古い海洋プレートの沈み込み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

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*****

Overview of the Drilling Project on the Bend-fault Hydrology in Old Incoming Plate

Tomoaki MORISHITA*, Gou FUJIE**, Makoto YAMANO***, Masao NAKANISHI****,
Koichiro OBANA**, Yasuyuki NAKAMURA**, Saneatsu SAITO**, Shuichi KODAIRA**,
Jun-ichi KIMURA*****, Junichiro KURODA***** and Shigeaki ONO*****

[Received 31 May, 2016; Accepted 26 July, 2016]

Abstract

It is generally accepted that hydration due to plate bending-induced normal faults (bend-faults) occurs in the region between a trench and an outer rise. Hydration of the oceanic plate has played a major role in global deep water circulation, as well as co-seismic megathrust slip at subduction zones. It is, however, emphasized that little is known yet about the degree and mode of hydration in the oceanic plate at outer rises. Investigating several subduction zones with various conditions is crucial to expand our knowledge of bend-fault hydration processes. The northwest Pacific (NW Pacific) region is one of the oldest, thus coldest, and most studied oceanic plates. Water circulation and hydration through bend-faults in the NW Pacific region are supported by the results of extensive recent geophysical surveys: (1) best-developed horst and graben structures, (2) high V_p/V_s ratio beneath the outer rise region, and (3) anomalously high heat flow. It is noted that tensional stress in the incoming plate is assumed to have extended to depths of 40 km during and after the 2011 Tohoku Earthquake, whereas it is shallower than 40 km for previous earthquakes. The projections of epicenters of microearthquakes after the 2011 Tohoku Earthquake are aligned with topographic lineation of horst and graben structures in the outer rise region. These lines of evidence suggest that hydration has progressed extensively to deeper sections of the oceanic plate since the 2011 Tohoku Earthquake. To address (a) hydration processes and their extents along the bend-fault and (b) physical properties of the bend-fault, in-situ physical properties and lithofacies are best obtained by ocean drilling in the NW Pacific region.

* 金沢大学理工研究域自然システム学系

** 海洋研究開発機構横浜研究所

*** 東京大学地震研究所

**** 千葉大学大学院理学研究科

***** 海洋研究開発機構横須賀研究所

* School of Natural System, College of Science and Engineering, Kanazawa University, Kanazawa, 920-1192, Japan

** Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokohama, 236-0001, Japan

*** Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, 113-0032, Japan

**** Graduate School of Science, Chiba University, Chiba, 263-8522, Japan

***** Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokosuka, 237-0061, Japan

Key words : incoming oceanic plate, outer rise, ocean drilling, subduction zone, volatile cycling, plate boundary earthquake

キーワード：海洋プレート、アウターライズ、海洋掘削、沈み込み帯、揮発性元素循環、プレート境界地震

I. 序 論

海洋プレートの物質化学状態や応力状態の観測は、島弧火成活動やプレート境界型地震といった沈み込み帯で起きる自然現象に密接に関連するだけでなく、地球規模での元素循環や地球史解読などの地球科学的問題解明に大きく貢献する。沈み込む海洋プレートを介する物質循環に関しては、沈み込み帯での詳細な物理探査、広域的な島弧火山岩の化学組成分析・空間変化の結果に加え、沈み込む海洋プレート物質とその加水程度を仮定した仮想海洋プレート総化学組成を設定し、その後の変成作用に伴う脱水や、脱水した流体と周囲の岩石の反応などを考慮したシミュレーション結果を相互に比較することで詳細な議論がなされている (Kawakatsu and Watada, 2007; Hacker, 2008; van Keken *et al.*, 2011; Kimura and Nakajima, 2014; Kelemen and Manning, 2015)。海洋プレートの加水から脱水までの水輸送に関するレビューは、Faccenda (2014) でまとめられているので参考にされたい。この海洋プレートの物質科学のなかで、もっとも基本であるにもかかわらず未解決な問題は、海洋プレートの加水程度 (深度・範囲) とその素過程である。

海洋プレートを構成する岩石類は、陸上に露出する過去の海洋プレート物質であるオフィオライト研究などとの比較により、玄武岩質の海洋地殻と上部マントルを構成していると考えられているかんらん岩で構成されていると考えられてきた (Anonymous, 1972)。しかしながら、海洋プレートの物理探査に加え海洋底からの直接試料採取によって、低速拡大海域の海洋底には、海洋プレートの下部地殻・最上部マントルを構成していた岩石類が広範囲に露出していることが明らかにされるなど (例えば, Cannat *et al.*, 1995; Tucholke

et al., 1998; Buck *et al.*, 2005; Dick *et al.*, 2006; Escartin *et al.*, 2008)、海洋プレートの拡大速度を考慮した議論が必要である。本論では、高速拡大海域に期待される玄武岩組成のマグマが関与する火成作用によって海洋地殻が形成される海洋プレートを想定している。

海洋プレートは、火成作用による玄武岩質海洋地殻の形成直後から、中央海嶺近傍に発達する断層によって海水が循環し、変成・変質作用などによって物理・化学特性が変化する (例えば, Alt *et al.*, 1996; Bach *et al.*, 2003)。さらに、海嶺軸から離れても、海洋プレートの熱流量測定の結果から海洋プレート形成後から 6500 万年程度までは、海水との反応が進行している可能性が指摘されている (Jacobson, 1992; Stein and Stein, 1994)。実際に、6.6 Ma, 15 Ma の形成年代をもつ海洋プレートにおいて、玄武岩層からシート状岩脈群 (および最上部はんれい岩) まで 1500 m 以上の深度から掘削にされた試料では、含水鉱物の形成を伴い玄武岩層は緑色片岩相、シート状岩脈群は角閃岩相当の変成作用を受けていることが明らかになっている (Bach *et al.*, 2003; France *et al.*, 2009; Koepke *et al.*, 2011)。これらの成果と 109 Ma の形成年代をもつ海洋プレートからの玄武岩掘削試料の成果 (Alt and Honnorez, 1984) を総合的に考えると、海洋プレート上部 500 m 程度は、海嶺軸から離れた場所においても海水による低温の変成・変質作用の影響を受けているといえる。海洋プレート上部 500 m 程度までの透水率 (10^{-16} – 10^{-13} m²) はそれより下位での浸透率 (10^{-18} – 10^{-13} m²) よりも桁違いに大きいと推定されており (Fisher, 1998)、このことは海洋プレート地殻最上部 500 m 程度が長期間にわたり、海水による低温までの変成・変質を受けていることを支持する。海洋プレートの局所的

