においてより Sr 同位体比の交換が行われており、拡大速度の違いによる熱水循環の違いは元素循環に大きな影響を与える(Harris et al., 2015).

特異な変成・変質鉱物(Hydroschorlomite: Ti, Ca, Fe に富む含水アンドラダイト)の産出(Laverne et al., 2006)は、実際の海洋底からの試料であるために重要な記載情報となる。

2. 掘削孔 1256D の地球化学 1: 海洋プレート形成への貢献

溶岩の全岩化学組成は、分化トレンドを形成し、平均組成は通常の MORB よりもやや分化している(Teagle et al., 2012). シート状岩脈群の全岩化学組成も幅があり、上部の噴出岩類と同じ組成範囲である。これらの化学組成は東太平洋海嶺北部の MORB 全岩組成(Langmuir et al., 1986)とほぼ同じ傾向を示す(Fig. 12). Geldmacher et al. (2013) では、掘削孔 1256D だけでなく、ガラパゴス海嶺軸近傍の掘削によって採取された玄武岩を同位体も含めて比較し、1256D からは、現在の海嶺軸以前の融解で枯渇したマントルとガラパゴス・プリュームの成分の両方が関与していることを指摘している。1256D 玄武岩の詳細な同位体組成分析(Nd, Hf, Pb)からも、ガラパゴス・プリュームの影響を支持する結果が得られている(Höfig et al., 2014).

斑れい岩の全岩化学組成の平均値は本掘削の溶岩、シート状岩脈群、および東太平洋海嶺北部から採取された MORB の組成範囲(Langmuir et al., 1986)の MgO に富む領域にプロットされる(Fig. 12). 斑れい岩中にグラノプラスチックダイクと類似するシート状岩脈群起源の変成岩捕獲岩が観察されることから、斑れい岩の全岩化学組成にも影響を与えていることが予想される(France et al., 2009). Gabbro 1, Gabbro 2 とも全岩化学組成、鉱物化学組成の変化は、それぞれが貫入したマグマの規模で結晶分化による化学組成変化を受けていることを示す(Teagle et al., 2006, 2012; Yamazaki et al., 2009). また、斑れい岩の平均組成はマントルかんらん石と化学平衡が成り立つマグマ組成(MgO が 9–14 wt.%)よりも分化しており(Fig. 12), 斑れい岩を形成したメルトはすでに分化作用を受けた後に定置したことを示す。マスバランス計算では初生的なメルトから 30% 程度は結晶化しているだろうと考えられる(Teagle et al., 2006). Sano et al. (2011)では、高い An 成分を含む波状累帯構造を示す斜長石の捕獲結晶を岩脈から報告し、高い An 成分は、シート状岩脈群や溶岩では見られないことから、より初生的なメルトから結晶化した可能性を指摘した。このことから、メルトレンズ中のクリスタルマッシュ状の中に、より初生的なマグマが貫入したことが指摘された。

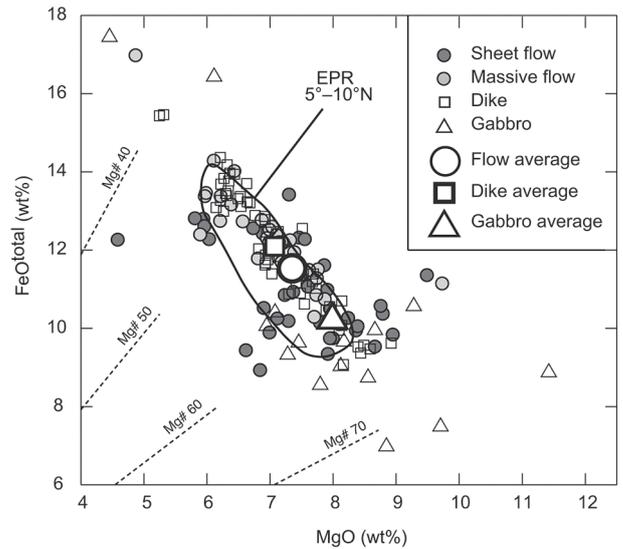


Fig. 12. Relationship between FeO<sup>total</sup> (total Fe expressed as FeO wt.%) and MgO wt.% for the basement at site 1256. The compositional range of the northern East Pacific Rise (EPR, 5°–10°N) is from Langmuir et al. (1986). Mg# = 100Mg/(Mg + Fe<sup>total</sup>) atomic ratio.

3. 掘削孔 1256D の地球化学 2: 地球化学貯蔵庫としての貢献

玄武岩溶岩から斑れい岩までを貫通した唯一の掘削孔 1256D は、海洋プレートの地球化学貯蔵庫としての役割を定量的に議論できる重要な天然試料である。

Shilobreeva et al. (2011)では炭素と水素の絶対量と同位体比から上部地殻での炭素貯蔵庫として見積もりを行った。また、試料の物性(空隙率や浸透率)を測定することで岩石容器としての炭素貯蔵庫の可能性についても定量的に議論されている(Slagle et al., 2011). Busingny et al. (2005) は 1256D の玄武岩中の窒素含有量とその起源について検討し、窒素がアンモニウムイオンとして変質鉱物に固定されていること、変質により窒素含有量が増加すること、窒素の起源は、マグマと海水起源の混合であることを明らかとした。これらの結果は、DSDP/ODP 504B 孔の成果と整合的である。Alt and Shanks (2011)では、硫黄の含有量、同位体、硫化鉱物について検討し、変質や微生物活動による硫黄の固定、含有量変化、さらに上部地殻部分の硫黄量について海洋底の堆積物中の硫黄量などと比較し、地球全体の硫黄循環への影響について議論している。彼らの見積もりでは、15 Ma 間に蓄えられた 1256D 火成岩中の硫黄量は、沈み込む海洋プレートの堆積物中の推定硫黄量に匹敵する量であることが指摘されている。硫黄の挙動とも関連するので海洋底での熱水鉱床の成因・評価は重要である。火山性塊状硫化物鉱床(Volcanogenic massive sulphide: VMS)は海洋地殻の熱水活動による元素移動・濃集によって形成される(一般的に Cu, Zn, Pb に富み, Au, As, Sb, Se, Te は、様々な程度に富む)。Alt et al. (2010)は、S, Cu などが海水と火山性流体が混合する領域に濃集していることを明らかにした。Pat-

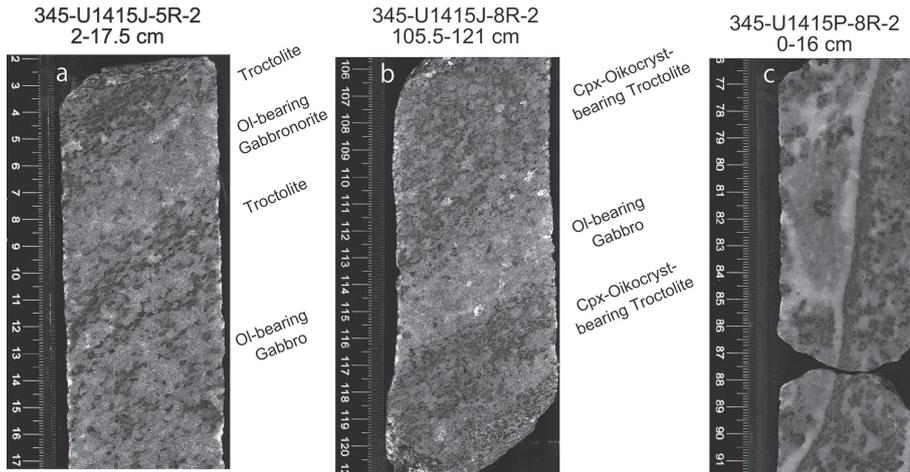


Fig. 13. Typical examples of magmatic layering and foliation in samples from site U1415. Centimeter-scale modal layering (left and middle panels) and diffuse subvertical (in the reference frame of the core) banding in orthopyroxene-bearing olivine gabbro (right panel) (modified from Gills et al., 2014).

ten et al. (2016)は金を含む As, Sb, Se, Te, S, Cu, Zn, Pb の熱水循環に伴う元素移動について詳細に検討した。

Gao et al. (2012) はリチウムと酸素同位体比, また Huang et al. (2015) は Mg 同位体比について, 深さ方向の同位体組成の幅を報告し, リチウム, 酸素同位体比は, 熱水循環条件, 岩石-水比の多様性に関連して幅広い値を持つものに対し, Mg 同位体比は比較的均質である。Mg 同位体比が均質であるということは, 軽い Mg 同位体比を示すマントルを説明するために, 軽い Mg 同位体比を持つ物質(例えば炭酸塩鉱物)の混合が必要である (Huang et al., 2015)。ホウ素濃度は, 噴出岩で高く, 塩素は深成岩セクションで高い。これらは, それぞれ低温変質と高温での熱水循環の影響を受けていると考えられる (Sano et al., 2008)。Mutter et al. (2014) は, 掘削孔 1256D 試料を使った脱水反応実験を行い, 岩石-流体間の微量元素分配を求め, 海洋プレートの沈み込みに伴う元素循環に関する議論を行なっている。貴重な天然試料であるがゆえの研究成果と言える。

#### 高速拡大系で形成された下部地殻物質： IODP 345 次航海, 掘削孔 U1415

##### 1. ヘス・ディーブの地質学的背景

海洋コアコンプレックスとして海洋プレート深部起源物質が海洋底に露出する機会の多い超低速～低速拡大海域に比べ, 高速拡大海域での海洋プレート深部起源物質の採取例は乏しい。掘削孔 U1415 が掘削されたヘス・ディーブは東太平洋海膨の高速拡大系で形成された海洋プレートが, コスーナスカ海嶺の西方伝搬 (Lonsdale, 1988) に伴って形成されたリフトによって海洋プレート深部物質の露出が期待される (Fig. 9)。実際に, ヘス・ディーブの海底調査, ODP147 次航海での掘削によって下部地殻・上部マントル起源の斑れい岩類・かんらん岩類が採取されている (Francheteau et al., 1990; Girardeau and Francheteau, 1993; Hekinian et al., 1993; Gillis, 1995; Arai and Matsukage, 1996; Dick and Natland, 1996; Coogan et al., 2002; Gillis et al., 2008; Lissenberg et al., 2013)。ヘス・ディーブから採取された斑れい岩から分離されたジルコンが

