総説

熱水域掘削に基づく新しい熱水系描像と生命圏の限界：IODP 331 次航海の成果

A new model for a hydrothermal circulation system and limit of the life

Abstract

Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Expedition 331 was conducted in September 2010 and provided an unique opportunity to directly access the seafloor environment beneath an active hydrothermal field in the Iheya North Knoll in the mid-Okinawa Trough. Localities of five drilled sites (C0013–C0017) along the slope of a knoll cover the hydrothermal field, represented by vigorous high temperature fluid venting from the active hydrothermal mound named NBC. Drilling at Site C0016 at the flank part of the mound revealed hydrothermal sulfide/sulfate mineralization comparable to that in Kuroko-type volcanic massive sulfide deposit. From Sites C0013 and C0014 located 100 and 450 m east from the mound, evidence for lateral intrusion of the hydrothermal component was observed by intense and widespread hydrothermal alteration, stepwise change in profiles of pore fluid chemistry, and drastic change in physical properties of the sediment. On the other hand, downward infiltration of seawater was recognized even at 50 m below the seafloor at Site C0017 located 1550 m apart from the mound. These results suggest the mixing region between the high-temperature and reductive hydrothermal environment and the low-temperature and oxidative seawater-dominant environment outspreads over a km scale beneath the active hydrothermal field. Furthermore, microbiological studies revealed that habitat of subvent microorganism significantly overlaps this mixing region. Expedition 331 was successful in providing a new model for a hydrothermal fluid circulation system that develops in a geologic setting dominated by volcanic sediment.

Keywords: hydrothermal circulation, seafloor massive sulfide deposit, subvent biosphere, limit of life

石橋純一郎* 柳川勝紀**†
高井 研***

Jun-ichiro Ishibashi*,
Katsunori Yanagawa**† and *Ken Takai****

2016年11月6日受付.

2017年3月22日受理.

* 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門
Department of Earth and Planetary Sciences,
Faculty of Science, Kyushu University, Mo-
tooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

** 九州大学大学院比較社会文化研究院
Faculty of Social and Cultural Studies, Ky-
ushu University, Motooka, Nishi-ku, Fuku-
oka 819-0395, Japan

*** 海洋研究開発機構深海・地殻内生物圏研究分野
Department of Subsurface Geobiological
Analysis and Research (D-SUGAR), Japan
Agency for Marine-Earth Science & Technol-
ogy (JAMSTEC), Natsushima-cho, Yokosuka
237-0061, Japan

† 現所属：北九州市立大学国際環境工学部環境生
命工学科

Present address: Department of Life and En-
vironment Engineering, Faculty of Environ-
mental Engineering, The University of Kita-
kyushu, Hibikino, Wakamatsu-ku,
Kitakyushu 808-0135, Japan

Corresponding author: J. Ishibashi,
ishibashi.junichiro.779@m.kyushu-u.ac.jp

はじめに ー海底熱水域の掘削

1. 海底熱水系とは

海底熱水系は岩石圏と水圏の境界領域を熱水流体が循環するシステムである(e.g. Humphris et al., 1995b). 熱水循環系は、地球深部からの熱を流体の対流によって効果的に表層に輸送する。高温の熱水は循環の過程で様々な化学反応を引き起こすことから、大きな物質フラックスも担うことになる。熱水循環により供給される物質は、熱水が噴出する地域(熱水活動域)に発達する熱水域固有生態系の繁栄を支えている(e.g. Van Dover, 2000). このように、熱水活動域はおおむね静かな海洋底とは違い、ダイナミックな地球の活動に伴う諸過程を直接かいま見ることができる海域である。

海底熱水系は、その発見当初から潜水艇を用いた調査に

よって研究が進められてきた(e.g. Rona et al., 1984). 潜水艇は、熱水噴出孔の直近に接近して、地質試料、流体試料、生物試料などを採取して持ち帰ることができる。しかし、潜水艇による調査は海底面上に限られるため、岩石圏と水圏の境界領域を含めた熱水循環システムを理解するには限界がある。特に海底下の流体移動とそれに伴う諸現象を理解するためには、海底下からの直接的な試料採取が重要である。この考え方は、熱水孔下生命圏仮説を検証する上でも欠かせないものである。熱水孔下生命圏とは、「熱水噴出孔近傍の海底下に存在する地球内部エネルギー(還元的無機化学物質)に依存した超好熱性微生物からなる生態系」のことで、熱水域の化学合成生態系の研究が進むにつれて関心が高まってきた仮説である。熱水孔下生命圏を対象とした研究は、国際深海掘削(ODP)が統合深海掘削計画(IODP)に発展する

Fig. 1. Schematic model of a hydrothermal fluid circulation system beneath the seafloor (modified from Nakamura and Takai (2009)).

過程で重要な研究課題として位置づけられ、掘削による試料採取に対する期待がさらに高まった。

海底下を熱水が循環する間に起こる様々な過程を考えるにあたって、熱水の起源となる海水が海底面から浸入する領域 (Recharge zone)、海水から熱水への進化が起こるマグマ直上の高温領域 (Reaction zone)、熱水が上昇して海底面から噴出する領域 (Discharge zone) の3つの領域に分けると理解しやすい (Fig. 1)。Reaction zone はマグマのごく近くの高温領域に限定され、少なくとも海底下数 km～数十 km の深さにあるのが一般的である。海底掘削でこの領域に達することは難しいが、ODP の時代に複数回の掘削で大深度に達した東太平洋コスタリカリフトの Site 504B で、高温条件で熱水と化学平衡に達したことを示す変質鉱物を含む試料が得られたことは良く知られている (e.g. Alt et al., 1986)。Discharge zone はマグマ直上の Reaction zone と熱水噴出孔のある海底の間をつなぐ領域である。熱水噴出孔からの流

体噴出の激しさを考えると、断層系が狭い範囲に集中する領域が Discharge zone になるとイメージできる。次節に述べるように、これまでに行なわれた活動的な熱水域の掘削は主にこの Discharge zone を対象としており、高温の熱水反応によって生じる鉱石鉱物や熱水変質鉱物を含む試料が得られている。Reaction zone から Discharge zone へ上昇した流体を補填するため、間隙水圧差に支配されて流体が移動する領域が Recharge zone である。熱水噴出孔から毎秒数リットルのオーダーで流体が噴出するのにに対して間隙水圧による流体移動はずっと遅いので、マスバランスを考えるとかなり広い範囲から流体が集まってくる必要がある。しかし、海底からの海水浸入などの流体の動きを潜航調査の観察で認定することは難しいと考えられる。IODP Expedition 301 ではファンデフカ海嶺の海嶺翼域における掘削に際して海底下流体の直接採取の試みも行なわれた (e.g. Wheat et al., 2003)。しかし、この流体が熱水循環系の Recharge zone で起こっている反応にかかわっているものと同一であるとは必ずしも認められていない。この領域でおこる地球化学的反應の理解には熱水岩石反応実験の研究成果に負うところが多く、実際の海域からの試料採取が期待されている。