な加水要因としては、トランスフォーム断層・断層帯 (Detrick *et al.*, 1993; Van Avendonk *et al.*, 1998; Gregg *et al.*, 2007; Roland *et al.*, 2010), および海山 (Fisher *et al.*, 2003) やホットスポット (Seno and Yamanaka, 1996) が指摘されている。トランスフォーム断層・断層帯では、上部マントルまで海水が浸透し、蛇紋岩化が起きていると考えられている (Detrick *et al.*, 1993; Van Avendonk *et al.*, 1998; Gregg *et al.*, 2007; Roland *et al.*, 2010)。Fisher *et al.* (2003) では、海山近傍では、基盤岩類中の断層や割れ目が発達し、海水の浸透率が上昇している可能性を指摘している。一方、Seno and Yamanaka (1996) は、海水の

浸透ではなく、ホットスポットマグマのような深部起源マグマがプレート深部に定置し、結晶化する過程で水を主成分とする流体が分離し、海洋プレート深部を加水させる可能性を指摘している。

これらに加え、近年の物理探査の結果から、海洋プレートが沈み込む直前のプレート屈曲部における地形的高まり (アウターライズ) から海溝までの張力場で断層が形成され、その断層を水の通り道として、海洋プレートが上部マントルまで大規模に加水し、海洋プレートの物質化学や応力状態を大規模に変化させている可能性が指摘されている (例えば, Ranero *et al.*, 2003; Fujie *et al.*, 2013) (図 1)。Nakajima *et al.* (2011) では、

図 1 海洋プレートの加水テクトニクスに海洋掘削計画を示した概念図。海洋プレートは、中央海嶺近傍の断層運動によって加水する。その後、トランスフォーム断層やアウターライズ近傍でのプレート屈曲に伴う断層運動によって加水することが予想されている。また、海洋プレート深部では、ホットスポットなどのマグマ活動に伴い加水している可能性も指摘されている (Seno and Yamanaka, 1996)。現行の IODP では、中央海嶺近傍での熱水活動の解明が進められている。海洋プレートをマントル深度まで掘削するマントル掘削計画 (Moho to Mantle, M2M 計画: Umino *et al.*, 2013) も示した。プチスポット火山 (Hirano *et al.*, 2006) 中の捕獲岩は、古い海洋プレート深部の物質科学情報を与えてくれる貴重な研究対象である (平野ほか, 2010)。

Fig. 1 Schematic tectonic diagram showing hydration of the oceanic plate with the target of the ocean drilling program on bending-induced fault hydration. The oceanic plate is hydrated at mid-ocean ridges by hydrothermal activities, followed by hydration along transform faults and bending-induced faults at the outer rise region. Hydration might occur at the middle of the oceanic plate due to magmatic dehydration of hot spots (Seno and Yamanaka, 1996). The current IODP has revealed hydration processes at mid-ocean ridges. The Pacific mantle drilling project (Moho to Mantle = M2M: Umino *et al.*, 2013) is also shown. Xenoliths captured in Petit spot volcanoes (Hirano *et al.*, 2006) provide unique opportunities to investigate deeper sections of the old oceanic plate (Hirano *et al.*, 2010).

東北日本の下に沈み込む海洋プレート中で発生した地震 ($M7.1$) の解析を行い、アウターライズ域での断層により沈み込む直前の上部マントルの 15 km 深度まで局所的に断層で加水した場所が震源になっている可能性を指摘した。これらの背景から、中米コスタリカ沖と北西太平洋域の 2 か所においてプレート沈み込む直前屈曲断層に伴う加水作用に関連した予備掘削提案が国際深海科学掘削 (IODP) に申請されている (図 2)。

北西太平洋域は世界でもっとも古い海洋プレートが沈み込むため、冷たい海洋プレートの沈み込みの端成分として重要である。また、北西太平洋域である日本周辺は、世界でもっとも地震観測環境が整備され、さらに東北の火山活動は、世界でもっとも詳細に研究されている地域である (例えば, Kimura *et al.*, 2009; Kimura and Nakajima, 2014)。さらに、東北沖では、2011 年の東北沖太平洋地震で生じた断層からの掘削試料採取 (JFAST) に成功しており (Chester *et al.*, 2013)、同地域では、さらなるプレート境界物質採取計画 (JTRACK) も提案されている (Kirkpatrick *et al.*, 2015)。このように、北西太平洋地域は、沈み込む海洋プレートに伴う地質学的現象を包括的に理解するために世界でもっとも適した場所といえる。とくに、数 100 年から 1000 年周期の大規模な地震である東北地方太平洋沖地震の直後であることは、注目すべき点である。後述するように、この大地震による海洋プレート内の状態変化によって、現在、海洋プレート深部まで大規模に加水が起きている可能性がある。さらに、大地震と連動する可能性があるアウターライズ域で地震 (アウターライズ地震) の発生との関連も想定される。そこで、本稿では、プレート沈み込む直前屈曲断層に伴う加水作用に関する研究のまとめと、とくに北西太平洋域の海洋掘削計画についての概要を中心に紹介する。

II. プレート沈み込み直前領域の物理探査成果

1) 地形が示す特徴：地塁・地溝構造の発達

海溝からアウターライズの間で正断層による地塁・地溝の構造が発達していることは広く知られ

ており、既存の海洋プレートによる構造、海洋プレートの進行方向、海溝軸とスラブ傾角との関係から正断層発達メカニズムについて検討されている (例えば, Masson, 1991; Nakanishi, 2011)。