示す年代は 1.27–1.42 Ma である (Rioux et al., 2012)。ODP147 次航海を含めた含めたヘス・ディーブ試料の成果・意義については, 荒井 (1995), 宮下・前田 (2003) によって報告されているので参照されたい。

##### 2. 高速拡大海嶺下で形成された層状斑れい岩

掘削孔 U1415 では下部地殻を構成していたと考えられるはんれい岩類が採取された。採取され試料は Gillis et al. (2014) でまとめられている。主要な岩相は, かんらん石斑れい岩, トロクトライトで, 斑れい岩, 斑れい岩ノーライトも産する (Fig. 13)。粗粒な単斜輝石の主晶(オイククリスト)を含む斑れい岩類も特徴的に産する (Fig. 14)。主な初生鉱物は, かんらん石, 単斜輝石, 斜長石で, 少量の斜方輝石やクロムスピネルである。鉄チタン酸化物斑れい岩や優白色岩石などの分化したメルトから結晶化したと考えられる岩相が観察されないことから, 分化されたメルトは完全に除去されたことが想定される。

ヘス・ディーブで採取された斑れい岩類で特筆すべき点は, 海洋底から採取された斑れい岩として, 初めて層状構造がはっきりと認識されたことである (Gillis et al., 2014) (Fig. 13)。オフィオライトの斑れい岩からは, 層状斑れい岩が普遍的に観察されることが知られている (例えば, オマーンオフィオライトなど: Pallister and Hopson, 1981; Smewing, 1981; Nicolas et al., 1988)。オフィオライトの層状斑れい岩は一般的に鉱物モードの差によって認識され, 沈積構造が観察される場合もある (Pallister and Hopson, 1981)。U1415 斑れい岩試料の層状構造は, 1 cm から 10 cm 程度の規模で鉱物モードの違いによって認識される (Fig. 13)。この層状構造に平行に鉱物形状・配列による面構造が観察される。このような層状構造は, 同じ東太平洋海膨で採取された試料中からも報告されていることから (Constantin et al., 1995; Perk et al., 2007), 一般的な特徴である可能性がある。ただし, 鉱物モードと粒径の両方の違いによって認識される不均質なバンド構造も観察される (Fig. 13)。

Gillis et al. (2004) は, 相対的な海洋地殻の量を溶岩・シート状岩脈群 (全海洋地殻の  $22.5 \pm 4.5\%$ ), 上部斑れい岩 ( $32.5 \pm 7.5\%$ ) と仮定し, 掘削地点近傍で採取された海洋底

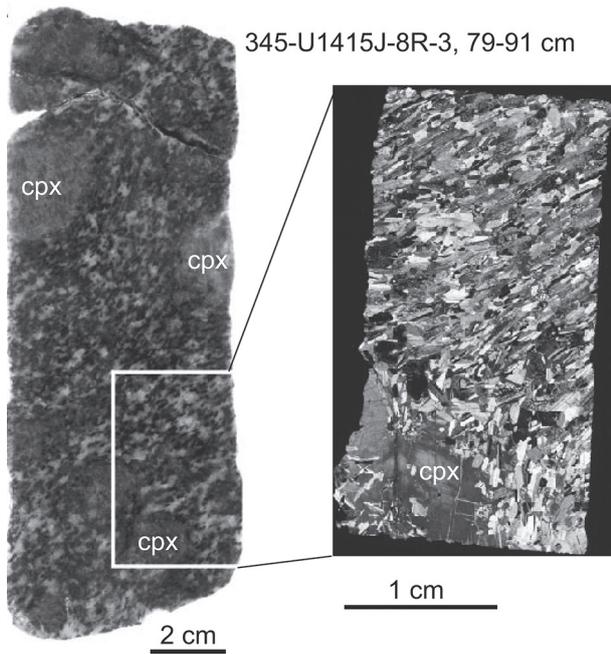


Fig. 14. Clinopyroxene oikocryst-bearing troctolite (modified from Gills et al., 2014).

試料から初生マグマの組成を推定した (Fig. 15). その結果, MgO が  $12.1 \pm 1$  wt.% で Mg# が  $74 \pm 1$  となり, 実験で形成される初生的 MORB 組成と一致する. しかしながら, 本掘削試料や同じヘス・ディープで採取されたより初生的であることを示す高い Mg# の斑れい岩には, 粗粒な斜方輝石が観察されている (Coogan et al., 2002; Gillis et al., 2014). 斜方輝石が初生的 MORB 組成メルトから初期に結晶化することはほとんどありえないため (Fig. 15), 未分化であることを示す高い Mg# の斑れい岩中の粗粒な斜方輝石の成因も含めて, 層状斑れい岩形成メカニズムの解明は今後の課題である.

3. ヘス・ディープ掘削結果における下部地殻の変成作用と冷却モデル

下部地殻形成論において未解決問題の一つに下部地殻の冷却過程があげられる. 下部地殻の冷却モデルとして, 海嶺軸近傍での海水の浸透による熱水循環を伴う対流型冷却モデルと, 熱伝導冷却モデルが提案されており, 下部地殻形成モデルにも関与する重要な問題である (Coogan, 2014 を参照).

U1415 試料の変成・変質に着目すると, 局所的に角閃岩相上部相当の変成作用を受けていることから, 沸石相から角閃岩相までの多様な熱水変質作用が不均一に起こったと考えられている (Gillis et al., 2014). 特に, トロクトライトを原岩とするシリカに不飽和で過アルミナスな岩石中に, 局所的に  $Al_2O_3$  に富む鉱物 (スピネル, コランダム, ダイアスポア) が関与する変成反応が観察される (Nozaka et al., 2016). この変成反応が示す斑れい岩の温度圧力履歴は, 上部角閃岩相の高温変質作用を受け, その後緑色片岩相以下の低温変質である (Nozaka et al., 2016). また, このような

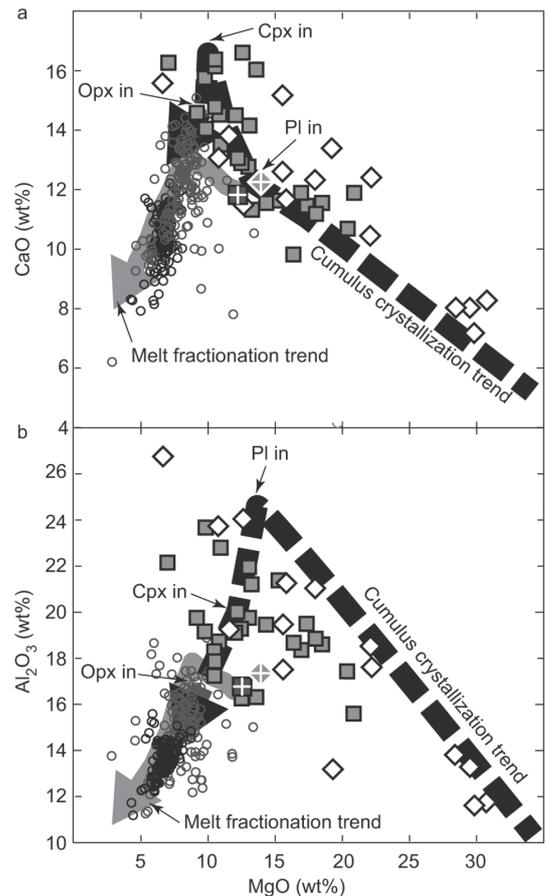
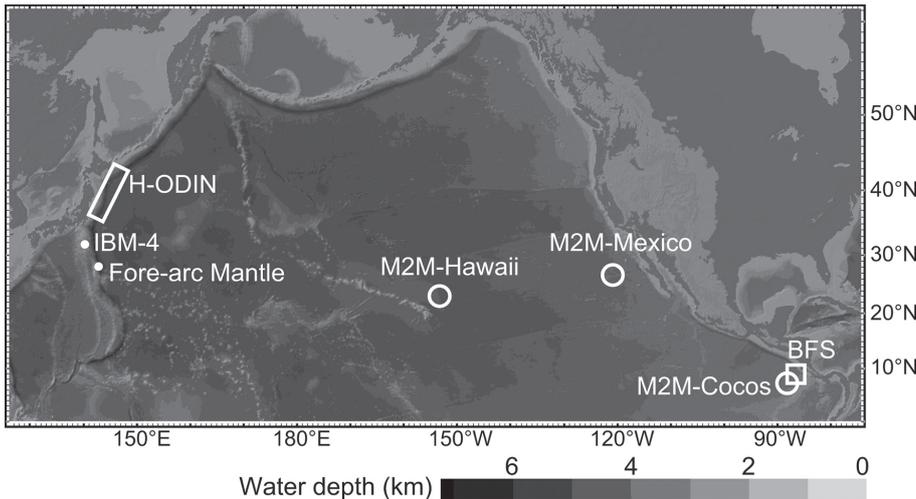


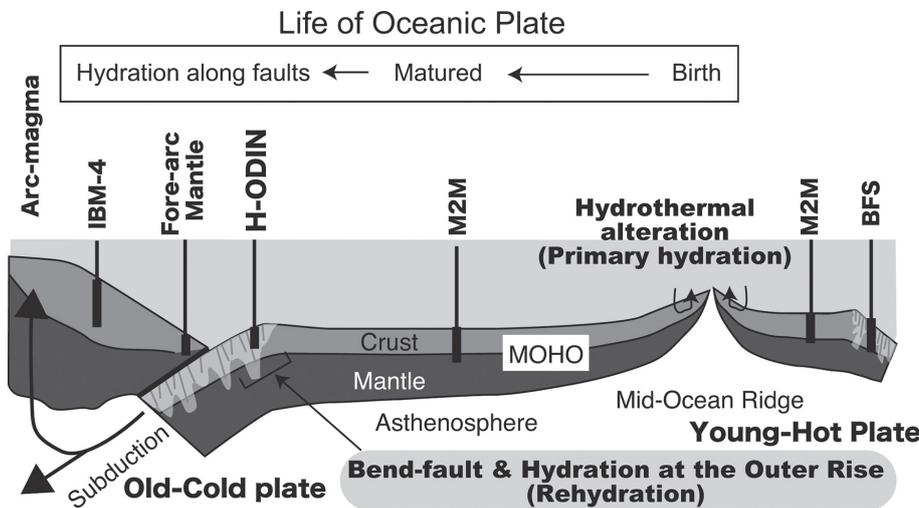
Fig. 15. Relationship between MgO wt.% and each of (a)  $Al_2O_3$  wt.% and (b) CaO wt.% for samples from the Hess Deep. Simple fractional crystallization trends for the melt (light grey solid arrow) and cumulates (dark grey dashed arrow) are also shown (Gillis et al., 2014).