2. これまでに熱水域で行われた科学掘削

活動的な熱水域を対象とした掘削研究には、このように強い研究動機がある一方で、掘削にかかわる技術的な困難さが大きいと、数例しか実施されていない。ODP 計画における熱水活動域の掘削は以下の4航海であり、いずれも熱水性鉱床の成因解明が主要なテーマとして掲げられたものである (Fig. 2)。Leg139 および 169 では、堆積物に覆われた埋積海嶺であるミドルバレーおよびエスカナバトラフの複数の熱水域で掘削が行われた。バントヒルサイトで数百 m スケールの塊状硫化物鉱床を掘りぬき、陸上の鉱床に匹敵する

Fig. 2. Global distribution of seafloor hydrothermal systems (modified from Beaulieu et al. (2013)), where target sites of previous scientific drilling studies under ODP/IODP framework are superimposed as star marks.

Fig. 3. Locality (a) and topography (b) of the Iheya North Knoll in the mid-Okinawa Trough, where five drilled sites during Expedition 331 were superimposed as star marks (modified from Takai et al. (2012)).

金属元素の濃集帯が海底下で確かに生成されうることを実証し (Zierenberg et al., 1998), さらに鉱床周囲の熱水変質鉱物や熱水流体の分布から海底面下の鉱床形成の可能性を指摘した (Goodfellow et al., 1999). Leg158 では, 大西洋中央海嶺のデタッチメント断層に発達した大型熱水マウンドである TAG マウンドで掘削が行われた。15 本以上の掘削孔により, 熱水マウンドの海底下構造が明らかにされたが (Humphris et al., 1995a), 海水の大規模流入を示す硬石膏帯が大部分を占めており, 鉱床形成の現場を見ることはできなかった (Humphris and Tivey, 2000; Petersen et al., 2000). Leg193 では, マヌス海盆のブアルリッジのバックマヌス熱水域で掘削が行われ, 中央海嶺以外の熱水活動域での初めての掘削となった。しかし, 熱水性硫化鉱物は脈状に産するもののしか見られず, 熱水域海底下は火成岩体とその変質に支配されていた (Binns et al., 2002)。

これらの ODP 計画による科学掘削において, 熱水孔下生命圏に関する研究も展開された。ODP Leg139 と Leg169 では, 高温熱水の影響下にあるコア試料の解析により, 生命の温度限界を遙かに凌ぐ 155–185°C の温度条件の試料からも微生物が観察された (Cragg and Parkes, 1994; Cragg et al., 2000)。しかし, その温度環境で生育していたという証拠を示すことができず, さらに掘削に伴う汚染評価法も確立されていなかったなど, 問題点が多かった。Leg158 では母岩である玄武岩内に生息する微生物の検出が試みられたが, 顕微鏡計数, 培養, 分子生物学的解析のいずれも有意な結果

は得られなかった (Reysenbach et al., 1998)。Leg193 では, 温度勾配から約 85°C と推定される深度で微生物が検出され, さらに深い深度からも好熱菌である *Geobacillus* や *Deinococcus* の増殖が培養実験によって確かめられた。また, 浅部では実際に生きている細胞の指標物質である ATP (アデノシン三リン酸) も検出された (Kimura et al., 2003)。以上のように過去の掘削研究では, 熱水域の海底下に微生物が生息している証拠は提示されたものの, 「超好熱菌やメタン菌など独立栄養生物の巣が存在する」という熱水孔下生命圏のイメージを描くには程遠いものであったと言える。熱水孔下環境の生態系の動的かつ複雑な実態の解明に迫るために, 分野横断的な学際研究を科学掘削に組み込むことが課題として残された。

3. Expedition 331 に向けての科学提案

こうした過去の掘削研究の成果を踏まえて熱水活動域における海底下生命圏の解明を掲げ, “Deep Hot Biosphere” というプロジェクトとして沖縄トラフ熱水域での掘削が提案された。この提案のターゲット海域の伊平屋北海丘は, 大陸縁辺域の背弧海盆 (リフト域) に位置することで, 堆積層に覆われている熱水活動域となっているという特徴がある。堆積物に覆われた熱水活動域で, 熱水孔下生命圏の解明を主要テーマとする科学掘削を行うための作業仮説として以下の 3 点が提案された。(1) 堆積物中の有機物に由来する化学種が熱水に大量に溶存して供給される環境において, これを利用した化学合成に基づく微生物生態系が豊かに発達していること

を確認する。さらに、熱水二相分離などの諸過程による化合物の動態を要因とした微生物生態系の多様性も確認する。(2)堆積層の内部で深部から供給される熱水と海底から浸入する海水とが混合する場が発達していることを確認し、その海底下構造の物理・化学・水理学的描像を微生物生態系と関連づける。(3)熱水帯水層に達する掘削を行うことで熱水噴出孔を人工的に再現し、海底下の世界を海底面上でモニターできる場を提供する。

この科学提案を実現するものとして、2010年9月にIODP Expedition 331が実施された(Takai et al., 2012)。時間的制約から熱水系の Discharge zone での掘削に限定されて実施されたが、海底下の数十 m の深度で 200°C を超えるような高温領域においてもコア試料の回収に成功した。主要テーマである海底下生命圏の解明に迫る研究成果に加え、熱水性鉱床の成因論への貢献という別の側面への成果も得られた(Takai et al., 2012)。本レビューでは、Expedition Reports として報告されている船上研究成果(Takai et al., 2011)、およびその後に発表された研究について、その概要をまとめて述べていく。なお、上記の(3)に関する成果に関する部分は、他のレビュー論文(高井, 本特集号)に詳しく述べられるので本論では触れない。

掘削対象海域の事前研究

Expedition 331 の掘削対象となった伊平屋北海丘(27°47.5'N, 126°53.8'E)は、沖縄トラフにある火山複合体の一つである(Fig. 3)。沖縄トラフはフィリピン海プレートの沈み込みによって形成された延長 1,200 km におよぶ琉球海溝—琉球弧の背弧海盆にあたり、中国大陸の縁辺域に位置している。沖縄トラフにはグラベン地形が雁行状に配列している海域が多く認められ、背弧拡大に先立つリフティング期にあると考えられている(e.g. Sibuet et al., 1987)。こうした展張セッティングを反映した断層系の発達と頻繁なマグマ貫入は、海底熱水循環系が形成されやすい地質場をつくると期待される。沖縄トラフは、水深および海裂の位置から北部・中部・南部の3地域に分けられる。中部沖縄トラフは、熱水活動域が集中して発見される海域として知られており、伊平屋北海丘もこの海域に位置している。