中米コスタリカ沖では、正断層によって落ち込んだ地溝が観察される (Ranero *et al.*, 2003) (図 3a)。ここでは、縞状磁気異常から推定される過去の拡大海嶺軸方向と海溝軸の方向との角度がほぼ平行であることから、過去海嶺軸で形成された構造的弱線 (海嶺状構造) の再活動による断層運動が起きている可能性が指摘されている (Ranero *et al.*, 2003, 2005)。一方、北西太平洋域である千島海溝、日本海溝付近では、深さ 6000 m よりも深い海溝側で地塁・地溝地形がよく発達していることが知られている (Masson, 1991; Kobayashi *et al.*, 1998; Tsuru *et al.*, 2000; Nakanishi, 2011; Nakamura *et al.*, 2013) (図 3c, 4a)。地塁・地溝構造が発達する方向と縞状磁気異常との関係から、海洋底拡大に起因する構造的弱線 (海嶺状構造、断裂帯) と海溝軸の角度が 30° 以内の場合は、構造的弱線の再活動で地溝構造が卓越して形成される傾向があることが指摘されている (Nakanishi, 2011)。それに対して、過去の海洋底拡大に起因する構造的弱線と海溝軸の角度が大きい場合は、構造的弱線方向の他に、海溝軸に平行な地塁・地溝構造が発達している (Nakanishi, 2011)。

2) 物理探査結果から推定されるプレート沈み込み直前での海洋プレートの改変

中米コスタリカ沖では、反射法地震探査断面図からは、海底面に高角で斜行する地震波反射面が観察されている (Ranero *et al.*, 2003) (図 3a)。この反射面のなかには、正断層により形成された海洋底の地塁構造からモホ面を通過し、マントル深度まで達しているようにみえるものもある。一方、北西太平洋沖では、このような深度での地震波反射面は明瞭には確認されていない (Nakamura *et al.*, 2014) (図 3c)。

中米・コスタリカ沖の調査からは、沈み込む直前の海洋プレートに正断層が発達しているアウターライズと海溝の間 (海溝から 80 km 以内の距

図 2 (a) 太平洋の海底地形図にプレート屈曲断層掘削案2つ(北西太平洋 H-ODIN と中米 BFS)の候補地点とマン
トル掘削(Moho to Mantle: M2M 計画)候補地点を示した図。H-ODIN は Bending Fault Hydrology in the Old
Incoming Plate, BFS は Bend-Fault Serpentinization: Oceanic Crust and Mantle Evolution from Ridge through
Trench を意味する。(b) 北西太平洋域の海底地形図に、H-ODIN 計画の東北沖(THK-1A)と北海道沖(HKD-
1A)の掘削候補2地点を示した図。いずれの海底地形図もコロンビア大学ラモント地球科学研究所が開発して
いる GeoMapApp を使用して作成した。

Fig. 2 (a) Bathymetric map of Pacific Ocean showing locations of two IODP pre-proposals on hydration in the incoming
plate (H-ODIN of the Northwest Pacific and BFS of the Middle American) and two potential sites for the Moho
to Mantle (M2M) drilling project (M2M-Hawaii and M2M-Cocos). H-ODIN = Bending Fault Hydrology in
the Old Incoming Plate, BFS = Bend-Fault Serpentinization: Oceanic Crust and Mantle Evolution from Ridge
through Trench. (b) Bathymetric map of the northwest Pacific area showing the locations (shown by stars)
of potential H-ODIN sites at off-Tohoku (THK-1A) and off-Hokkaido (HKD-1A) area. Bathymetric maps are pre-
pared by GeoMapApp developed at Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, USA.

a: Cocos plate

b: Cocos plate

c: Northwest Pacific

図 3 (a) 中米沖候補海域の反射法地震探査断面図の例。ねずみ色の破線はマントル深度まで到達するようにみえる地震波反射面を示した。Ranero *et al.* (2003) の図に加筆。 (b) 中米沖候補海域の P 波速度異常図。Ivandic *et al.* (2008) の図を簡略化し、加筆した。 (c) 東北沖海域の反射法地震探査断面図の例。Nakamura *et al.* (2014) の図に加筆した。

Fig. 3 (a) A multi-channel seismic reflection image of the middle American site modified from Ranero *et al.* (2003). Broken grey lines are estimated Bend-faults that reached the mantle depth. (b) Velocity anomalies from inversion of PmP phases in the crust and upper mantle beneath the middle American site modified from Ivandic *et al.* (2008). (c) A multi-channel seismic reflection image (modified from Nakamura *et al.*, 2014) of a part of A-B line of Fig. 2b.

図 4 (a) 北西太平洋域のプレートの屈曲によって形成された地形の分布。黒色、薄い灰色の実線は、それぞれ陸側および海側に傾斜した急崖地形を表す。灰色領域は、アウターライズに相当する領域を、薄い灰色領域は海山と解釈される地形的な高まり。(b) 縞状磁気異常図。数字がついたMを伴う実線は縞状地磁気異常が示す線構造で、点線は断裂帯を表す。北緯36-39°付近の破線は、伝播性拡大(propagating rift: PR)によって生じたと解釈される擬似断層を表す。いずれもNakanishi (2011) に加筆。

Fig. 4 (a) Distributions of bending-induced topographic structures in the Northwest Pacific region (modified from Nakanishi, 2011). Light grey and black solid lines represent landward- and oceanward-dipping escarpments, respectively. Dark shaded areas outline outer rise regions. Light grey areas are topographic heights interpreted as seamounts. (b) Magnetic anomaly lineations (modified from Nakanishi, 2011). Solid lines with M-number and dotted lines show magnetic anomaly lineations and fracture zones (KFZ, NFZ), respectively. Dashed lines around 36-39°N are possible pseudofaults caused by abandoned propagating spreading ridge (PR).