鉱物組み合わせが形成されるためには, 熱水との反応によって原岩から Ca,  $SiO_2$  を取り去る必要があることから, 拡大軸近傍で高温の熱水循環が起きているとされた (Nozaka et al., 2016).

一方, Faak and Gillis (2016) はドレッジなどで採取された浅部斑れい岩と掘削孔 U1415 の深部で採取された新鮮なかんらん石斑れい岩とトロクトライト中のかんらん石-単斜輝石間の Ca 拡散, 斜長石-単斜輝石間の Mg 拡散パターンから,  $1-5 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{年}$  の冷却速度を見積もった. この冷却速度は, 下部地殻が主に熱伝導によって冷却することを支持するデータであると主張している. また, この冷却速度は, 上記で報告してきたココスプレートの掘削孔 1256D, アトランティス・マッシュの掘削孔 U1309D から見積もられた冷却速度と異なる. 拡散パターンから冷却速度を見積もるには, 正確な化学組成断面の測定, 拡散係数, 温度圧力条件, および流体の関与の有無など多くの要因が関与してくるため, 今後も注意深い検討が必要である.



**Fig. 16.** Bathymetric map of the Pacific Ocean showing the locations of potential drilling sites for four IODP CHIKYU proposals: the Moho to Mantle (M2M) drilling projects (Umino et al., 2013; open circles), bending-fault hydrology of the old incoming plate (H-ODIN; rectangle), bending-fault serpentinitization (BFS; rectangle), direct sampling of forearc peridotite (Forearc Mantle; solid circle), and the middle crust in the continent (IBM-4; solid circle). The map was prepared using GeoMapApp (Ryan et al., 2009).



**Fig. 17.** Schematic tectonic diagram showing active hard-rock CHIKYU drilling projects in the Pacific Ocean: the Pacific mantle drilling project (Moho to Mantle = M2M; Umino et al., 2013), the middle crust in the continent (IBM-4), forearc peridotite sampling (Forearc Mantle), bending-fault serpentinitization (BFS), and bending-fault hydrology of the old incoming plate (H-ODIN; Morishita et al., 2017). Primary hydration of the oceanic plate occurs by hydrothermal activity at mid-ocean ridges. Secondary hydration of the plate occurs at the outer rise region by fluid migration along bending-induced faults.

#### 中央海嶺産斑れい岩掘削試料成果のまとめ

低速拡大系大西洋アトランティス・マッシーフ、および超低速拡大系南西インド洋アトランティス・バンクではかんらん岩を伴っていることから、モホ面近傍に由来すると考えられる。アトランティス・マッシーフからは、かんらん岩とメルトの反応によって形成されたと考えられるトロクトライトが産出するが、アトランティス・バンクでは、より分化した特徴を示す。岩相の量比の違いはあるものの、いずれも小規模なマグマの貫入によって形成されたと考えられ、分化した斑れい岩を産することが特徴である。海洋コアコンプレックスは、断裂帯で区切られる海洋セグメントの端に位置するため、セグメントの位置(中央 vs 端)を考慮した火成活動の違いに関する議論が必要である。

高速拡大系であるヘス・ディーブの掘削孔 U1415 も層状構造を呈すること、トロクトライトを伴うことなどから、斑れい岩層の中でも、下位に相当すると考えられる。さらに、かんらん岩、トロクトライトを伴う掘削地点 895 はモホ面近傍に由来すると考えられる。高速拡大系では、分化した斑

れい岩の産出は多くない。かんらん岩とメルトとの反応によって形成されたと考えられるトロクトライトの記載岩石学的特徴は、拡大速度に関わらず類似しており、かんらん岩の斑れい岩化は海洋プレートのモホ近傍では普遍的な現象であると言える。ヘス・ディーブにおいては、トロクトライトの中に、粗粒な単斜輝石を含むものや斜方輝石を伴うものがあり、単純な結晶分化作用では説明できず、既存の岩石とメルトとの反応などの可能性を検討しなくてはならない。

ココスプレートの掘削孔 1256D は斑れい岩層最上位から採取されたものである。シート状岩脈群起源の岩石の変成作用や部分溶融は、オフィオライトの成果も含めると、斑れい岩層最上部の普遍的な現象である可能性が高い。また、花崗岩質メルトの成因とも関連する。しかしながら、高速拡大系では、火山岩層においてオフリッジ火成活動の影響が記録されており、下部地殻・上部マントル物質においても、オフリッジ火成活動による影響を検討していく必要がある。

#### 海洋底超深度掘削への展望

本論で解説したように、中央海嶺産海洋プレート深部物質

の直接採取によって、海洋プレートの形成から変質までの様子が詳細に解説され、その一般性・多様性が明らかとなってきた。しかしながら、海洋プレート斑れい岩層の形成においては、1990年代から複数の形成モデルが提案されてきた：1) 地殻浅部で形成された小規模マグマの流動・沈降モデル (gabbro glacier モデル：Quick and Delinger, 1993; Phipps Morgan et al., 1994), 2) 様々な深度にシルが積み重なる Sheeted Sill モデル (Kelemen et al., 1997a), 3) その中間モデル (Boudier et al., 1996; Maclennan et al., 2004). 超深度マントル掘削による斑れい岩層を貫き、マントルまでの連続試料採取と解析によって、それぞれのモデルで予想されるパラメーターを比較・検討することで明らかにすることが期待される (Perk et al., 2007; Umino et al., 2003). 海洋斑れい岩層の形成モデル問題に関しては、宮下ほか (2008) を参照されたい。

現在、マントルまでの超深度掘削が可能な科学掘削船は日本が建造し、所有する「ちきゅう」だけである。現在の IODP に申請されている海洋プレート超深度マントル掘削提案は、太平洋マントル掘削計画 (Mohole to Mantle : M2M, Umino et al., 2013) と、中米コスタリカ沖の海洋プレート沈み込み直前の屈曲断層による加水領域のマントル深度までの掘削計画 (Bending-Fault Serpentinization : BFS, 森下ほか, 2017) である (Fig. 15). 太平洋マントル掘削計画は、「一般的な」中央海嶺産海洋プレートとして、高速拡大系で形成された海洋プレート (太平洋) を地震学的に定義されるモホロビッチ不連続面を貫通し、海洋マントルから直接試料を採取する計画である (Umino et al., 2013) (Fig. 3). 太平洋マントル掘削によって達成される科学目標については、森下 (2013) で簡単に紹介されているので参考にされたい。また、海洋プレート直前屈曲断層海域 (コスタリカ沖) のマントル掘削は、物理探査から期待される蛇紋岩をマントル深度 (海洋底から 6 km 程度の深度) から採取し、海水の浸透による海洋マントルの改変を明らかにする計画である。

しかしながら、科学掘削船「ちきゅう」は、掘削経験が豊富な科学掘削船 JOIDES Resolution とは異なり、岩石試料を連続掘削した経験がない。そのため、「ちきゅう」に必要なのは、岩石連続掘削経験である。現在の IODP には「ちきゅう」を用いた岩石掘削としては、上記のマントル掘削に加え、伊豆小笠原島弧中部地殻物質掘削 (IBM-4 : Tamura et al., 2015), 伊豆小笠原前弧域に直接露出している海洋プレート沈み込み直後の島弧火成活動の影響を受け始めた時のかんらん岩の掘削 (Oceanic to Proto-Arc Mantle Transformation : Fore Arc M2M (Moho-to-Mantle) in the Bonin Trench, Northeastern Pacific), および北西太平洋沖の海洋プレート沈み込み直前の屈曲断層による加水プロセスの解明を目指す掘削 (Bend-Fault Hydrology in the Old Incoming Plate : H-ODIN, 森下ほか, 2017) が申請中である (Fig. 16). これらの掘削計画の達成される科学目標は異なるが、いずれも「ちきゅう」の性能を活かした大水深もしくは大深度掘削である。「ちきゅう」による岩石掘削を一つでも多く成功させ、科学的成果をあげるとともに、大水深+超深度

掘削で生じる技術的問題点を克服し、マントル掘削への道筋をつけたい。

## 謝 辞

金沢大学の荒井章司特任教授、海野進教授、水上知行博士、田村明弘博士、曾田祐介博士らとは海洋プレートに関して日常的に議論していただいている。新潟大学の宮下純夫フェローには、岩石写真を提供していただいた。海洋研究開発機構の田村芳彦博士には伊豆小笠原中部地殻掘削について、静岡大学の道林克禎教授には伊豆小笠原前弧マントル掘削計画について教えていただいた。東北大学の西弘嗣教授、静岡大学の道林克禎教授には本稿をまとめる機会をいただいた。石渡明氏、匿名の査読者の査読コメント、大和田正明氏の編集コメントにより本稿は大きく改善された。本研究の一部に、科学研究費補助金 (基盤研究 B・課題番号 26287134) の補助を受けた。