伊平屋北海丘において熱水活動域が1995年に発見されて以来、数多くの潜航調査が行われてきた。主な熱水活動域(現在ではオリジナルサイトと称される)は、中央凹地の西側にある斜面に沿って、ほぼ南北 500 m、東西 300 m ほどの範囲に分布している。高温や低温の熱水を噴出する多くの熱水噴出孔の存在が認められるが、最高温度(311°C)の熱水を噴出する NBC マウンドが熱水活動の中心であると考えられる。熱水活動域は、水深 1000 m 前後と比較的浅い水深に分布することもあるが、熱水化学組成は海底下の二相分離があったことを示す特徴を持っている(Nakagawa et al., 2005; Kawagucci et al., 2011)。また二酸化炭素や硫化水素などマグマ揮発性成分に由来する成分の濃度が高く、メタンやアンモニウムイオンなど堆積物中の有機物に由来する成分の濃度が高い、といった沖縄トラフの他の熱水域でも共通

して見られる特徴を示している。チムニー試料に見られる微生物群集の多様性が、こうした熱水化学組成の多様性に対応していることも報告されている(Nakagawa et al., 2005)。さらに熱水噴出に伴う熱水性沈殿物の解析から、亜鉛、鉛に富む多金属硫化鉱物の産出が確認されている(Ueno et al., 2003)。

伊平屋北海丘熱水域の地質学的背景は、掘削事前調査として行われた地震波探査の解析により明らかにされている(Tsuji et al., 2012)。熱源となるマグマの存在こそ明瞭ではないが、海丘の山体を構成する火山岩の周囲や山体に囲まれた中央凹地に厚く堆積層が分布している。これらの堆積層にはところどころ非常に強い反射面が見られており、キャップロックのような固い地層が広く分布していることが示唆される。また山体の周囲の堆積層には断層と解釈できる部分が数多く確認されており、これが熱水循環系における Recharge zone の海水の通路であると示唆される。さらに、堆積物に覆われた中央凹地で熱流量観測が系統的に実施され、この範囲での熱水循環に関する情報が得られている(Masaki et al., 2011)。きわめて高い熱流量が観測されるのは熱水マウンド周辺の数百 m 四方の範囲に限られている一方で、熱水マウンドから数 km 離れた主に粗粒の堆積物からなる領域は特異的に低い熱流量が観測されている。この低熱流量域においては海水への浸入を示す温度鉛直プロファイルが見られ、中央凹地の海底下で熱水噴出に付随した数 km のスケールでの流体移動が起こっていると推定された。

掘削によるコア採取と孔内温度計測

潜航調査によって 311°C の高温熱水を噴出する NBC マウンドを中心とした熱水活動の広がりが確認されたことを受けて、Expedition 331 ではこの熱水マウンドが位置する山体斜面の 5 サイトで掘削が行われた(Fig. 3)。

Site C0015 は山体斜面のほぼ山頂にあたり、山体を構成する火山性堆積物を採取するために設定された。時間的制約から 10 m に満たない掘削を 3 つの Hole で行なうに留まった。Site C0016 は NBC マウンドの直近に設定され、大口径(4 インチ)の掘削システムを用いて掘削が行われた。Hole C0016A ではマウンドの頂部で掘削を試みたが、コア試料回収はできなかった。その後、マウンドのすぐ脇にガイドベースを設置して Hole C0016B の掘削が実施された。マウンド内部を 45 mbsf(meters below the seafloor)の深度に至るまで掘削することに成功し、コアの回収率は低かったが重要な試料を得ることができた。

Site C0013 は熱水マウンドの東 100 m の位置に設定された。Expedition 331 における最初の掘削であったが、予想をはるかに超える高温のためにインナーチューブが融けたり破損するトラブルに悩まされ続けた。8 つの掘削孔(Hole C0013A–C0013H)により最深 54.5 mbsf に達したが、硬くて掘削に抵抗を示す地層と軟らかくて掘削ビットにまとまりつく粘土層が頻繁に出現し、回収率があまり高くならなかった。Site C0014 は熱水マウンドの東 450 m に設定された。基本的には Site C0013 と同じ地層であったが、7 つ

Fig. 4. Profiles of drill hole temperature by measurement with APCT3 (closed circle) and by estimation based on thermoseal strip (open diamond), at Sites C0014(A) and C0017(B) (modified from Takai et al. (2012)).

の掘削孔 (Hole C0014A–C0014G) により最深 136.7 mbsf に至るまで掘削を行った。ここで得られた試料は回収率も高く、Site C0013 による試料と合わせて熱水域直下の構造を見るのに有効な試料を得ることができた。

Site C0017 は熱水マウンドから東に 1550 m 離れた斜面の麓の平坦部になる場所に設定された。ここでは 4 つの掘削孔 (Hole C0017A–C0017D) により最深 150.7 mbsf に至った。

Site C0014 と Site C0017 では、温度センサーが先端についたピストンコアラである APCT3 というツールを用いた孔内温度計測が行われた。ただし、この装置の温度計測範囲は 0–55°C で耐熱性も高くないため、Site C0014 では浅い深度でしか測定ができなかった。より深い深度では、サーモシールと呼ばれる特定の温度を越えると変色が起こるシールをコアラライナーの外側に貼り付けて現場温度の測定に用いた。ただし、このサーモシールも 210°C が測定の上限で、それ以上の温度情報は得られなかった。これらの温度計測の結果を Fig. 4 に示した。Site C0014 では、10 mbsf から高い温度勾配で温度上昇が始まり、47 mbsf で 150°C に達してさらに急激な温度上昇になり、さらに 10 m 以深においては 210°C 以上の温度を示した。この結果は、50–60 mbsf 以深では熱水成分が堆積層内を占めていることを示唆しており、以下に述べるコア試料の解析でも調和的な結果が得られている。これとは対照的に Site C0017 では、40 mbsf に至るまでほとんど温度上昇が見られず、150 mbsf でようやく 90°C に達する緩やかな温度勾配が観察された。これは海水がかなり深くまで浸入していることを示唆しており、以下に述べるコア試料の解析でも調和的な結果が得られている。