離)の下部地殻・上部マントル相当の深度でのP波速度を測定し、この部分より離れた場所の高速拡大海域でのそれらと比較して速度の低下が観察されることを示した(Ranero and Sallarés, 2004; Grevenmeyer *et al.*, 2007; Ivandic *et al.*, 2008, 2010; Van Avendonk *et al.*, 2011)(図3b)。前述したマントル深度に達する地震反射面の存在と下

部地殻・上部マントル相当の深度でのP波速度の減少は、屈曲断層に沿った海水の侵入に伴い上部マントルが蛇紋岩化しているためと解釈されている(Ranero and Sallarés, 2004; Grevenmeyer *et al.*, 2007; Ivandic *et al.*, 2008, 2010; Van Avendonk *et al.*, 2011)。中米沖の電気伝導度は電気比抵抗の減衰、断層に沿った電磁気構造の異

方が観察されることが示され、断層が発達しているアウターライズ地域下の空隙の増加と、断層に伴う加水の影響であると解釈されている (Key *et al.*, 2012)。Ivandic *et al.* (2010) は海溝軸に平行な方向での地震波測定により、海山下での P 波の低速度異常を報告し、既存の海洋プレート物質が海山の形成に伴い空隙率が上昇することが水循環の要因になっているとする説 (Fisher *et al.*, 2003) を支持しているとした。

北西太平洋地域は世界でもっとも V_P/V_S 構造の変化の解釈が進んでいる (Fujie *et al.*, 2013) (図 5)。千島沖では、海溝から 140 km 離れたところから V_P/V_S 比の増加が観察される (図 5)。この高 V_P/V_S 領域は、海洋プレート中の水含有量が高い可能性を示すが、流体の存在形態は不明である。

3) 熱流量の正異常

日本海溝の海側では、海溝軸から約 150 km 以内の海域において、年齢が 1 億年を超える海洋プレートの熱流量として期待される 50 mW/m^2 よりも明瞭に高い値 ($70\text{--}110 \text{ mW/m}^2$) が、多くの点で測定されている (Yamano *et al.*, 2014) (図 6)。この高熱流量異常は、プレートの変形による破碎のため、海洋地殻内の高い浸透率をもつ層が厚くなり、流体循環が熱を汲み上げることで説明されることが提案されている (Kawada *et al.*, 2014)。

4) プレーートの屈曲による地震メカニズム解析

北西太平洋地域は、屈曲断層に伴うアウターライズ域での地震活動 (アウターライズ地震) が繰り返し起きていることが知られている (Kanamori, 1971; Hino *et al.*, 2009; Obana *et al.*, 2012)。Kanamori (1971) では 1933 年の三陸沖地震を

図 5 北海道沖の海洋プレート内 (図 2b) の V_P/V_S 比の変化を示す断面図。Fujie *et al.* (2013) を簡略化し、加筆。高 V_P/V_S 比を示す領域は、プレート屈曲による断層が発達している領域の深部に相当する。

Fig. 5 Variations in V_P/V_S ratio of a section in Fig. 2b (modified from Fujie *et al.*, 2013). Note that V_P/V_S ratio is high at the Outer rise area where Bending-induced faults are assumed to have developed.

図 6 東北沖の熱流量断面図の例。Yamano et al. (2014) に加筆。

Fig. 6 Cross-sectional variations in heat flow measurements along a line of Fig. 2 (modified from Yamano *et al.*, 2014).

解析し、地震を引き起こした断層が海洋プレート全体を断ち切るような正断層であった可能性を指摘している。

東北地方太平洋沖地震後に発生した地震のメカニズム解析では海洋プレートの深さ 40 km 付近まで正断層型のメカニズム解をもつ地震が記録されているのに対し（図 7）、地震前は深さ 20 km 付近までしか正断層メカニズムの地震が記録されていない（Hino *et al.*, 2009, Obana *et al.*, 2012）。このことは、東北地方太平洋沖地震の前後で、海洋プレート内の伸長・圧縮応力の分布に変化が起きていることを示唆する（図 8）。さらに、東北地方太平洋沖地震後の微小地震の分布が、その地域に発達する地塁・地溝構造が示す方向に分布している（Obana *et al.*, 2012, 2014）（図 9）。このことは、現在、東北沖の少なくとも海域の一部は、屈曲による断層運動が起きていると考えられる。

北西太平洋域では、東北地方太平洋沖地震という数 100 年から 1000 年に 1 回の大地震イベントに伴う大規模なプレートの加水・変質が今現在起きている可能性が高く（図 7）、さらにアウターライズ地震の発生が目前に迫っている。

III. 北西太平洋沖掘削計画の概要

1) 掘削の科学目的

本掘削計画の対象は太平洋北西部の古く冷たい海洋プレートの屈曲に伴う断層帯である。本掘削の科学目的は（1）プレートの屈曲断層に伴う加水過程とその影響範囲、（2）プレート屈曲断層の物質・物理特性の解明である。それぞれ、プレ-

ート沈み込みに伴う地球深部への物質流入量に対する制約、アウターライズ地震メカニズムの解明に貢献する。

プレート屈曲断層に関連したシミュレーション結果からは、プレートの屈曲による断層運動によって断層に沿った負の圧力勾配が生じ、それが海水浸透の駆動力であることが予想されている（Faccenda *et al.*, 2009）。しかしながら、変質鉱物の形成による隙間を埋める影響など、断層に伴う加水過程で起きている現象は物質科学的に明らかにされていない。プレート屈曲断層によって、海水はどの深度まで到達するのであろうか？ また、本掘削成果は、沈み込む海洋プレート物質およびその間隙水も含めた水・元素分布を明らかにすることで沈み込む海洋プレートを介して供給される水の量とその状態についての基礎データとなる。

プレート屈曲断層の基本的な情報である断層面・断層帯のスケール、構成物質、応力状態を分析・測定する。プレート屈曲断層によって発生した過去の地震の規模の推定や、これまでの断層運動の記録などを解読することによって、アウターライズ地震との関連性やそのメカニズムの解明に貢献する。また、東北沖太平洋地震の断層掘削（JFAST）で行われたように、実際の断層試料を用いた室内での摩擦実験（Ujiie *et al.*, 2013）により、断層の物性解明に直接的に貢献できる。これらの解析が進めば、北西太平洋域海洋プレート上部で観測されている高 V_p/V_s 比（Fujie *et al.*, 2013）の要因も明らかにすることが期待される。

図 7 (a) 東北沖太平洋地震後の震央分布図。震央データは海底地震計 (OBS) で測定された。海底地震計の位置は、逆三角形の記号で示されている。(b) 海底地震計による観測によって得られた発震機構解を(a)の太い点線段面上に投影した図。細い破線は、Miura *et al.* (2005) で得られた地震波測定によって得られた沈み込む海洋地殻の上面。(c) レーキ角と深度の関係。データは、Obana *et al.* (2012) で得られたものから作成。

Fig. 7 (a) Hypocenter distribution after the 2011 Tohoku earthquake. Data are from an array of ocean bottom seismographs (OBS) observations. Inverted triangles show OBS locations. (b) Projection of focal mechanisms and earthquakes from OBS observations onto the cross-section indicated by the thick broken line of (a). The thin broken line on the cross-section represents the top of the subducting oceanic crust as interpreted from seismic survey data (Miura *et al.*, 2005). (c) Rake angle versus depth. Data are from Obana *et al.* (2012).