## 文 献

- Alt, J. C., Laverne, C., Coggon, R. M., Teagle, D. A. H., Banerjee, N. R., Morgan, S., Smith-Duque, C. E., Harris, M. and Galli, L., 2010, Subsurface structure of a submarine hydrothermal system in ocean crust formed at the East Pacific Rise, ODP/IODP Site 1256. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **11**: Q10010, doi: 10.1029/2010GC003144.
- Alt, J. C., Laverne, C., Vanko, D. A., Tartarotti, P., Teagle, D. A. H., Bach, W., Zuleger, E., Erzinger, J., Honnorez, J., Pezard, P. A., Becker, K., Salisbury, M.H. and Wilkens, R. H., 1996, Hydrothermal alteration of a section of upper oceanic crust in the eastern equatorial Pacific: a synthesis of results from Site 504 (DSDP Legs 69, 70, and 83, and ODP Legs 111, 137, 140, and 148.). In Alt, J. C., Kinoshita, H., Stokking, L. B. and Michael, P. J., eds., *Proc. ODP, Sci. Results*, **148**. College Station, TX: Ocean Drilling Program. 417-434.
- Alt, J. C. and Shanks, W. C., III, 2011, Microbial sulfate reduction and the sulfur budget for a complete section of altered oceanic basalts, IODP Hole 1256D (eastern Pacific). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **310**, 73-83.
- 荒井章司 (Arai, S.), 1995, 海洋リソスフェアとオフィオライト; 類似点と相違点 (Oceanic Lithosphere and Ophiolites; Their similarities and differences). *地学雑 (Jour. Tokyo Geogr. Soc.)*, **104**, 360-380.
- 荒井章司・阿部なつ江 (Arai, S. and Abe, N.), 2008, モホの岩石学的実体を探る—21世紀モホールを目指して— (Investigation of the Petrologic Nature of the Moho toward the Mohole). *地学雑 (Jour. Tokyo Geogr. Soc.)*, **117**, 110-123.
- Arai, S. and Matsukage, K., 1996, Petrology of the gabbro-troctolite-peridotite complex from Hess Deep, equatorial Pacific: Implications for mantle-melt interaction within the oceanic lithosphere. *Proc. ODP, Sci. Results.*, **147**, 135-155.
- Aumento, F., Melson, W. G. and DSDP Leg 37 Scientific Party, 1977, *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project (Vol. 37)*. Government Printing Office, Washington, U. S., doi: 10.2973/dsdp.proc.37.1977.
- Bascom, W., 1961, *A Hole in the Bottom of the Sea: The Story of the Mohole Project*. Doubleday, Garden City, NY, 352p.
- Beard, J. S., Frost, B. R., Fryer, P., McCaig, A., Searle, R., Ildefonse, B., Zinin, P. and Sharma, S. K., 2009, Onset and progression of serpentinization and magnetite formation in olivine-rich troctolite from IODP Hole U1309D. *Jour. Petrol.*, **50**, 387-403.
- Blackman, D. K., Canales, J. P. and Harding, A., 2009, Geo-

- physical signatures of oceanic core complexes. *Geophys. Jour. Int.*, **178**, 593–613.
- Blackman, D. K., Cann, J. R., Janssen, B. and Smith, D. K., 1998, Origin of extensional core complexes: evidence from the Mid-Atlantic Ridge at Atlantis Fracture Zone. *Jour. Geophys. Res.*, **103**, 21315–21321.
- Blackman, D. K., Ildefonse, B., John, B. E., Ohara, Y., Miller, D. J., MacLeod, C. J. and the Expedition 304/305 Scientists, 2006, *Proc. IODP*, **304/305**, College Station TX (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi: 10.2204/iodp.proc.304305.2006.
- Blackman, D. K., Ildefonse, B., John, B. E., Ohara, Y., Miller, D. J., Abe, N., Abratis, M., Andal, E. S., Andreani, M., Awaji, S., Beard, J. S., Brunelli, D., Charney, A. B., Christie, D. M., Collins, J., Delacour, A. G., Delius, H., Drouin, M., Einaudi, F., Escartin, J., Frost, B. R., Früh-Green, G., Fryer, P. B., Gee, J. S., Godard, M., Grimes, C. B., Halfpenny, A., Hansen, H.-E., Harris, A. C., Tamura, A., Hayman, N. W., Hellebrand, E., Hirose, T., Hirth, J. G., Ishimaru, S., Johnson, K. T. M., Karner, G. D., Linek, M., MacLeod, C. J., Maeda, J., Mason, O. U., McCaig, A. M., Michibayashi, K., Morris, A., Nakagawa, T., Nozaka, T., Rosner, M., Searle, R. C., Suhr, G., Tominaga, M., von der Handt, A., Yamasaki, T. and Zhao, X., 2011, Drilling constraints on lithospheric accretion and evolution at Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge, 30°N. *Jour. Geophys. Res.*, **116**: B07103, doi: 10.1029/2010JB007931.
- Blackman, D. K., Karner, G. D. and Searle, R. C., 2008, Three-dimensional structure of oceanic core complexes: effects on gravity signature and ridge flank morphology, Mid-Atlantic Ridge, 30°N. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**: Q06007, doi: 10.1029/2008GC001951.
- Blackman, D. K., Karson, J. A., Kelley, D. S., Cann, J. R., Früh-Green, G. L., Gee, J. S., Hurst, S. D., John, B. E., Morgan, J., Nooner, S. L., Ross, D. K., Schroeder, T. J. and Williams, E. A., 2002, Geology of the Atlantis Massif (Mid-Atlantic Ridge, 30°N): implications for the evolution of an ultramafic oceanic core complex. *Mar. Geophys. Res.*, **23**, 443–469.
- Blackman, D. K., Slagle, A., Guerin, G. and Harding, A., 2014, Geophysical signatures of past and present hydration within a young oceanic core complex. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 1179–1186.
- Boudier, F., Nicolas, A. and Ildefonse, B., 1996, Magma chambers in the Oman ophiolite: fed from the top and the bottom. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **144**, 239–250.
- Buck, W. R., Lavier, L. L. and Poliakov, A. N. B., 2005, Modes of faulting at mid-ocean ridges. *Nature*, **434**, 719–723.
- Busigny, V., Laverne, C. and Bonifacie, M., 2005, Nitrogen content and isotopic composition of oceanic crust at a superfast spreading ridge: a profile in altered basalts from ODP Site 1256, Leg 206. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, **6**: Q12001, doi: 10.1029/2005GC001020.
- Canales, J. P., Tucholke, B. E., Xu, M., Collins, J. A. and DuBois, D. L., 2008, Seismic evidence for large-scale compositional heterogeneity of oceanic core complexes. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**: Q08002, doi: 10.1029/2008GC002009.
- Cann, J. R., Blackman, D. K., Smith, D. K., McAllister, E., Janssen, B., Mello, S., Avgerinos, E., Pascoe, A. R. and Escartin, J., 1997, Corrugated slip surfaces formed at ridge-transform intersections on the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, **385**, 329–332.
- Cannat, M., Lagabriele, Y., Bougault, H., Casey, J., de Courettes, N., Dmitriev, L. and Fouquet, Y., 1997, Ultramafic and gabbroic exposures at the Mid-Atlantic Ridge: Geological mapping in the 15°N region. *Tectonophysics*, **279**, 193–213.
- Cannat, M., Mével, C., Maia, M., Deplus, C., Durand, C., Gente, P., Agrinier, P., Belarouchi, A., Dubuisson, G., Humler, E. and Reynolds, J., 1995, Thin crust, ultramafic exposures, and rugged faulting patterns at the Mid-Atlantic Ridge (22°–24° N). *Geology*, **23**, 49–52.
- Cannat, M., Sauter, D., Mendel, V., Ruellan, E., Okino, K., Escartin, J., Combier, V. and Baala, M., 2006, Modes of seafloor generation at a melt-poor ultraslow-spreading ridge. *Geology*, **34**, 605–608.
- Castelain, T., McCaig, A. and Cliff, R. A., 2014, Fluid evolution in an oceanic core complex: a fluid inclusion study from IODP Hole U1309 D-Atlantis Massif, 30°N, mid-Atlantic Ridge. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **15**, 1193–1214.
- Cheadle, M. and Grimes, C., 2010, To fault or not to fault. *Nat. Geosci.*, **3**, 454–455.
- Collins, J. A., Blackman, D. K., Harris, A. and Carlson, R. L., 2010, Seismic and drilling constraints on velocity structure and reflectivity near IODP Hole U1309D on the central dome of Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge 30°N. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **10**: Q01010, doi: 10.1029/2008GC002121.
- Constantin, M., Hékinian, R., Ackermann, D. and Stoffers, P., 1995, Mafic and ultramafic intrusions in upper mantle peridotites from fast spreading centers of the Easter Microplate (South East Pacific). In Vissers, R. L. M. and Nicolas, A., eds., *Mantle and Lower Crustal Exposures in Ocean Ridges and in Ophiolites*, Kluwer, 71–120.
- Coogan, L. A., 2014, The lower oceanic crust. In Rudnick, R. L., ed., *The Crust, Treatise on Geochemistry* (2nd ed.) (Vol. 4). Elsevier, New York, 497–541.
- Coogan, L. A., Gillis, K. M., MacLeod, C. J., Thompson, G. M. and Hékinian, R., 2002, Petrology and geochemistry of the lower ocean crust formed at the East Pacific Rise and exposed at Hess Deep: a synthesis and new results. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, **3**: 8604, doi: 10.1029/2001GC000230.
- Crispini, L., Tartarotti, P. and Umino, S., 2006, Microstructural features of a subaqueous lava from basaltic crust off the East Pacific Rise (ODP Site 1256, Cocos plate). *Ophioliti*, **31**, 117–127.
- Delacour, A., Früh-Green, G. L. and Bernasconi, S. M., 2008a, Sulfur mineralogy and geochemistry of serpentinites and gabbros of the Atlantis Massif (IODP Site U1309). *Geochem. Cosmochim. Acta.*, **72**, 5111–5127.
- Delacour, A., Früh-Green, G. L., Bernasconi, S. M., Schaeffer, P. and Kelley, D. S., 2008b, Carbon geochemistry of serpentinites in the Lost City hydrothermal system (30°N, MAR). *Geochem. Cosmochim. Acta*, **72**, 3681–3702.
- Delacour, A., Früh-Green, G. L., Frank, M., Gutjahr, M. and Kelley, D. S., 2008c, Sr- and Nd-isotope geochemistry of the Atlantis Massif (30°N, MAR): implications for fluid fluxes and lithospheric heterogeneity. *Chem. Geol.*, **254**, 19–35.
- Detrick, R., Collins, J., Stephen, R. and Swift, S., 1994, In situ evidence for the nature of the seismic layer 2/3 boundary in oceanic crust. *Nature*, **370**, 288–290.
- Detrick, R., Honnorez, J., Bryan, W. B., Juteau, T. and ODP Legs 106/109 Scientific Parties., 1988, *Proc. ODP, Init. Repts.*, **106/109**. College Station, TX: Ocean Drilling Program. doi: 10.2973/odp.proc.ir.106109.1988.
- Dick, H. J. B., Lin, J. and Schouten, H., 2003, An ultraslow-spreading class of ocean ridge. *Nature*, **426**, 405–412.
- Dick, H. J. B., MacLeod, C. J., Blum, P. and the Expedition 360 Scientists, 2016, *Expedition 360 Preliminary Report: Southwest Indian Ridge lower crust and Moho*. International Ocean Discovery Program. doi: 10.14379/iodp.pr.360.2016.
- Dick, H. J. B., Maurice, A. T. and Tucholke, B. E., 2008, Plutonic foundation of a slow-spreading ridge segment: Ocean-