熱水噴出が見られる熱水活動域は、熱水循環系全体では Discharge zone に当たる領域であるが、活発な熱水噴出に

伴ってそのすぐ近傍で海底堆積物内に海水が浸入する現象は、これまでもしばしば報告されている (Kinoshita et al., 2006)。このような浸入海水は深部にある熱源の近傍すなわち Reaction zone に到達することはないと考えられるので、通常の熱水循環モデルにおける Recharge zone における海水の浸入とは同じものではない。しかし、海底下を移動する海水起源の流体であることは間違いなく、特に海底下生命圏に対する役割という点で興味深い対象である。

熱水域海底下の地質学的・水文学的描像

1. 堆積物の地質・岩相

Expedition 331 の掘削により得られたコア試料のうち、代表的なものを Fig. 5 に示した。伊平屋北海丘は火山体であり、その山体を覆う堆積物は火山性砕屑物であることが掘削以前から予想されていた (Tsuji et al., 2012)。掘削によってこの点が確かめられるとともに、熱水活動域では海底下のごく浅い深度からこの火山性堆積物が強い熱水変質を被っていることが明らかになった。また鉱化作用により生成したと考えられる鉱石鉱物 (硫化鉱物) や脈石鉱物 (硫酸塩鉱物など) も掘削により見出されている。

熱水活動の影響を受けてない未固結堆積物は、Site C0015, Site C0017 そして Site C0014 のごく浅い層で確認された (Fig. 5a)。堆積物は主に軽石状の火山性堆積物、珪砂屑性砂質堆積物と半遠洋性泥質堆積物から成っている。火山性砕屑物は岩片サイズのものも含め多くの空隙を持つ軽石であり、伊平屋北海丘の堆積物を特徴づける物質となっている。半遠洋性堆積物はこれらの火山性堆積物層に挟まれて分布しており、火山性堆積物の堆積に休止期があることを示唆している。Site C0017 で得られた半遠洋性堆積物に含まれる粘土鉱物の詳細な解析によればイライト、クロライト、カオリナイトが見られ、東シナ海大陸棚の堆積物との共通性が高い (Shao et al., 2015)。

熱水活動域の近傍で掘削された Site C0013 と Site C0014 の堆積物は、そのほとんどが強い熱水変質を受けていた (Figs. 5e, 5f)。変質度が高く未変質の部分がほとんど残っていないが、軽石を示唆する組織が見られることから火山性堆積物に変質したものであると考えられる。熱水性粘土鉱物を詳しく解析した研究によると、その組み合わせが深度に従って、浅いほうから、スメクタイト (+カオリナイト、イライト)、クロライト + クロライト・スメクタイト混合層鉱物、イライト (+クロライト) と変化している (Miyoshi et al., 2015)。この深度による変化は C0013 と C0014 の両サイトで共通しており、熱水域海底下に変質帯が層状に広がっていることを示している (Fig. 6)。熱水マウンド内を掘削した Site C0016 の掘削からも、粘土鉱物が確認されている。

鉱石鉱物や脈石鉱物についても多様な鉱物が見出された (Yeats et al., 2017)。Site C0016 の 0–9 mbsf から得られた閃亜鉛鉱と方鉛鉱に富み黄鉄鉱と黄銅鉱を含む塊状鉱石は、黒鉱鉱床で見られる Black ore に対比できる鉱石を熱水域から採取した初めての例となった (Fig. 5b)。その下位

Fig. 5. Photographs of representative cores obtained during IODP Exp.331 (after Takai et al. (2011)). (a) Pumiceous deposits, from 18 mbsf at Site C0017 [331-C0017C-1H-7]. Note the absence of a muddy or fine-grained matrix. Such deposits have a high primary porosity and permeability. (b) Massive sulfide ore, probably from 8-9 mbsf at Site C0016 [331-C0016B-1L-1]. (c) Silicified volcanic breccia probably from 44–45 mbsf at Site C0016 [331-C0016B-3L-CC]. Quartz-chlorite-pyrite vein cut by later anastomosing pyrite-anhydrite vein network. (d) Interbedding of black coarse sulfidic grits interbedded with hydrothermally altered mud, from 3 mbsf at Site C0013 [331-C0013E-1H-4]. (e) Mottled Mg chlorite-anhydrite alteration, from 13 mbsf at Site C0013 [331-C0013D-2H-1]. (f) Moderately quartz-Mg chlorite altered volcanic breccia, from 27 mbsf at C0013 [331-C0013E-7L-2]. Typical quartz stockwork veining and a strongly sulfide mineralized vein are shown.

の9–27 mbsfから得られたコア試料には、数 cm オーダーに成長した硬石膏の結晶の塊が見られた。これ以外の Site C0016 から得られたコア試料の多くは、黄鉄鉱を含む脈状組織を持つ珪化した堆積岩であった (Fig. 5c)。硫化鉱物は Site C0013 および Site C0014 からその産出が確認された。閃亜鉛鉱と方鉛鉱は Site C0013 の 7 mbsf 以浅の層お

よび Site C0014 の 15 mbsf の堆積物中に確認されたが、半径数 mm の粒状のものがほとんどで、Site C0016 で見出されたものとは異なる産状であった (Fig. 5d)。黄鉄鉱を含む脈を含む珪化堆積岩は、Site C0013 では 26 mbsf 以深、Site C0014 では 110 mbsf 以深で頻繁に見られた。硫酸塩鉱物である硬石膏は、Site C0013 では 8 mbsf 以深で、

Fig. 6. Distribution of hydrothermal clay mineral beneath the active hydrothermal field (modified from Miyoshi et al. (2015)).

Site C0014 では 45 mbsf 以深で、主要な鉱物として大量に見られた (Fig. 5e). このように多様な鉱物産する特徴は黒鉱鉱床と共通しており、本掘削により両者の類似性の新たな証拠が得られたと言える (Ishibashi et al., 2016).