2) 掘削計画

本掘削計画の掘削候補地点として、北海道沖と東北沖から2地点を提案している(図2)。北西太平洋域である千島海溝、日本海溝付近は、世界のなかでも古い海洋プレートが沈み込む場所であるため、水深が深い。そこで、掘削技術も考慮し、

地塁・地溝構造が観察され始める水深 6000 m 前後の海域を想定している。この深度では掘削孔の崩落を防ぎ、高密度泥水でパイプ内の掘削によって生じる破片を排出させるライザー掘削技術は使用できない。これらに加え、現在の IODP の掘削期間 2 か月で掘削船ちきゅうで掘削可能な深度

図 8 東北沖の地震メカニズム解析によるプレート内の応力変化を模式的に示した図。巨大地震およびその後の地震活動によって引張による正断層が 40 km にまで達しているのに対して、巨大地震以前の中規模地震では、引張による正断層は 40 km よりも浅部までしか達していない。

Fig. 8 Schematic diagrams showing stress field in the incoming plate estimated from earthquakes around outer rise regions in the off-Tohoku area. Tensional stress is assumed to have extended to depths of 40 km after a mega earthquake (such as 2011 event) (lower one), whereas it is shallower than 40 km for mid-sized earthquakes before the mega earthquake (upper one).

Earthquakes in the Oceanic crust
(Depth: 0-14 km)

図 9 3次元海底地形図に投影した 2011 年東北沖太平洋地震後の微小地震震央分布。データは、Obana *et al.* (2012) で得られたものから作成。

Fig. 9 Relationships between projection of epicenters of microearthquakes after the 2011 Tohoku Earthquake and topographic lineations of horst and graben structures (white arrows) in the outer rise region (Fig. 2b) (data from Obana *et al.*, 2012).

を考慮すると、堆積物層の厚さを概ね 500 m 程度と見込み、さらに基盤岩を 1000 m 掘削する間に断層に到達可能な掘削地点を選ぶ必要がある。

上述したように、現在までに得られた北西太平洋地域の反射法地震探査断面図からは、中米沖で観察されているような断層を示す反射面が観察さ

れない (図 3c)。ただし、断層が存在していたとしても、断層に沿って物性が変化しなければ反射面は観察されないことから、断層がないということの意味するわけではない。さらに、モホ面に相当する反射面には、明瞭なモホ面と明瞭でないモホ面の領域があるようにもみえることから、断層

に沿ったなんらかの改変を受けている可能性がある。掘削地点の決定には、断層を推定することが鍵となるため、今後の詳細な物理探査に基づいた検討が必要である。

3) 掘削候補地点の違い：太平洋プレートの既存構造との関係

北西太平洋地域の縞状磁気異常から、太平洋プレートの過去の実軸方向が推定できる。過去の実軸方向は北海道沖の千島海溝の方向とほぼ平行であるが、東北沖の日本海溝の方向とは、高角度で斜行している（図4）。そのため、千島海溝では、過去の実軸活動で形成された断層がアウトライズ域で再活動する可能性がある。一方、日本海溝近傍の沈み込むプレートには、過去の実軸での活動によって形成された断層とは異なる新たな屈曲断層が形成されると予想される。いずれの場所であっても、プレートの屈曲によって形成された断層の効果を検討するには、断層の形成年代の決定などの問題がある。

さらに詳細に縞状磁気異常を観察すると、北緯37-39°付近では、縞状磁気異常がより入り組んだ複雑な構造を示す（図4）。この部分は、伝播性の拡大軸の活動により形成された擬似断層である可能性が指摘されている（Nakanishi, 2011）。この海域では、東北沖地震後の微小地震の震源の分布方向は海溝軸に平行な方向と、伝播性の拡大軸の影響によって形成された擬似断層と同じ方向の2方向に卓越している（Obana *et al.*, 2012）（図9）。このことは、過去の実軸で形成された既存の断層の再活動とプレートの屈曲に伴う新しい断層の形成の両方が関与していることを意味している可能性があり、千島沖と同様に、既存断層との区別が課題となる。

4) 北西太平洋掘削で達成される固有な研究課題

海洋掘削計画では、主要な研究目的以外にも掘削試料の解析によってのみ解決する固有の問題も重要である。北西太平洋域の掘削では1億数千年前の太平洋プレートの基盤岩および堆積物が採取される。また、既存研究や将来研究計画も豊富である。そこで、この試料を用いて解決が見込ま

れる固有の研究課題のいくつかについて簡単に紹介する。

沈み込み帯でのプレート境界面の物性は、プレート境界型地震の発生メカニズムを解明する鍵となる。東北沖では、東北沖太平洋地震で生じた断層からの掘削試料（JFAST）に加え、さらなるプレート境界物質が採取される可能性がある（JTRACK）（Kirkpatrick *et al.*, 2015）。JTRACK計画では、海洋プレートが沈み込む直前のできるだけ変形・変質を受けていない海洋プレート堆積物の採取も計画されており、本掘削で採取される断層の影響を受けた海洋プレートとの堆積物組成、堆積物中の浸透率、応力状態の測定結果との比較は、沈み込み帯プレート境界面の物性解明に向けた沈み込む海洋プレート最上部の堆積物の組成・状態の影響について重要な情報を与えてくれる。