- ic core complex at Kane Megamullion, 23°30' N, 45°20' W. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9: doi: 10.1029/2007GC001645.
- Dick, H. J. B. and Natland, J. H., 1996, Late-stage melt evolution and transport in the shallow mantle beneath the East Pacific Rise. *Proc. ODP, Sci. Results.*, 147, 103–134.
- Dick, H. J. B., Natland, J. H., Alt, J. C., Bach, W., Bideau, D., Gee, J. S., Haggas, S., Hertogen, J. G. H., Hirth, G., Holm, P. M., Ildefonse, B., Iturrino, G. J., John, B. E., Kelley, D. S., Kikawa, E., Kingdon, A., LeRoux, P. J., Maeda, J., Meyer, P. S., Miller, D. J., Naslund, H. R., Niu, Y.-L., Robinson, P. T., Snow, J., Stephen, R. A., Trimby, P. W., Worm, H.-U. and Yoshinobu, A., 2000, A long in situ section of the lower ocean crust: results of ODP Leg 176 drilling at the Southwest Indian Ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 179, 31–51.
- Dick, H. J. B., Natland, J. H. and Ildefonse, B., 2006, Past and future impact of deep drilling in the oceanic crust and mantle. *Oceanography*, 19, 72–80.
- Dilek, Y. and Furnes, H., 2014, Ophiolites and their origins. *Elements*, 10, 93–100.
- Drouin, M., Godard, M., Ildefonse, B., Bruguier, O. and Garrido, C. J., 2009, Geochemical and petrographic evidence for magmatic impregnation in the oceanic lithosphere at Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge (IODP Hole U1309D, 30°N). *Chem. Geol.*, 264, 71–88.
- Drouin, M., Ildefonse, B. and Godard, M., 2010, A microstructural imprint of melt impregnation in slow spreading lithosphere: olivine-rich troctolites from the Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge, 30°N, IODP Hole U1309D. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11: Q06003, doi: 10.1029/2009GC002995.
- Erdmann, M., Fischer, L. A., France, L., Zhang, C., Godard, M. and Koepke, J., 2015, Anatexis at the roof of an oceanic magma chamber at IODP Site 1256 (equatorial Pacific): an experimental study. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 169: 39, doi: 10.1007/s00410-015-1136-5.
- Escartin, 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.
- Escartin, J., Smith, D. K., Cann, J., Schouten, H., Langmuir, C. H. and Escrig, S., 2008, Central role of detachment faults in accretion of slow-spreading oceanic lithosphere. *Nature*, 455, 790–794.
- Faak, K. and Gillis, K. M., 2016, Slow cooling of the lowermost oceanic crust at the fast-spreading East Pacific Rise. *Geology*, 44, 115–118.
- Fischer, L. A., Erdmann, M., France, L., Wolff, P. E., Deloule, E., Zhang, C., Godard, M. and Koepke, J., 2016, Trace element evidence for anatexis at oceanic magma chamber roofs and the role of partial melts for contamination of fresh MORB. *Lithos*, 260, 1–8.
- Fontana, E., Iturrino, G. J. and Tartarotti, P., 2010, Depth-shifting and orientation of core data using a core-log integration approach: a case study from ODP-IODP Hole 1256D. *Tectonophysics*, 494, 85–100.
- Fontana, E. and Tartarotti, P., 2013, Structural and petrophysical characterization of the upper basement crustal section at ODP/IODP Site 1256 (East Pacific Ocean). *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 14, 2399–2431.
- France, L., Ildefonse, B. and Koepke, J., 2009, Interactions between magma and hydrothermal system in Oman ophiolite and in IODP Hole 1256D: fossilization of a dynamic melt lens at fast spreading ridges. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10: Q10O19, doi: 10.1029/2009GC002652.
- France, L., Koepke, J., MacLeod, C. J., Ildefonse, B., Godard, M. and Deloule, E., 2014, Contamination of MORB by anatexis of magma chamber roof rocks: constraints from a geochemical study of experimental melts and associated residues. *Lithos*, 202–203, 120–137.
- Francheteau, J., Armijo, R., Cheminée, J. L., Hekinian, R., Lonsdale, P. and Blum, N., 1990, 1 Ma East Pacific Rise oceanic crust and uppermost mantle exposed by rifting in Hess Deep (equatorial Pacific Ocean). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 101, 281–295.
- Frost, B. R. and Beard, J. S., 2007, On silica activity and serpentinization. *Jour. Petrol.*, 48, 1351–1368.
- Frost, B. R., Beard, J. S., McCaig, A. and Condliffe, E., 2008, The formation of micro-rodingites from IODP Hole U1309D: key to understanding the process of serpentinization. *Jour. Petrol.*, 49, 1579–1588.
- Früh-Green, G. L., Kelley, D. S., Bernasconi, S. M., Karson, J. A., Ludwig, K. A., Butterfield, D. A., Boschi, C. and Proskurowski, G., 2003, 30,000 years of hydrothermal activity at the Lost City vent field. *Science*, 301, 495–498.
- Gao, Y., Vils, F., Cooper, K. M., Banerjee, N., Harris, M., Hoefs, J., Teagle, D. A. H., Casey, J. F., Elliott, T., Laverne, C., Alt, J. C. and Muehlenbachs, K., 2012, Downhole variation of lithium and oxygen isotopic compositions of oceanic crust at East Pacific Rise, ODP Site 1256. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 13: doi: 10.1029/2012GC004207.
- Geldmacher, J., Höfig, T., Hauff, S. F., Hoernle, K., Garbeschoenberg, C. and Wilson, D. S., 2013, Influence of the Galápagos hotspot on the East Pacific Rise during Miocene superfast spreading. *Geology*, 41, 183–186.
- Geotimes, 1972, Penrose field conference on ophiolites. *Geotimes*, 17, 24–25.
- Gilbert, L. A. and Salisbury, M. H., 2011, Oceanic crustal velocities from laboratory and logging measurements of Integrated Ocean Drilling Program Hole 1256D. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12: Q09001, doi: 10.1029/2011GC003750.
- Gillis, K. M., 1995, Controls on hydrothermal alteration in a section of fast-spreading oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 134, 473–489.
- Gillis, K. M., 2008, The roof of an axial magma chamber: A hornfelsic heat exchanger. *Geology*, 36, 299–302.
- Gillis, K. M., Snow, J. E., Klaus, A., Abe, N., Adrião, Á. B., Akizawa, N., Ceuleneer, G., Cheadle, M. J., Faak, K., Falloon, T. J., Friedman, S. A., Godard, M., Guerin, G., Harigane, Y., Horst, A. J., Hoshide, T., Ildefonse, B., Jean, M. M., John, B. E., Koepke, J., Machi, S., Maeda, J., Marks, N. E., McCaig, A. M., Meyer, R., Morris, A., Nozaka, T., Python, M., Saha, A. and Wintch, R. P., 2014, Primitive layered gabbros from fast-spreading lower oceanic crust. *Nature*, 505, 204–207.
- Gillis, K. M., Snow, J. E., Klaus, A., Guerin, G., Abe, N., Akizawa, N., Ceuleneer, G., Cheadle, M. J., Adrião, Á., Faak, K., Falloon, T. J., Friedman, S. A., Godard, M. M., Harigane, Y., Horst, A. J., Hoshide, T., Ildefonse, B., Jean, M. M., John, B. E., Koepke, J. H., Machi, S., Maeda, J., Marks, N. E., McCaig, A. M., Meyer, R., Morris, A., Nozaka, T., Python, M., Saha, A. and Wintch, R. P., 2014, Expedition 345 summary. In Gillis, K. M., Snow, J. E., Klaus, A., and the Expedition 345 Scientists eds., *Proc. IODP*, 345: College Station, TX (Integrated Ocean Drilling Program). doi: 10.2204/iodp.proc.345.101.2014.
- Godard, M., Awaji, S., Hansen, H., Hellebrand, E., Brunelli, D., Johnson, K., Yamasaki, T., Maeda, J., Abratis, M., Christie, D., Kato, Y., Mariet, C. and Rosner, M., 2009, Geochemistry of a long in-situ section of intrusive slow-spread oceanic lithosphere: results from IODP Site U1309 (Atlantis Massif, 30°N Mid-Atlantic-Ridge). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 279, 110–122.
- Grimes, C. B., John, B. E., Cheadle, M. J. and Wooden, J. L., 2008, Protracted construction of gabbroic crust at a slow