2. 堆積層内の流体の挙動

こうした熱水変質作用あるいは鉱化作用が堆積物の物性を変動させていることが、船上での物性計測によって明らかにされた。Site C0014 堆積物の物性の鉛直分布では、間隙率の変動が顕著に見られている (Fig. 7). 表層では堆積物としては異常に高い 70% に近い間隙率が見られるが、45 mbsf を境界として急激に減少し 30% 程度に低下している。ところが、10 mbsf を境界とした未変質な未固結堆積層と熱水変質層の間には間隙率の変動が見られない。軽石に代表される火山性碎屑物が高い間隙率を示すのは当然であるが、粘土鉱物が多量に生成される強い変質作用によっても空隙に富む性質が保たれている点は興味深い。一方で、間隙率の低下が始まる 45 mbsf は硬石膏が多量に産し始める深度に対応している。硬石膏は熱水と海水の混合に伴って流体から空隙を埋めるように沈殿していくために、堆積層の間隙率が大きく低下すると考えられる。硬石膏は温度が 200°C 程度の高温になると海水からも生成することが知られており、海底下の温度プロファイルが堆積層の物性を支配していることを意味する。

堆積物から抽出された間隙水の化学組成は、熱水域海底下の流体移動に関する情報を提供する (Fig. 8). 熱水マウンドから東に 1550 m 離れた Site C0017 では、すべての化学成分についてほぼ海水の組成と同じ組成を示す直線的な鉛直分布が得られた (Fig. 8b). ただし、10 mbsf より浅い半遠洋性の堆積物から成る層では、 SO_4 のわずかな減少と NH_4 のわずかな増加が見られた。この変動は、一般的な有機物の分

解を伴う硫酸還元が進行していることを示しており、図には示さないが硝酸塩の濃度変動や硫黄同位体比の変動からも支持されている (Yanagawa et al., 2014; Aoyama et al., 2014). これに対して、10 mbsf より深い層では化学反応の痕跡が一切ない。このサイトでは、19.1–36.2 mbsf の堆積層が粗粒の軽石層で占められており、海水起源の流体がこの透水性の高い堆積層内を比較的速いタイムスケールで入れ替わっていることが考えられる。

熱水域により近い Site C0014G の間隙水の鉛直分布は、ほとんどの化学種において大きな濃度変化を示している (Fig. 8a). この図に矢印で示したのは熱水マウンドから噴出する熱水の化学組成であるが (Kawagucci et al., 2013), 45 mbsf 以深の間隙水の組成はこの熱水組成にかなり近い。図には示していないが Site C0013 でも熱水組成に近い化学組成を持つ間隙水が見出されている (Takai et al., 2011). この結果は、深部から上昇してきた熱水流体が、海底から噴出するだけでなく周辺の堆積層内に間隙水として広がっている可能性を示している。さらに間隙水の組成の変化が緩やかなものではなく特定の深度で急激に変動する特徴があり、堆積層内に不透水層が発達して流体が鉛直方向へ移動することを妨げていることが示唆される。

熱水域生命圏の存在様式と限界

1. コア試料の掘削泥水汚染の評価

海底掘削試料を用いて、海底下に生息する微生物の総量と機能を議論するためには、まず掘削の際に生じるコア試料への泥水汚染の影響を理解する必要がある。掘削泥水は、淡水や海水に粘土鉱物 (ベントナイト) や有機物 (グアーガム) などを、比重を調整するために混合比を変えて加えたものが使用される。掘削泥水がコア試料に接触することはほぼ避けられ

Fig. 7. Vertical profiles of physical properties of collected cores from Site C0014G (The original data were reported in Takai et al. (2011)).

ないので、コアの内部への泥水による汚染の程度を定量的に提示することが、微生物関連データの品質保証の観点から重要とされている (Smith et al., 2000; House et al., 2003; Lever et al., 2006). 一般的な汚染評価の手法としては、2つの方法が併用されている。1つは化学トレーサー(パーフルオロメチルシクロヘキサン)を掘削泥水に予め加えておく方法で、コア試料からこのトレーサーをガスクロマトグラフで検出する。もう1つは微生物サイズの蛍光ビーズを使う方法で、このビーズが詰められた小さな袋をコアラーの先端部に取り付けておき、回収したコア試料の内部にどの程度検出されるかを調べる。

Expedition 331 では、まずこれらの汚染検査法の有効性の確認を行った (Yanagawa et al., 2013). その結果、ポリスチレン製のラテックスビーズである蛍光ビーズは高温環境で分解してしまい(ガラス転移点 95°C , 融点 240°C), これを用いた評価が難しいことが判明した。次に、掘削泥水そのものに含まれる微生物由来遺伝子の解析結果をもとに、コア試料への混入を確認したところ、掘削泥水中の優占種である *Vibrionaceae*, *Burkholderiales*, *Rhodocyclales* が一部のコア試料で検出され、最悪の場合ではコア試料中の微生物群集の半数以上に達することが判明した。さらに泥水の組成や泥水が作成されてからの経過日数に応じて、こうした泥水

(a) C0014

(b) C0017

Fig. 8. Vertical profiles of pore fluid chemistry at Sites C0014G (a) and C0017(b) (The original data were reported by Takai et al. (2011)). Arrow marks indicate chemical composition of the vent fluid collected from NBC mound (The original data were reported by Kawagucci et al. (2013)).

Fig. 9. 16S rRNA gene phylotype compositions in the subseafloor sediment at Site C0017 (The original data were reported by Yanagawa et al. (2014)). The gene fragments were amplified with the universal primer set that covers bacterial and archaeal 16S rRNA genes. The stars indicate the samples which were not amplified not with universal primer set but with archaeon-specific primer set.

Fig. 10. 16S rRNA gene phylotype compositions in the subseafloor sediment of Hole 0014B (The original data were reported by Yanagawa et al. (2017)). The gene fragments were amplified with the universal 16S rRNA gene primer set. The stars indicate the samples which were not amplified not with universal primer set but with archaeon-specific primer set. The red-shaded layers and blue dashed line represent the possible depth limit of subvent microbes and possible impermeable layers, respectively.

Fig. 11. Hole C0014B depth profiles of the phylogenetic composition of *mcrA* genes, potential activity of anaerobic methane oxidation, pore-water concentrations methane and sulfate and carbon and hydrogen isotopic composition of methane (The original data were reported by Yanagawa et al. (2017)). Open circles on the y-axis denote analysis below the detection limit for the potential activity. The red-shaded layers represent the possible depth limit of subvent microbes.

由来微生物群集が経時変化していることも明らかとなった。この微生物学的汚染評価と化学トレーサー法とを併用し泥水汚染がコア試料に及んでいないことを確認した上で、以下の微生物学的考察が進められた。

2. 海水の浸入に伴って発達する海底下生命圏

熱水マウンドより東に 1550 m 離れた Site C0017 では、前節でも述べたように 50 mbsf 程度の深度まで海水成分が浸入している。微生物によって迅速に消費されやすい硝酸イオンが間隙水に残存していたことから、生物地球化学的続成作用がほとんどない「新鮮な」海水が浸入していることが支持される。微生物解析の結果は、こうした化学環境を反映していると考えられるものであった。表層付近の半遠洋性堆積物の層では *Chloroflexi* を中心とする群集であり (Fullerton and Moyer, 2016), より深部の軽石層では海洋性アーキアであるタウムアーキオータ (*Nitrosopumilales*) が特徴的であった (Fig. 9) (Yanagawa et al., 2014)。このグループはアンモニア酸化反応に関わると考えられており、その反応の鍵酵素遺伝子である *amoA* 遺伝子も検出された。50 mbsf 以深ではこのサイトでも温度上昇が見られ (Fig. 4), 141 mbsf で 90°C 近い高温環境に達する。この深度から取得されたコア試料中には、Hot Water Crenarchaeotic Group IV (HWCGIV) という未培養の好熱性アーキアが検出された。このアーキアについて 16S rRNA 遺伝子の GC 含量から推定すると 74–83°C で生育する好熱性微生物であることが示唆される。海水が浸入しているこのサイトでも、深部での好熱性微生物の優占が検出され、温度変化に基づいた微生物群集の変化が見られた。