堆積物に着目すると、白亜紀の堆積物が採取されることが期待される。温暖だったと考えられている白亜紀の中頃では、有機物に富む黒色頁岩が堆積するイベントがほぼ全球的に起きていたことが認識され、海洋無酸素事変（Oceanic Anoxic Event: OAE）と呼ばれている（Schlanger and Jenkyns, 1976; 黒田ほか, 2010 参照）。しかしながら、地球最大の面積を有する太平洋遠洋域の深海盆において有機質黒色頁岩が堆積したかについては、いまだに解明されていない。それは、太平洋の深海盆での白亜系掘削の実績が少ない（中生界が太平洋プレート北西部に限られる）ことと、チャートを挟む岩相で回収率が極端に低いことが原因である。このため、単に黒色頁岩の回収に成功していない（存在するのに回収できない）のか、太平洋深層は黒色頁岩が堆積する環境ではなかったのかわかっていない。太平洋の深海盆は黒色頁岩が堆積するような貧酸素～無酸素環境となっていたのかというOAEの本質にかかわる問題が、長年未解明のまま今日に至る。近年、硬軟互層の高回収率掘削に向けた様々な技術開発が進められており、また孔内検層技術の発展により黒色頁岩のようにウランやカリウムに富む層準を正確に検出することが可能になっている。地球深部探査船

「ちきゅう」を用いた北西太平洋での掘削により、検層により黒色頁岩層の存在の有無を評価し、検出された場合はその層準をピンポイントで回収することが期待できる。これにより、太平洋深層での OAE に関連した海洋環境変動の全体像の理解が飛躍的に進むはずである。

基盤岩の同位体組成の決定は、太平洋のテクトニクス、地球規模のマントル不均質性を理解する上で重要な情報を与えてくれることが期待される。太平洋は、同位体組成的に比較的均質なマントルで構成されていると考えられており、太平洋型マントルと呼ばれ、それに対して、鉛同位体比が特異な特徴を示すインド洋型玄武岩 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比に対して、高い $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比を示す) およびそれを形成するインド洋型マントルが存在する (Straub *et al.*, 2009; Miyazaki *et al.*, 2015; 木村ほか, 2017 を参照)。このインド洋型・太平洋型マントルの境界が北西太平洋にあるとされており、本地域から基盤岩が得られれば、貴重な物証となる。

IV. 最 後 に

北西太平洋沿岸は人口密集地域であるため、プレート沈み込みに伴う自然災害への対策は今後も重要な研究課題である。そのなかでも、本掘削対象地は、数 100 年から 1000 年程度に一度のマグニチュード 9 クラスの巨大地震により、海洋プレートの大規模加水が進行し、さらにアウトラーズ地震発生が起こる可能性が高く、われわれは貴重な研究機会に直面しているといえる。東北沖太平洋地震で生じた断層からの掘削試料採取 (JFAST) 成果 (Chester *et al.*, 2013)、今後のプレート境界物質採取計画 (JTRACK) など、北西太平洋地域は、プレート沈み込み直前研究の最前線となることが期待される。また、プレート沈み込み直前の改変を理解するためには、改変前の状態を知っておかねばならない。そのためには、普通の太平洋プレートのマントル掘削を目指す海洋掘削計画 (Moho to Mantle: M2M 計画, Umino *et al.*, 2013) の推進も重要である。