- spreading ridge: constraints from  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  zircon ages from Atlantis Massif and IODP Hole U1309D (30°N, MAR). *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**: Q08012, doi: 10.1029/2008GC002063.
- Grimes, C. B., John, B. E., Cheadle, M. J., Mazdab, F. K., Wooden, J. L., Swapp, S. and Schwartz, J. J., 2009, On the occurrence, trace element geochemistry, and crystallization history of zircon from in situ ocean lithosphere. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **158**, 757–783.
- Grimes, C. B., John, B. E., Kelemen, P. B., Mazdab, F. K., Wooden, J. L., Cheadle, M. J., Hanghøj, K. and Schwartz, J. J., 2007, Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: a method for distinguishing detrital zircon provenance. *Geology*, **35**, 643–646.
- Grimes, C. B., Ushikubo, T., John, B. E. and Valley, J. W., 2011, Uniformly mantle-like  $\delta^{18}\text{O}$  in zircons from oceanic plagiogranites and gabbros. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **161**, 13–33.
- Harigane, Y., Abe, N., Michibayashi, K., Kimura, J.-I. and Chang, Q., 2016, Melt-rock interactions and fabric development of peridotites from North Pond in the Kane area, Mid-Atlantic Ridge: implications of microstructural and petrological analyses of peridotite samples from IODP Hole U1382A. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **17**, doi: 10.1002/2016GC006429.
- Harris, M., Coggon, R. M., Smith-Duque, C. E., Cooper, M. J., Milton, J. A. and Teagle, D. A. H., 2015, Channelling of hydrothermal fluids during the accretion and evolution of the upper oceanic crust: Sr isotope evidence from ODP Hole 1256D. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **416**, 56–66.
- Hékinian, R., Bideau, D., Francheteau, J., Cheminee, J. L., Henstock, T. J., Woods, A. W. and White, R. S., 1993, The accretion of oceanic crust by episodic sill intrusion. *Jour. Geophys. Res.*, **98**, 4143–4161.
- Hess, H. H., 1959, The AMSOC hole to the Earth's Mantle. *Trans. Am. Geophys. Uni.*, **4**, 340–345.
- Hirose, T. and Hayman, N. W., 2008, Structure, permeability, and strength of a fault zone in the footwall of an oceanic core complex, the central dome of the Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge, 30°N. *Jour. Struct. Geol.*, **30**, 1060–1071.
- Höfö, T. W., Geldmacher, J., Hoernle, K., Hauff, F., Duggen, S. and Garbe-Schönberg, D., 2014, From the lavas to the gabbros: 1.25 km of geochemical characterization of upper oceanic crust at ODP/IODP Site 1256, eastern equatorial Pacific. *Lithos*, **210–211**, 289–312.
- Huang, J., Ke, S., Gao, Y., Xiao, Y. and Li, S., 2015, Magnesium isotopic compositions of altered oceanic basalts and gabbros from IODP Site 1256 at the East Pacific Rise. *Lithos*, **231**, 53–61.
- Ildefonse, B., Blackman, D. K., John, B. E., Ohara, Y., Miller, D. J., MacLeod, C. J. and Integrated Ocean Drilling Expeditions 304/305 Science Party, 2007, Oceanic core complexes and crustal accretion at slow-spreading ridges. *Geology*, **35**, 623–626.
- Ildefonse, B., Abe, N., Godard, M., Morris, A., Teagle, D. A. H. and Umino, S., 2014, Formation and evolution of oceanic lithosphere: new insights on crustal structure and igneous geochemistry from ODP/IODP Sites 1256, U1309, and U1415. In Stein, R., Blackman, D., Inagaki, F. and Larsen, H.-C., eds., *Developments in Marine Geology (Volume 7): Earth and Life Processes Discovered from Subseafloor Environments: A Decade of Science Achieved by the Integrated Ocean Drilling Program (IODP)*. Elsevier B. V., Amsterdam, 449–505.
- 石渡 明 (Ishiwatari, A.), 2010, オフィオライト研究の新展開 (New Developments in Ophiolites Studies). 地学雑 (*Jour. Tokyo Geogr. Soc.*), **119**, 841–851.
- Ishizuka, O., Tani, K. and Reagan, M. K., 2014, Izu-Bonin-Mariana forearc crust as a modern ophiolite analogue. *Elements*, **10**, 115–120.
- Iwamori, H. and Albarede, F., 2008, Decoupled isotope record of ridge and subduction zone processes in oceanic basalts by independent component analysis. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **24**, doi: 10.1029/2007GC001753.
- John, B. E., Cheadle, M. J., Gee, J. S., Grimes, C. B., Morris, A. and Pressling, N., 2009, Data report: spatial and temporal evolution of slow spread oceanic crust-graphic sections of core recovered from IODP Hole U1309D, Atlantis Massif, 30°N, MAR (including Pb/U zircon geochronology and magnetic remanence data). In Blackman, D. K., Ildefonse, B., John, B. E., Ohara, Y., Miller, D. J., MacLeod, C. J. and the Expedition 304/305 Scientists, eds., *Proc. IODP, 304/305*: College Station, TX (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi: 10.2204/iodp.proc.304305.205.2009
- Karson, J. A., Früh-Green, G. L., Kelley, D. S., Williams, E. A., Yoerger, D. R. and Jakuba, M., 2006, Detachment shear zone of the Atlantis Massif core complex, Mid-Atlantic Ridge, 30°N. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **7**: Q06016, doi: 10.1029/2005GC001109
- Kelemen, P. B., Koga, K. and Shimizu, N., 1997a, Geochemistry of gabbro sills in the crust-mantle transition zone of the Oman ophiolite: implications for the origin of the oceanic lower crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **146**, 475–488.
- Kelemen, P. B., Kikawa, E., Miller, D. J. and Shipboard Scientific Party, 2007b, Leg 209 summary: processes in a 20-km-thick conductive boundary layer beneath the Mid-Atlantic Ridge, 14°–16°N. In P. B. Kelemen, E. Kikawa, and D. J. Miller, eds., *Proc. ODP, Sci. Results*, **209**. College Station, TX: Ocean Drilling Program. 1–33.
- Kelley, D. S., Karson, J. A., Blackman, D. K., Früh-Green, G. L., Butterfield, D. A., Lilley, M. D. and the AT3-60 Shipboard Party, 2001, An off-axis hydrothermal vent field near the Mid-Atlantic Ridge at 30°N. *Nature*, **412**, 145–149.
- Klein, E. M., 2003, Geochemistry of the igneous oceanic crust. In Holland, H. D. and Turekian, K. K., eds., *Treatise on Geochemistry*, **3**, Elsevier, 433–463.
- Koepke, J., Christie, D. M., Dziony, W., Holtz, F., Lattard, D., MacLennan, J., Park, S., Scheibner, B., Yamasaki, T. and Yamazaki, S., 2008, Petrography of the dike-gabbro transition at IODP Site 1256 (equatorial Pacific): the evolution of the granoblastic dikes. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**: Q07009, doi: 10.1029/2008GC001939.
- Koepke, J., France, L., Müller, T., Faure, F., Goetze, N., Dziony, W. and Ildefonse, B., 2011, Gabbros from IODP Site 1256, equatorial Pacific: insight into axial magma chamber processes at fast spreading ocean ridges. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **12**: Q09014, doi: 10.1029/2011GC003655.
- Kumagai, H., Nakamura, K., Toki, T., Morishita, T., Okino, K., Ishibashi, J.-I., Tsunogai, U., Kawaguchi, S., Gamo, T., Shibuya, T., Sawaguchi, T., Neo, N., Joshima, M., Sato, T. and Takai, K., 2008, Geological background of the Kairei and Edmond hydrothermal fields along the Central Indian Ridge: Implications of their vent fluids' distinct chemistry. *Geofluids*, **8**, 239–251.
- Langmuir, C. H., Bender, J. F. and Batiza, R., 1986, Petrological and tectonic segmentation of the East Pacific Rise, 5°30'N–14°30'N. *Nature*, **322**, 422–429.
- Laverne, C., Grauby, O., Alt, J. C., and Bohn, M., 2006, Hydrothermal alteration in altered basalts from Hole 1256D, ODP Leg 206: the transition from low-temperature to hydrothermal alteration. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **7**: Q10003, doi: 10.1029/2005GC001180.
- Lissenberg, C. J., MacLeod, C. J., Howard, K. A. and Godard, M., 2013, Pervasive reactive melt migration through fast-spreading lower oceanic crust (Hess Deep, equatorial Pacific