3. 熱水活動域直下の海底下生命圏

熱水噴出孔により近い Hole C0014B の海底下の微生物群集組成は、*Deltaproteobacteria*, *Chloroflexi*, *Atribac-*

teria, Deep-sea Hydrothermal Vent Euryarchaeotic Group 6 (DHVE-6), Miscellaneous Crenarchaeotic Group (MCG) といった熱水活動域ではない海底下にも存在する微生物系統群から構成されていることが培養非依存的分子生物学的解析によって見出された (Fig. 10) (Yanagawa et al., 2017)。最深部 (14.3 mbsf) では、Site C0017 の最深部に検出された好熱性と推定される HWCGIV がアーキアの 8 割を占めており、この熱水域の海底下生命圏を特徴づける構成微生物と言える。一方で、チムニー内部に生息するような超好熱菌は全く検出されず、好熱菌も極めて微小なポピュレーションを占めるに過ぎないという点で、これらの結果は当初期待されていた熱水孔下生命圏のイメージとは異なるものであった。

さらに熱水孔下環境でのメタンの挙動を支配する微生物の役割が多面的な解析から明らかになった。メタン生成/嫌氣的メタン酸化反応の鍵酵素遺伝子である *mcrA* 遺伝子の解析から、嫌氣的メタン酸化アーキア ANME-1 が深部で優占することが明らかにされた (Fig. 11)。その近傍では Hot-Seep-1 と呼ばれる硫酸還元菌の特定グループが検出されており (Fig. 10), 硫酸塩を電子受容体とするメタン酸化反応が堆積層内で進行していると考えられる。実際、放射性同位体トレーサー実験によって嫌氣的メタン酸化活性が盛んであることも確認された (Fig. 11)。さらに間隙水化学成分の解析結果も、これらの微生物に関する解析結果に調和的であった。熱水成分の流れ込みを反映するメタン濃度のピークのうち、最表層と 8.5 mbsf で検出されたメタンは炭素・水素同位体比が重い方向にシフトしており、微生物によるメタン酸化によって消費された痕跡と考えられる。また、硫酸塩の硫黄同位体比から微生物による硫酸還元の前も同一深度で確認されている (Aoyama et al., 2014)。この一連の嫌氣的メ

Fig. 12. Schematic model of hydrogeology beneath the Iheya North Knoll hydrothermal field (Modified from Takai et al. (2012)).

タン酸化反応について、海底下で測定された温度条件や間隙水中の化学組成に基づいて熱力学的理論計算を行った場合、エネルギー獲得反応として大きな役割を果たすことも確認されている (Takai and Nakamura, 2011; Nakamura and Takai, 2014)。以上述べてきたように、微生物生態系の解析結果が間隙水中の生物関連物質の化学的・同位体的特徴と調和的であることは、火山性碎屑層内へ熱水流体が広がっていることが、海底下の嫌氣的メタン酸化アーキアの分布と規模およびその活性を規定する要因となっていることを示している。

もう一つの海底下生命圏研究の重要なテーマとして、生命圏の限界を見極める研究があげられる。分子生物学的手法、培養、放射性同位体トレーサ法による超高感度有機物分解活性といった複数の解析手法の結果を統合して、Site C0014 では生命圏と非生命圏の境界が 10–16 mbsf に位置することを明示することができた (Yanagawa et al., 2017)。一方で、この境界近傍に発達していることが期待された超好熱菌を主体とする生態系の存在を確認することができなかった。その原因として、伊平屋北海丘の海底下生命圏の高温限界領域の環境が時空間的に不安定である可能性が考えられる。生命圏の限界より深部の 26.4 mbsf の堆積層に多量に存在する熱水変質鉱物は 150–250°C とした高温の変質反応で生成されるクロライトである (Miyoshi et al., 2015)。このような生命の生育温度上限 (=122°C; Takai et al., 2008) を越える環境が継続することで海底下微生物群集やその痕跡は消去されてしまうと予想される。一方で、生命圏と非生命圏の境界である 10–16 mbsf の深度に対して孔井温度計測から推定される温度は 45°C とずっと低く、またこの深度に生息する好熱菌 HWCIV の至適生育温度は 80°C 前後であった。伊平屋北海丘の堆積層は、過去のある時点で高温を経験しその後熱水活動の低下に伴って現在の温度環境になったのかもしれない。また、超好熱菌を主体とする生態系が発達していなかったもう一つの原因として、不透水層

の形成が微生物の移動を妨げる障壁となっていることが考えられる。Site C0014 の Hole D と Hole G では、ともに不透水層があると考えられる深度が生命圏限界の深度と一致していた。一方で、Hole B では不透水層と考えられる深度より深い層に HWCIV などの微生物が進出していることが確認されている (Fig. 10)。堆積層の温度環境が変わって生命が存在できる環境になっても、生命圏限界の深度が移動するまでには一定の時間が必要なのかもしれない。

以上のように、Expedition 331 では、ちきゅうでの掘削による直接的な検証により、熱水孔下生命圏の存在様式や存在領域が現在の物理化学因子だけではなく過去の温度履歴にも強く依存することを示すことができた。熱水の上昇・下降に伴う熱水環境の空間的・時間的変動に、翻弄される微生物生態系の特徴を理解する手がかりが得られたことは大きな成果である。一方で、超好熱性微生物の繁茂する熱水孔下生命圏の存在は依然明らかにならなかった。今後、熱水域海底下で、異なる形態で熱水と海水の混合が実現している環境、例えば急激な酸化還元勾配が成立するような熱水活動域の縁辺部で、また違った形の熱水孔下生命圏の存在が期待できる。

熱水域海底下の描像

熱水活動域は、海底下からもたらされた熱水によりつくられる環境と海底面上に広がる海水がもたらす環境が出会う場である。深海底の海水は 2–4°C とした非常に低温な水で酸素を含んでいる。これに対して、熱水は海底下を熱水循環する過程でマグマから熱を受け岩石と反応することで、高温で還元的な化学的性質を持つようになる。この両者が出会うと物理・化学的性質の異なる流体が混合することになり、様々な化学反応が引き起こされる。鉱化作用は、熱水に溶存していた金属元素が、物理・化学条件の変化に伴って溶存できなくなり鉱物を沈殿する作用である。また熱水域生態系を支える化学合成は、熱水に溶存している還元的物質と海水に溶存している酸化的物質とを結びつける反応で得られるエネ