謝 辞

金沢大学の海野進教授、水上知行博士、田村明弘博士、曾田祐介博士らとの海洋プレートに関する議論は有益であった。東京大学地震研究所の本多 了教授には本稿をまとめる機会をいただいた。本稿は、氏家恒太郎博士および匿名の査読者のコメントによって大きく改善された。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. and Honnorez, J. (1984): Alteration of the upper oceanic crust, DSDP site 417: Mineralogy and chemistry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **87**, 149–169.
- 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. 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). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **148**, 417–434.
- Anonymous (1972): Penrose field conference on ophiolites. *Geotimes*, **17**, 24–25.
- Bach, W., Peuccker-Ehrenbrink, B., Hart, S.R. and Blusztajn, J.S. (2003): Geochemistry of hydrothermally altered oceanic crust: DSDP/ODP Hole 504B-implications for seawater-crust exchange budgets and Sr- and Pb-isotopic evolution of the mantle. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **4**, 8904, doi: 10.1029/2002GC00419.
- Buck, W.R., Lavier, L.L. and Poliakov, A.N.B. (2005): Modes of faulting at mid-ocean ridges. *Nature*, **434**, 719–723.
- Cannat, M., Mével, C., Maia, M., Deplus, C., Durand, C., Gente, P., Agrinier, P., Belarouchi, A., Dubuisson, G., Humler, E. and Reynolds, J. (1995): Thing crust, ultramafic exposures, and rugged faulting patterns at the Mid-Atlantic Ridge (22–24°N). *Geology*, **23**, 49–52.
- Chester, F.M., Rowe, C., Ujiie, K., Kirkpatrick, J., Regalla, C., Remitti, F., Moore, J.C., Toy, V., Wolfson-Schwehr, M., Bose, S., Kameda, J., Mori, J.J., Brodsky, E.E., Eguchi, N., Toczko, S. and Expedition 343 and 343T Scientists (2013): Structure and composition of the plate-boundary slip zone for the 2011 Tohoku-Oki Earthquake. *Science*, **342**, 1208–1211.
- Detrick, R.S., White, R.S. and Purdy, G.M. (1993): Crustal structure of North Atlantic fracture zones. *Reviews of Geophysics*, **31**, 439–458.
- 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.
- Escartín, 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**, 790–795.
- Faccenda, M. (2014): Water in the slab. A trilogy. *Tectonophysics*, **614**, 1–30.
- Faccenda, M., Gerya, T. and Burlini, L. (2009): Deep slab hydration induced by bending-related variations in tectonic pressure. *Nature Geoscience*, **2**, 790–793.
- Fisher, A.T. (1998): Permeability within basaltic oceanic crust. *Reviews of Geophysics*, **36**, 143–182.
- Fisher, A.T., Davies, E.E., Hutnak, M., Spiess, V., Zühlsdorff, L., Cherkaoui, A., Christiansen, L., Macdonald, R., Villinger, H., Mottl, M.J., Wheat, C.G. and Becker, K. (2003): Hydrothermal recharge and discharge across 50 km guided by seamounts on a young ridge flank. *Nature*, **421**, 618–621.
- 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. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **10**, doi:10.1029/2009GC002652.
- Fujie, G., Kodaira, S., Yamashita, M., Sato, T., Takahashi, T., and Takahashi, N. (2013): Systematic changes in the incoming plate structure at the Kuril trench. *Geophysical Research Letters*, **40**, 88–93.
- Gregg, P.M., Lin, J., Behn, M.D. and Montési, G.J. (2007): Spreading rate dependence of gravity anomalies along oceanic transform faults. *Nature*, **448**, 183–188.
- Grevemeyer, I., Ranero, C.R., Flueh, E.R., Kläschen, D. and Bialas, J. (2007): Passive and active seismological study of bending-related faulting and mantle serpentinization at the Middle America trench. *Earth and Planetary Science Letters*, **258**, 528–542.
- Hacker, B.R. (2008): H₂O subduction beyond arcs. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **9**, doi:10.1029/2007GC001707.
- Hino, R., Azuma, R., Ito, Y., Yamamoto, Y., Suzuki, K., Tsushima, H., Suzuki, S., Miyashita, M., Tomori, T., Arizono, M. and Tange, G. (2009): Insight into complex rupturing of the immature bending normal fault in the outer slope of the Japan Trench from aftershocks of the 2005 Sanriku earthquake ($M(w) = 7.0$) located by ocean bottom seismometry. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **10**, doi:10.1029/2009GC002415.
- Hirano, N., Takahashi, E., Yamamoto, J., Abe, N., Ingle, S.P., Kaneoka, I., Hirata, T., Kimura, J.-I., Ishii, T., Ogawa, Y., Machida, S. and Suyehiro, K. (2006): Volcanism in response to plate flexure. *Science*, **313**, 1426–1428.
- 平野直人・阿部なつ江・町田嗣樹・山本順司 (2010): プチスポット火山から期待される海洋リソスフェアの包括的理解と地質学の新展開—超モホール計画の提案—. *地質学雑誌*, **116**, 1–12. [Hirano, N., Abe, N., Machida, S. and Yamamoto, J. (2010): New insights into the oceanic lithosphere from petit-spot volcanoes and “Super-Mohole” project. *Journal of the Geological Society of Japan*, **116**, 1–12. (in Japanese with English abstract)]
- Ivandic, M., Grevemeyer, I., Berhorst, A., Flueh, E.R. and McIntosh, K. (2008): Impact of bending related faulting on the seismic properties of the incoming oceanic plate offshore of Nicaragua. *Journal of Geophysical Research*, **113**, B05410, doi:10.1029/2007JB005291.
- Ivandic, M., Grevemeyer, I., Bialas, J. and Petersen, C.J. (2010): Serpentinization in the trench-outer rise region offshore of Nicaragua: Constraints from seismic refraction and wide-angle data. *Geophysical Journal International*, **180**, 1253–1264.
- Jacobson, R.S. (1992): Impact of crustal evolution on changes of the seismic properties of the uppermost ocean crust. *Reviews of Geophysics*, **30**, 23–42.
- Kanamori, H. (1971): Seismological evidence for a lithospheric normal faulting – the Sanriku earthquake of 1933. *Physics of Earth Planetary Interiors*, **4**, 289–300.
- Kawada, Y., Yamano, M. and Seama, N. (2014): Hydrothermal heat mining in an incoming oceanic plate due to aquifer thickening: Explaining the high heat flow anomaly observed around the Japan Trench. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **15**, 1580–1599.
- Kawakatsu, H. and Watada, S. (2007): Seismic evidence for deep-water transportation in the mantle. *Science*, **316**, 1468–1471.
- Kelemen, P.B. and Manning, C.E. (2015): Reevaluating carbon fluxes in subduction zones, what goes down, mostly comes up. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **112**, E3997–E4006.
- Key, K., Constable, S., Matsuno, T., Evans, R. and Myer, D. (2012): Electromagnetic detection of plate hydration due to bending faults at the middle america trench. *Earth and Planetary Science Letters*, **351**, 45–53.
- Kimura, J.-I., Hacker, B.R., van Keken, P.E., Kawabata, H., Yoshida, T. and Stern, R.J. (2009): Arc Basalt Simulator version 2, a simulation for slab dehydration and fluid-fluxed mantle melting for arc basalts: Modeling scheme and application. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **10**, doi:10.1029/2008GC002217.
- Kimura, J.-I. and Nakajima, J. (2014): Behaviour of subducted water and its role in magma genesis in the NE Japan arc: A combined geophysical and geo-