- Ocean). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **361**, 436–447.
- Lonsdale, P., 1988, Structural pattern of the Galapagos microplate and evolution of the Galapagos triple junctions. *Jour. Geophys. Res.*, **93**, 13551–13574.
- MacLennan, J., Hulme, T. and Singh, S. C., 2004, Thermal models of oceanic crustal accretion: linking geophysical, geological and petrological observations. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **5**: doi: 10.1029/2003GC000605.
- MacLeod, C. J. and Yaouancq, G., 2000, A fossil melt lens in the Oman ophiolite: Implications for magma chamber processes at fast spreading ridges. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **176**, 357–373.
- Mason, O. U., Nakagawa, T., Rosner, M., Van Nostrand, J. D., Zhou, J., Maruyama, A., Fisk, M. R. and Giovannoni, S. J., 2010, First investigation of the microbiology of the deepest layer of ocean crust. *PLoS One*, **5**: e15399, doi: 10.1371/journal.pone.0015399.
- 松本 剛・宮下純夫・荒井章司・森下知晃・前田仁一郎・熊谷英憲・大友 幸子・Dick, H. J. B. (Matsumoto, T., Miyashita, S., Arai, S., Morishita, T., Maeda, J., Kumagai, H., Ohtomo, Y. and Dick, H. J. B.), 2003, 南西インド洋海嶺アトランティス海台に見られる超低速拡大軸の火成活動と「地殻・マントル境界」(Magmatism and “Crust-mantle Boundary” on the Ultra-slow Spreading Ridge as Observed in Atlantis Bank, Southwest Indian Ridge). *地学雑 (Jour. Tokyo Geogr. Soc.)*, **112**, 705–719.
- Michibayashi, K., Hirose, T., Nozaka, T., Harigane, Y., Escartin, J., Delius, H., Linek, M. and Ohara, Y., 2008, Hydration due to high-T brittle failure within in situ oceanic crust, 30°N Mid-Atlantic Ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **275**, 348–354.
- 宮下純夫・前田仁一郎 (Miyashita, S. and Maeda, J.-I.), 2003, 海洋地殻の構成と火成活動 (Constitution of Oceanic Crust and Ocean Ridge Magmatism). *地学雑 (Jour. Tokyo Geogr. Soc.)*, **112**, 668–683.
- 宮下純夫・足立佳子・海野 進 (Miyashita, S., Adachi, Y. and Umino, S.), 2008, 海洋地殻の構造と形成プロセス (Architecture of Oceanic Crust and its Formation Process). *地学雑 (Jour. Tokyo Geogr. Soc.)*, **117**, 168–189.
- 森下知晃 (Morishita, T.), 2013, 21世紀マントル掘削計画—海洋プレートの1点突破から全貌解明へ— (21st century mantle drilling program—Breakthrough from the first mantle drilling to the nature of the oceanic plate—). *日本地球惑星科学連合ニュースレター (Japan Geosci. Let.)*, **9**, 4–6.
- 森下知晃・小澤一仁・小畑正明 (Morishita, T., Ozawa, K. and Obata, M.), 2010, マントル科学研究の最近の動向—特に再肥活化, レオロジー, オフィオライト問題: 第5回国際レルゾライト会議報告 (A recent trend in sciences on mantle-derived materials, with special emphases on refertilization, rheology, and ophiolite problems: a report of the Fifth International Conference on Orogenic Lherzolite). *岩鉱 (Japan. Mag. Mineral. Petrol. Sci.)*, **39**, 85–103.
- Morishita, T., Nakamura, K., Shibuya, T., Kumagai, H., Sato, T., Okino, K., Sato, H., Nauchi, R., Hara, K. and Takamaru, R., 2015, Petrology of peridotites and related gabbroic rocks around the Kairei hydrothermal field in the Central Indian Ridge. *In* Ishibashi, J., Okino, K. and Sunamura, M., eds., *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems: TAIGA Concept*. Springer, doi: 10.1007/978-4-431-54865-2\_14.
- 森下知晃・藤江 剛・山野 誠・中西正男・尾鼻浩一郎・中村恭之・斎藤実篤・小平秀一・木村純一・黒田潤一郎・小野重明 (Morishita, T., Fujie, G., Yamano, M., Nakanishi, M., Obana, K., Nakamura, K., Saito, S., Kodaira, S., Kimura, J.-I., Kuroda, J. and Ono, S.), 2017, 古い海洋プレート直前での屈曲断層形成に伴う加水作用解明に向けた海洋掘削計画概要 (Overview of the Drilling Project on the Bend-fault Hydrology in old Incoming Plate). *地学雑 (Jour. Tokyo. Geogr. Soc.)*, 印刷中.
- Morris, A., Gee, J. S., Pressling, N., John, B. E., MacLeod, C. J., Grimes, C. B. and Searle, R. C., 2009, Footwall rotation in an oceanic core complex quantified using reoriented Integrated Ocean Drilling Program core samples. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **287**, 217–228.
- Müller, R. D., Sdrolias, M., Gaina, C. and Roest, W. R., 2008, Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**: Q04006, doi: 10.1029/2007GC001743.
- Mutter, A., Holzheid, A., Klügel, A., Wilke, M., Berndt, J. and Garbe-Schönberg, D., 2014, Element signatures of subduction-zone fluids. An experimental study of the element partitioning ( $D^{\text{fluid/rock}}$ ) of natural partly altered igneous rocks from the ODP drilling Site 1256. *Int. Jour. Earth Sci.*, **103**, 1917–1927.
- Nakamura, K., Morishita, T., Bach, W., Klein, F., Hara, K., Okino, K., Takai, K. and Kumagai, H., 2009, Serpentinized troctolites exposed near the Kairei Hydrothermal Field, Central Indina Ridge: insights into the origin of the Kairei hydrothermal fluid supporting a unique microbial ecosystem. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **280**, 128–136.
- Nicolas, A., Reuber, I. and Benn, K., 1988, A new magma chamber model based on structural studies in the Oman ophiolite. *Tectonophysics*, **151**, 87–105.
- Niino, A., Maeda, J., Yamasaki, T. and Takeda, F., 2009, Ni-Fe alloy possibly associated with reduced magmatic fluids in lower-crustal gabbro, IODP Hole U1309D, Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **104**, 290–295.
- Nooner, S. L., Sasagawa, G. S., Blackman, D. K. and Zumberge, M. A., 2003, Constraints on crustal structure at the Mid-Atlantic Ridge from seafloor gravity measurements made at the Atlantis Massif. *Geophys. Res. Lett.*, **30**: 1446, doi: 10.1029/2003GL017126.
- Nozaka, T. and Fryer, P., 2011, Alteration of the oceanic lower crust at a slow-spreading axis: insight from vein-related zoned halos in olivine gabbro from Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge. *Jour. Petrol.*, **52**, 643–664.
- Nozaka, T., Fryer, P. and Andreani, M., 2008, Formation of clay minerals and exhumation of lower-crustal rocks at Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**: Q11005, doi: 10.1029/2008GC002207
- Nozaka, T., Meyer, R., Wintsch, R. P. and Wathen, B., 2016, Hydrothermal spinel, corundum and diasporite in lower oceanic crustal troctolites from the Hess Deep Rift. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **171**: 53, doi: 10.1007/s00410-016-1266-4
- 小原泰彦 (Ohara, Y.), 2012, 背弧海盆における海洋コアコンプレックスの発達: 最近のゴジラメガムリオン研究から分かってきたこと (Development of oceanic core complex in backarc basin: New insights from the recent Godzilla Megamullion study). *岩鉱 (Japan. Mag. Mineral. Petrol. Sci.)*, **41**, 193–202.
- Olive, J.-A., Behn, M. D. and Tucholke, B. E., 2010, The structure of oceanic core complexes controlled by the depth distribution of magma emplacement. *Nat. Geosci.*, **3**, 491–495.
- Pallister, J. S. and Hopson, C. A., 1981, Samail ophiolite plutonic suite: field relations, phase variation, cryptic variation and layering, and a model of a spreading ridge magma chamber. *Jour. Geophys. Res.*, **86**, 2593–2644.
- Panseri, M., Tartarotti, P. and Crispini, L., 2010, Felsic segregation during crystallization of a subaqueous lava field (ODP-IODP Site 1256, East Pacific Rise): inferences from structure and petrography. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **196**, 31–44.
- Pariso, J. E., Rommevaux, C. and J.-C. Sempere, 1996, Three-dimensional inversion of marine magnetic anomalies: Implications for crustal accretion along the Mid-Atlantic Ridge (28°–31°30'N). *Mar. Geophys. Res.*, **18**, 85–101.

- Patten, C. G. C., Pitcairn, I. K., Teagle, D. A. H. and Harris, M., 2016. Mobility of Au and related elements during the hydrothermal alteration of the oceanic crust: implications for the sources of metals in VMS deposits. *Mineral. Deposits*, **51**, 179–200.
- Perk, N. W., Coogan, L. A., Karson, J. A., Klein, E. M. and Hanna, H. D., 2007. Petrology and geochemistry of primitive lower oceanic crust from Pito Deep: implications for the accretion of the lower crust at the southern East Pacific Rise. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **154**, 575–590.
- Phipps Morgan, J., Harding, A., Orcutt, J. and Chen, Y. J., 1994. An observational and theoretical synthesis along a mid-ocean ridge spreading center. In Ryan, M. P. ed., *Magmatic Systems*. Academic Press, Inc., 139–178.
- Pressling, N., Morris, A., John, B. E., and MacLeod, C., 2012. The internal structure of an oceanic core complex: an integrated analysis of oriented borehole imagery from IODP Hole U1309D (Atlantis Massif). *Geochem., Geophys., Geosyst.*, **13**: doi: 10.1029/2012GC004061
- Quick, J. E. and Denlinger, R. P., 1993. Ductile deformation and the origin of layered gabbro in ophiolite. *Jour. Geophys. Res.*, **98**, 14015–14028.
- Rioux, M., Lissenberg, C. J., McLean, N. M., Bowring, S. A., MacLeod, C. J., Hellebrand, E., and Shimizu, N., 2012. Protracted timescales of lower crustal growth at the fast-spreading East Pacific Rise. *Nat. Geosci.*, **5**, 275–278.
- Ryan, W. B. F., Carbotte, S. M., Coplan, J. O., O'Hara, S., Melkonian, A., Arko, R., Weissel, R. A., Ferrini, V., Goodwillie, A., Nitsche, F., Bonczkowski, J. and Zemsky, R., 2009. Global multi-resolution topography synthesis. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **10**: Q03014, doi: 10.1029/2008GC002332.
- Sanfilippo, A., Morishita, T. and Senda, R., 2016. Rhenium-osmium isotope fractionation at the oceanic crust-mantle boundary. *Geology*, **44**, 167–170.
- Sanfilippo, A., Morishita, T., Kumagai, H., Nakamura, K., Okino, K., Hara, K., Tamura, A. and Arai, S., 2015. Hybrid troctolites from Mid-Ocean Ridges: inherited mantle in the lower crust. *Lithos*, **232**, 124–130.
- Sanfilippo, A., Dick, H. and Ohara, Y., 2013. Melt-rock reaction in the mantle: mantle troctolites form the Parece Vela ancient spreading center. *Jour. Petrol.*, **54**, 861–885.
- Sano, T., Miyoshi, M., Ingle, S., Banerjee, N. R., Ishimoto, M. and Fukuoka, T., 2008. Boron and chlorine contents of upper oceanic crust: basement samples from IODP Hole 1256D. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, **9**: Q12015, doi: 10.1029/2008GC002182.
- Sano, T., Sakuyama, T., Ingle, S., Rodriguez, S. and Yamasaki, T., 2011. Petrological relationships among lavas, dikes, and gabbros from Integrated Ocean Drilling Program Hole 1256D: insight into the magma plumbing system beneath the East Pacific Rise. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, **12**: Q06013, doi: 10.1029/2011GC003548.
- 佐藤 暢・熊谷英憲・根尾夏紀・中村謙太郎 (Sato, H., Kumagai, H., Neo, N. and Nakamura, K.), 2008. 中央海嶺玄武岩の化学組成の多様性とその成因 (Variations of Chemical Compositions of Mid-ocean Ridge Basalts (MORB) and their Origin). *地学雑 (Jour. Tokyo Geogr. Soc.)*, **117**, 124–145.
- Satsukawa, T., Ildefonse, B., Mainprice, D., Morales, L. F. B., Michibayashi, K. and Barou, F., 2013. A database of plagioclase crystal preferred orientations (CPO) and microstructures-implications for CPO origin, strength, symmetry and seismic anisotropy in gabbroic rocks. *Solid Earth*, **4**, 511–542.
- Sauter, D., Cannat, M., Rouméjon, S., Andreani, M., Birot, D., Bronner, A., Brunelli, D., Carlut, J., Delacour, A., Guyader, V., MacLeod, C.J., Manatschal, G., Mendel, V., Ménez, B., Pasini, V., Ruellan, E. and Searle, R., 2013. Continuous exhumation of mantle-derived rocks at the Southwest Indian Ridge for 11 million years. *Nature Geosci.*, **6**, 314–320.
- Schoolmeesters, N., Cheadle, M. J., John, B. E., Reiners, P. W., Gee, J. and Grimes, C. B., 2012. The cooling history and the depth of detachment faulting at the Atlantis Massif oceanic core complex. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **13**: doi: 10.1029/2012GC004314.
- Schroeder, T. and John, B. E., 2004. Strain localization on an oceanic detachment fault system, Atlantis Massif, 30°N, Mid-Atlantic Ridge. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **5**: Q11007, doi: 10.1029/2004GC000728.
- Schouten, H., Smith, D. K., Cann, J. R. and Escartin, J., 2010. Tectonic versus magmatic extension in the presence of core complexes at slow-spreading ridges from a visualization of faulted seafloor topography. *Geology*, **38**, 615–618.
- Shilobreeva, S., Martinez, I., Busigny, V., Agrinier, P. and Laverne, C., 2011. Insights into C and H storage in the altered oceanic crust; results from ODP/IODP Hole 1256D. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **75**, 2237–2255.
- Slagle, A. and Goldberg, D. S., 2011. Evaluation of ocean crustal Sites 1256 and 504 for long-term CO<sub>2</sub> sequestration. *Geophys. Res. Lett.*, **38**: L16307, doi: 10.1029/2011GL048613.
- Smewing, J. D., 1981. Mixing characteristics and compositional differences in mantle-derived melts beneath spreading axes: evidence from cyclically layered rocks in the ophiolite of North Oman. *Jour. Geophys. Res.*, **86**, 2645–2659.
- Steinbeck, J., 1961. High Drama of Bold Thrust through Ocean Floor. Earth's second layer is trapped in prelude to Mohole. *Life*, 111–122.
- Suhr, G., Hellebrand, E., Johnson, K. and Brunelli, D., 2008. Stacked gabbro units and intervening mantle: a detailed look at a section of IODP Leg 305, Hole U1309D. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**: Q10007, doi: 10.1029/2008GC002012
- Swift, S., Reichow, M., Tikku, A., Tominaga, M. and Gilbert, L., 2008. Velocity structure of upper ocean crust at Ocean Drilling Program Site 1256. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**: Q10013, doi: 10.1029/2008GC002188.
- Tamura, A., Arai, S., Ishimaru, S. and Andal, E. S., 2008. Petrology and geochemistry of peridotites from IODP Site U1309 at Atlantis Massif, MAR 30°N: micro- and macro-scale melt penetrations into peridotites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **155**, 491–509.
- Tamura, A., Morishita, T., Ishimaru, S. and Arai, S., 2014. Geochemistry of spinel-hosted amphibole inclusions in abyssal peridotite: insight into secondary melt formation in melt-peridotite reaction. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **167**: 974, doi: 10.1007/s00410-014-0974-x
- Tamura, Y., Busby, C. J., Blum, P., Guérin, G., Andrews, G. D. M., Barker, A. K., Berger, J. L. R., Bongiolo, E. M., Bordiga, M., DeBari, S. M., Gill, J. B., Hamelin, C., Jia, J., John, E. H., Jonas, A.-S., Jutzeler, M., Kars, M. A. C., Kita, Z. A., Konrad, K., Mahoney, S. H., Martini, M., Miyazaki, T., Musgrave, R. J., Nascimento, D. B., Nichols, A. R. L., Ribeiro, J. M., Sato, T., Schindlbeck, J. C., Schmitt, A. K., Straub, S. M., Vautravers, M. J. and Yang, Y., 2015. Site U1436. In Tamura, Y., Busby, C. J., Blum, P. and the Expedition 350 Scientists, eds., *Proc. IODP*, **350**: *Izu-Bonin-Mariana Rear Arc*: College Station, TX (International Ocean Discovery Program). doi: 10.14379/iodp.proc.350.103.2015
- Teagle, D. A. H., Alt, J. C., Umino, S., Miyashita, S., Banerjee, N. R., Wilson, D. S. and the Expedition 309/312 Scientists., 2006. *Proc. IODP*, **309/312**. Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc. Washington, DC., doi: 10.2204/iodp.proc.309312.2006.
- Teagle, D. A. H., Ildefonse, B., Blum, P. and the Expedition 335