ルギーを利用している。このような熱水と海水の混合は、熱水活動域のあちこちで様々なスケールで起こっていると考えられる。例えば、熱水噴出孔から勢い良く熱水が噴出すると、その上方で熱水と海水の混合が起きる。こうした混合では、両者がいきなり混合することになるので物理・化学条件の変化が劇的に起こり、また流体も反応生成物も安定して存在できない。例えば熱水噴出孔の直上で急冷された熱水から沈殿してできる細粒の硫化鉱物が舞うブラックスモーカーの姿は印象的であるが、鉱物粒子を海洋に散逸させることは鉱床形成の観点からは不利である。また、スモーカーの壁面や表面は温度勾配が急激で、微生物が棲息できる領域は非常に限定されている。熱水噴出孔の根元が盛り上がった形になる熱水マウンドが形成されれば、もう少しマイルドな条件での熱水と海水の混合の場が発達できると考えられる。熱水マウンド表面からゆるやかに浸みだす低温熱水が熱水域生態系の繁栄を支えていることは、潜航調査でもしばしば観察される。Expedition 331 の掘削において熱水マウンド内部から採取された塊状鉱物が粗粒の硫化鉱物結晶から構成されていることは、熱水噴出孔の下で徐冷による鉱化作用が進んでいることの物的証拠を示したものと考えられる。

Expedition 331 の掘削では、熱水環境と海水環境の混合が海底下でさらに大きなスケールで起こっている可能性を示した (Fig. 12)。熱水マウンドの東側 100 m、450 m に位置する Site C0013、Site C0014 では、海底下のかかなり浅い深度の堆積層が熱水成分の流体に占められていることが温度計測、堆積層内の変質鉱物の分布、間隙水の化学組成などから明らかになった。逆に熱水マウンドから東側に 1 km 以上離れた Site C0017 では、50 mbsf に至るまでほぼ海水と言って良い間隙水によって占められていることが、温度計測、間隙水の化学組成、微生物生態系の構成種などの解析結果から明らかになった。さらに Site C0014 において、両者が出会う場所に特異な海底下生命圏が発達していることが明らかになった。2 つのサイトの間に掘削点が設定されていないために実証することはできなかったが、こうした境界面が数 km に及ぶ大きなスケールで広がっている可能性は十分にあるだろう。また間隙水の化学組成 (特にガス成分) から示唆されるように、こうした混合面は単純な一枚の面ではなく、複雑に入れ子に重なり合って分布している可能性もある。

こうした大きなスケールでの熱水環境と海水環境の出会いの場が発達することには、火山性砕屑層が主な堆積物として熱水活動域の周囲に存在していることが重要な要因となっている。軽石を主体とする火山岩は高い間隙率を有し透水性も高い。このことは、熱水が通りやすいだけでなく、熱水と海水が混合する空間を確保することもできる。空隙に富むことで体積あたりの反応表面積が大きいことは、流体と鉱物の反応が熱水の化学組成を支配するという点でも、微生物が棲息できる環境を提供できるという点でも、重要な役割を担っていると考えられる。こうした砕屑性堆積物が火山体を構成することは、爆発的な噴火をしばしば行う珪長質なマグマ活動の特徴である。玄武岩マグマは一般的には粘度が低く、噴火形態としては溶岩流を形成することが多い。これまで海洋地

殻の透水性は、溶岩が冷却固化する際に収縮することによって生じる裂隙系で説明されることが多かった。しかし、火山性砕屑堆積物の透水性は、玄武岩海洋地殻で考えられる透水性より何桁も高いものであると考えられる。

このように考えると、中央海嶺とは異なるテクトニックセッティングに発達する沖縄トラフの海底熱水系は、これまでに考えられていたものとは異なるスタイルを持つ熱水循環系であると考えられる。大きなスケールでの熱水環境と海水環境の出会い、そのような熱水循環系の重要な特徴の一つと言える。このことは、中央海嶺で期待されているよりもずっと大きなスケールで鉱化作用や海底下生命圏が発達していることを期待できることを意味する。Expedition 331 は、堆積物に覆われた背弧リフトセッティングの熱水活動域で行われた初めての科学掘削として、このような海底熱水系の新しい描像を導く成果を得ることができた。

謝 辞

IODP Expedition 331 で行われた科学掘削に関与した皆様、特に「ちきゅう」の乗組員、掘削チーム、船上テクニシャン、乗船研究者の皆様にあつく感謝いたします。二名の査読者から詳細なコメントをいただいたことで、大幅に原稿の内容を改善することができました。本レビューで解説した研究の一部は筆者を含む研究グループが実施した研究であり、新学術領域研究「海底下の大河：地球規模の海洋地殻中の移流と生物地球化学作用」、および柳川が実施した科学研究費補助金科研費若手 A (15H05335) の支援を受けました。記して感謝いたします。

文 献

- Alt, J. C., Honnorez, J., Laverne, C. and Emmermann, R., 1986, Hydrothermal alteration of a 1 km section through the upper oceanic crust, Deep Sea Drilling Project Hole 504B; Mineralogy, chemistry, and evolution of seawater-basalt interactions. *Jour. Geophys. Res.*, **91**, 10309–10335.
- Aoyama, S., Nishizawa, M., Takai, K. and Ueno, Y., 2014, Microbial sulfate reduction within the Iheya North subseafloor hydrothermal system constrained by quadruple sulfur isotopes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **398**, 113–126.
- Beaulieu, S. E., Baker, E. T., German, C. R. and Maffei, A., 2013, An authoritative global database for active submarine hydrothermal vent fields. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **14**, 4892–4905.
- Binns, R. A., Barriga, F. J. A. S., Miller, D. J. and the Leg 193 Scientific Party, 2002, Anatomy of an active hydrothermal system hosted by felsic volcanic rocks at a convergent plate margin: ODP Leg 193. *JOIDES J.*, **28**, 2–7.
- Cragg, B. A. and Parkes, R. J., 1994, Bacterial profiles in hydrothermally active deep sediment layers from Middle Valley (NE Pacific) Sites 857 and 858. *Proc. ODP, Sci. Results*, **139**, 509–516.
- Cragg, B. A., Summit, M. and Parkes, R. J., 2000, Bacterial profiles in a sulfide mound (Site 1035) and an area of active fluid venting (Site 1036) in hot hydrothermal sediments from Middle Valley (Northeast Pacific). *Proc. ODP, Sci. Results*, **169**, 1–18.
- Fullerton, H. and Moyer, C. L., 2016, Comparative single-cell genomics of *Chloroflexi* from the Okinawa Trough deep-sea subsurface biosphere. *Appl. Environ. Microbiol.*, **82**, 3000–