- chemical approach. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **143**, 168–188.
- 木村純一・宮崎 隆・常 青・ボグダン・バグラロフ・仙田量子 (2017): 北西太平洋プレートの地球化学—インド洋-太平洋型マントルの成因とマントル境界の特性—. 地学雑誌, **126**, 163–179. [Kimura, J.-I., Miyazaki, T., Chang, Q., Vaglarov, B.S. and Senda, R. (2017): Geochemistry of the NW Pacific plate: Origin of Indian and Pacific mantles and nature of their boundary. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **126**, 163–179. (in Japanese with English abstract)]
- Kirkpatrick, J.D., Strasser, M., Kodaira, S., Sample, J., Mori, J. and Saito, S. (2015): IODP workshop: Tracking the Tsunamigenic slips across and along the Japan Trench (JTRACK). *Scientific Drilling*, **19**, 27–32.
- Kobayashi, K., Nakanishi, M., Tamaki, K. and Ogawa, Y. (1998): Outer slope faulting associated with the western Kuril and Japan trenches. *Geophysics Journal of International*, **134**, 356–372.
- Koepeke, 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. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **12**, doi:10.1029/2011GC003655.
- 黒田潤一郎・鈴木勝彦・大河内直彦 (2010): 白亜紀における大規模火山活動と地球環境変動のリンク. 地学雑誌, **119**, 534–555. [Kuroda, J., Suzuki, K. and Ohkouchi, N. (2010): Linkage between massive volcanic events and global extreme climatic events in the Cretaceous period. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **119**, 534–555. (in Japanese with English abstract)]
- Masson, D.G. (1991): Fault patterns at outer trench walls. *Marine Geophysical Researches*, **13**, 209–225.
- Miura, S., Takahashi, N., Nakanishi, A., Tsuru, T., Kodaira, S. and Kaneda, Y. (2005): Structural characteristics off Miyagi forearc region, the Japan Trench seismogenic zone, deduced from a wide-angle reflection and refraction study. *Tectonophysics*, **407**, 165–188.
- Miyazaki, T., Kimura, J.-I., Takahashi, T., Hirahara, Y., Senda, R., Vaglarov, B.S., Chang, Q., Hauff, F., Hayasaka, Y., Sano, S., Shimoda, G., Ishizuka, O., Kawabata, H., Hirano, N., Machida, S., Ishii, T., Tani, K. and Yoshida, T. (2015): Missing western half of the Pacific Plate: Geochemical nature of the Izanagi-Pacific Ridge interaction with a stationary boundary between the Indian and Pacific mantles. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **16**, doi:10.1002/2015GC005911.
- Nakajima, J., Hasegawa, A. and Kita, S. (2011): Seismic evidence for reactivation of a buried hydrated fault in the Pacific slab by the 2011 M9.0 Tohoku earthquake. *Geophysical Research Letters*, **38**, doi:10.1029/2011GL048432.
- Nakamura, Y., Kodaira, S., Miura, S., Regalla, C. and Takahashi, N. (2013): High-resolution seismic imaging in the Japan Trench axis area off Miyagi, northeastern Japan. *Geophysical Research Letters*, **40**, 1713–1718.
- Nakamura, Y., Kodaira, S., Cook, B., Jeppson, T., Kasaya, T., Yamamoto, Y., Hashimoto, Y., Yamaguchi, M., Obana, K. and Fujie, G. (2014): Seismic imaging and velocity structure around the JFAST drill site in the Japan Trench: Low Vp, high Vp/Vs in the transparent frontal prism. *Earth, Planets and Space*, **66**, 121.
- Nakanishi, M. (2011): Bending-related topographic structures of the subducting plate in the northwestern Pacific ocean. in *Accretionary Prisms and Convergent Margin Tectonics in the Northwest Pacific Basin, Modern Approaches in Solid Earth Sciences, vol. 8* edited by Ogawa, Y., Anma, R. and Dilek, Y., Springer Netherlands, 1–38, doi:10.1007/978-90-481-8885-7_1.
- Obana, K., Fujie, G., Takahashi, T., Yamamoto, Y., Nakamura, Y., Kodaira, S., Takahashi, N., Kaneda, Y. and Shinohara, M. (2012): Normal-faulting earthquakes beneath the outer slope of the Japan Trench after the 2011 Tohoku earthquake: Implications for the stress regime in the incoming Pacific plate. *Geophysical Research Letters*, **39**, doi:10.1029/2011GL050399.
- Obana, K., Kodaira, S., Nakamura, Y., Sato, T., Fujie, G., Takahashi, T. and Yamamoto, Y. (2014): After-shocks of the December 7, 2012 intraplate doublet near the Japan Trench axis. *Earth, Planets and Space*, **66**, 24, doi:10.1186/1880-5981-66-24.
- Ranero, C.R. and Sallarés, V. (2004): Geophysical evidence for hydration of the crust and mantle of the Nazca plate during bending at the north Chile trench. *Geology*, **32**, 549–552.
- Ranero, C.R., Morgan, J.P. and Relchert, C. (2003): Bending-related faulting and mantle serpentinization at the Middle America Trench. *Nature*, **425**, 367–373.
- Ranero, C.R., Villasenor, A., Morgan, J.P. and Weinrebe, W. (2005): Relationship between bend-faulting at trenches and intermediate-depth seismicity. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **6**, Q12002, doi:10.1029/2005GC000997.
- Roland, E., Behn, M.D. and Hirth, G. (2010): Thermal-mechanical behavior of oceanic transform faults: Implications for the spatial distribution of seismicity. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **11**, Q07001, doi:10.1029/2010GC003034.
- Schlanger, S.O. and Jenkyns, H.C. (1976): Cretaceous oceanic anoxic events: causes and consequences. *Geologie en Mijnbouw*, **55**, 179–184.
- Seno, T. and Yamanaka, Y. (1996): Double seismic zones, compressional deep trench-outer rise events,

- and superplumes. *Geophysical Monograph*, **96**, 347–355.
- Stein, C. and Stein, S. (1994): Constraints on hydrothermal heat flux through the oceanic lithosphere from global heat flow. *Journal of Geophysical Research*, **99**, 3081–3095.
- Straub, S.M., Goldstein, S.L., Class, C. and Schmidt, A. (2009): Mid-Ocean-ridge basalt of Indian type in the northwest Pacific Ocean basin. *Nature Geoscience*, **2**, doi:10.1038/NGEO471.
- Tsuru, T., Park, J.-O. and Takahashi, N. (2000): Tectonic features of the Japan Trench convergent margin off Sanriku, northeastern Japan, revealed by multichannel seismic reflection data. *Journal of Geophysical Research*, **105**, 16403–16413.
- Tucholke, B., Lin, J. and Kleinrock, M.C. (1998): Megamullions and mullion structure defining oceanic metamorphic core complexes on the Mid-Atlantic Ridge. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 9857–9866.
- Ujiie, K., Tanaka, H., Saito, T., Tsutsumi, A., Mori, J.J., Kameda, J., Brodsky, E.E., Chester, F.M., Eguchi, N., Toczko, S. and Expedition 343 and 343T scientists (2013): Low coseismic shear stress on the Tohoku-Oki megathrust determined from laboratory experiments. *Science*, **342**, 1211–1214.
- Umino, S., Nealson, K. and Wood, B. (2013): Drilling to Earth’s mantle. *Physics Today*, **66**, 36–41.
- Van Avendonk, H.J.A., Harding, A.J., Orcutt, J.A. and McClain, J.S. (1998): A two-dimensional tomographic study of the Clipperton transform fault. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 17885–17899.
- Van Avendonk, H.J.A., Holbrook, W.S., Lizarralde, D. and Denyer, P. (2011): Structure and serpentinization of the subducting Cocos plate offshore Nicaragua and Costa Rica. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **12**, Q06009, doi:10.1029/2011GC003592.
- van Keken, P.E., Hacker, B.R., Syracuse, E.M. and Abers, G.A. (2011): Subduction factory: 4. Depth-dependent flux of H₂O from subducting slabs worldwide. *Journal of Geophysical Research*, **116**, doi:10.1029/2010JB007922.
- Yamano, M., Hamamoto, H., Kawada, Y. and Goto, S. (2014): Heat flow anomaly on the seaward side of the Japan Trench associated with deformation of the incoming Pacific plate. *Earth and Planetary Science Letters*, **407**, 196–204.