- Scientists., 2012, *Proc. IODP*, **335**. Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc. Tokyo, doi: 10.2204/iodp.proc.335.2012.
- Tominaga, M., Teagle, D. A. H., Alt, J. C. and Umino, S., 2009, Determination of volcanostratigraphy of the oceanic crust formed at superfast spreading ridge: electrofacies analyses of ODP/IODP Hole 1256D. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **10**: Q01003, doi: 10.1029/2008GC002143.
- Tominaga, M. and Umino, S., 2010, Lava deposition history in ODP Hole 1256D: insights from log-based volcanostratigraphy. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **11**: Q05003, doi: 10.1029/2009GC002933.
- Tucholke, B. E. and Lin, J., 1994, A geological model for the structure of ridge segments in slow spreading ocean crust. *Jour. Geophys. Res.*, **99**: 11937, doi: 10.1029/94JB00338.
- Tucholke, B. E., Lin, J. and Kleinrock, M. C., 1998, Megamullions and mullion structure defining oceanic metamorphic core complexes on the Mid-Atlantic Ridge. *Jour. Geophys. Res.*, **103**, 9857–9866.
- Tutolo, B. M., Mildner, D. F. R., Gagnon, C. V. L., Saar, M. O. and Seyfried, W. E., Jr., 2016, Nanoscale constraints on porosity generation and fluid flow during serpentinization. *Geology*, **44**, 103–106.
- 海野 進(Umino, S.), 2003, 海洋地殻深度掘削の成果と課題(Reviews of Deep Drilling into Oceanic Crust). 地学雑(Jour. Tokyo Geogr. Soc.), **112**, 650–667.
- Umino, S., Nealson, K. and Wood, B., 2013, Drilling to Earth's mantle. *Phys. Today*, **66**, 36–41.
- 海野 進・下司信夫・熊谷英憲・岸本清行(Umino, S., Geshi, N., Kumagai, H. and Kishimoto, K.), 2008, 東太平洋海膨のオフリッジ火山はモホ遷移帯起源か(Do Off-ridge Volcanoes on the East Pacific Rise Originate from the Moho Transition Zone). 地学雑(Jour. Tokyo Geogr. Soc.), **117**, 190–219.
- Umino, S., Crispini, L., Tartarotti, P., Teagle, D. A. H., Alt, J. C., Miyashita, S. and Banerjee, N. R., 2008, Origin of the sheeted dike complex at superfast spread East Pacific Rise revealed by deep ocean crust drilling at Ocean Drilling Program Hole 1256D. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**: Q06008, doi: 10.1029/2007GC001760.
- Wilson, D. S., 1996, Fastest known spreading on the Miocene Cocos-Pacific plate boundary. *Geophys. Res. Lett.*, **23**(21), 3003–3006.
- Wilson, D. S., Teagle, D. A. H., Acton, G. D. and ODP Leg 206 Scientific Party, 2003, *Proc. ODP, Init. Repts.*, **206**. College Station: TX (Ocean Drilling Program). doi: 10.2973/odp.proc.ir.206.2003. Leg 206.
- Wilson, D. S., Teagle, D. A. H., Alt, J. C., Banerjee, N. R., Umino, S., Miyashita, S., Acton, G. D., Anma, R., Barr, S. R., Belghoul, A., Carlut, J., Christie, D. M., Coogon, R. M., Cooper, K. M., Cordier, C., Crispini, L., Durand, S. R., Einaudi, F., Galli, L., Gao, Y., Geldmacher, J., Gilbert, L. A., Hayman, N. W., Herrero-Bervera, E., Hirano, N., Holter, S., Ingle, S., Jiang, S., Kalberkamp, U., Kemeklian, M., Koepke, J., Laveme, C., Lledo Vasquez, H. L., MacLenna, J., Morgan, S., Neo, N., Nichols, H. J., Park, S.-H., Reichow, M. K., Sakuyama, T., Sano, T., Sandwell, R., Scheibner, B., Smith-Duque, C. E., Swift, S. A., Tarantotti, P., Tikku, A. A., Tominaga, M., Veloso, E., Yamasaki, T., Yamazaki, S. and Ziegler, C., 2006, Drilling to gabbro in intact ocean crust. *Science*, **312**, 1016–1020.
- Yamazaki, S., Neo, N. and Miyashita, S., 2009, Data report: whole-rock major and trace elements and mineral compositions of the sheeted dike-gabbro transition in ODP Hole 1256D. In D. A. H. Teagle, J. C. Alt, S. Umino, S. Miyashita, N. R. Banerjee, D. S. Wilson, et al., eds., *Proc. IODP*, **309/312**. Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc. Washington, DC., doi: 10.2204/iodp.proc.309.312.203.2009.
- Zhang, C., Koepke, J., Kirchner, C., Götze, N. and Behrens, H., 2014, Rapid hydrothermal cooling above the axial melt lens at fast-spreading mid-ocean ridge. *Sci. Rep.*, **4**: 6342, doi: 10.1038/srep06342.
- Zhao, X. and Tominaga, M., 2009, Paleomagnetic and rock magnetic results from lower crustal rocks of IODP Site U1039: implication for thermal and accretion history of the Atlantis Massif. *Tectonophysics*, **474**, 435–448.
- Zhou, H. and Dick, H. J. B., 2013, Thin crust as evidence for depleted mantle supporting the Marion Rise. *Nature*, **494**, 195–201.

## (著者プロフィール)



森下知晃 金沢大学理工研究域自然システム学系教授。93年 金沢大学理学部卒, 99年 金沢大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了(博士(理学)), 99年 日本学術振興会特別研究員, 01年 金沢大学理学部助教, 07年 金沢大学フロンティアサイエンス機構特任准教授, 12年から現職。研究内容: 地球深部起源物質科学。  
E-mail: morioka@staff.kanazawa-u.ac.jp.

## (要旨)

森下知晃, 2017, 中央海嶺産海洋プレート深部起源岩石掘削の成果と展望. 地質雑, **123**, 185–205. (Morishita, T., 2017, Drilling into deep-seated hard rocks of the oceanic plate formed at the Mid-Ocean Ridge: results and future perspectives: Deep-seated Hard Rock Drilling. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **123**, 185–205.)

本論では, 2003年–2013年の10年間の Integrated Ocean Drilling Program (IODP) で行われた掘削のうち, 中央海嶺で形成された海洋プレートの深部起源である斑れい岩やかんらん岩が採取された航海について, 記載岩石学的, 地球化学的内容を中心にまとめた。主要な貢献は(1)海洋コアコンプレックスの成因に関する 1400 m を超える斑れい岩が採取された大西洋アトランティス・マッシーフにおける掘削孔 U1309 (304/305 航海), (2) 高速拡大系ココスプレートで世界初の海洋斑れい岩採取された掘削孔 1256D (206, 309, 312, 335 航海), (3) 高速拡大系の東太平洋海膨ヘス・ディープからの層状斑れい岩が採取された掘削孔 U1415 (345 航海) である。また掘削調査船「ちきゅう」を用いた将来的なマンテル掘削を含む海洋深部岩石掘削計画について紹介した。