- 3008.
- Goodfellow, W. D., Zierenberg, R. A. and ODP Leg169 Shipboard Science Party, 1999, Genesis of massive sulfide deposits at sediment-covered spreading centers. In Barrie, C. T. and Hannington, M. D. eds., *Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits: Processes and Examples in Modern and Ancient Settings*. Reviews in Economic Geology Vol. 8., Society of Economic Geologists, Inc., Littleton, 297–324.
- House, C. H., Cragg, B. A., Teske, A. and the Leg 201 Scientific Party, 2003, Drilling contamination tests during ODP Leg 201 using chemical and particulate tracers. *Proc. ODP Init. Repts.*, **201**, 1–19.
- Humphris, S. E., Herzig, P. M. and ODP Leg 158 Scientific Party, 1995a, The internal structure of an active sea-floor massive sulfide deposit. *Nature*, **377**, 713–716.
- Humphris, S. E. and Tivey, K., 2000, A synthesis of geological and geochemical investigations of the TAG hydrothermal field: Insights into fluid-flow and mixing processes in a hydrothermal system. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, **349**, 213–235.
- Humphris, S. E., Zierenberg, R. A., Mullineaux, L. S. and Thomson R. E. eds., 1995b, *Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions*. Geophysical Monograph Series, Vol. 91. American Geophysical Union, Washington D.C., 466p.
- Ishibashi, J., Ikegami, F., Tsuji, T. and Urabe, T., 2016, Hydrothermal activity in the Okinawa Trough back-arc basin: Geological background and hydrothermal mineralization. In Ishibashi, J., Okino, K. and Sunamura, M. eds, *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal Systems TAIGA Concept*, Springer Open, 337–359.
- Kawagucci, S., Chiba, H., Ishibashi, J., Yamanaka, T., Toki, T., Muramatsu, Y., Ueno, Y., Makabe, A., Inoue, K., Yoshida, N., Nakagawa, S., Nunoura, T., Takai, K., Takahata, N., Sano, Y., Narita, T., Teranishi, G., Obata, H. and Gamo, T., 2011, Hydrothermal fluid geochemistry at the Iheya North field in the mid-Okinawa Trough: Implication for origin of methane in subseafloor fluid circulation systems. *Geochem. Jour.*, **45**, 109–124.
- Kawagucci, S., Miyazaki, J., Nakajima, R., Nozaki, T., Takaya, Y., Kato, Y., Shibuya, T., Konno, U., Nakaguchi, Y., Hatada, K., Hirayama, H., Fujikura, K., Furushima, Y., Yamamoto, H., Watsuji, T., Ishibashi, J. and Takai, K., 2013, Post-drilling changes in fluid discharge pattern, mineral deposition, and fluid chemistry in the Iheya North hydrothermal field, Okinawa Trough. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **14**, 4774–4790.
- Kimura, H., Asada, R., Masta, A. and Naganuma, T., 2003, Distribution of microorganisms in the subsurface of the Manus Basin hydrothermal vent field in Papua New Guinea. *Appl. Environ. Microbiol.*, **69**, 644–648.
- Kinoshita, M., Kawada, Y., Tanaka, A. and Urabe, T., 2006, Recharge/discharge interface of a secondary hydrothermal circulation in the Suiyo Seamount of the Izu-Bonin arc, identified by submersible-operated heat flow measurements. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **245**, 498–508.
- Lever, M. A., Alperin, M., Engelen, B., Inagaki, F., Nakagawa, S., Steinsbu, B. O., Teske, A. and IODP Expedition 301 Shipboard Scientific Party, 2006, Trends in basalt and sediment core contamination during IODP Expedition 301. *Geomicrobiol Jour.*, **23**, 517–530.
- Masaki, Y., Kinoshita, M., Inagaki, F., Nakagawa, S. and Takai, K., 2011, Possible kilometer-scale hydrothermal circulation within the Iheya-North field, mid-Okinawa Trough, as inferred from heat flow data. *JAMSTEC Rep. Res. Dev.*, **12**, 1–12.
- Miyoshi, Y., Ishibashi, J., Shimada, K., Inoue, H., Uehara, S. and Tsukimura, K., 2015, Clay minerals in an active hydrothermal field at Iheya-North-Knoll, Okinawa Trough. *Resour. Geol.*, **65**, 346–360.
- Nakagawa, S., Takai, K., Inagaki, F., Chiba, H., Ishibashi, J., Kataoka, S., Hirayama, H., Nunoura, T., Horikoshi, K. and Sako, Y., 2005, Variability in microbial community and venting chemistry in a sediment-hosted backarc hydrothermal system: Impacts of subseafloor phase-separation. *FEMS Microbiol. Ecol.*, **54**, 141–155.
- 中村謙太郎・高井 研(Nakamura, K. and Takai, K.), 2009, 海底熱水系の物理・化学的多様性と化学合成微生物生態系が存在様式 (Physical and chemical diversity of seafloor hydrothermal systems and presentation of associated chemolithoautotrophic ecosystem). *地学雑 (Jour. Tokyo Geogr. Soc.)*, **118**, 1083–1130.
- Nakamura, K. and Takai, K., 2014, Theoretical constraints of physical and chemical properties of hydrothermal fluids on variations in chemolithotrophic microbial communities in seafloor hydrothermal systems. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **1**, 5.
- Petersen, S., Herzig, P. and Hannington, M., 2000, Third dimension of a presently forming VMS deposit: TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge, 26°N. *Mineral. Deposita*, **35**, 233–259.
- Reysenbach, A. L., Holm, N. G., Hershberger, K., Prieur, D. and Jeannot, C., 1998, In search of subsurface biosphere at a slow-spreading ridge. *Proc. ODP, Sci. Results*, **158**, 355–360.
- Rona, P. A., Boström, K., Laubier, L. and Smith, K. L. Jr., eds., 1984, *Hydrothermal Processes at Seafloor Spreading Centers*. NATO Conference Series 4: Marine Science Volume 12. Plenum Press, London and New York. 796p.
- Shao, H., Yang, S., Wang, Q. and Guo, Y., 2015, Discriminating hydrothermal and terrigenous clays in the Okinawa Trough, East China Sea: Evidences from mineralogy and geochemistry. *Chem. Geol.*, **398**, 85–96.
- Sibuet, J.-C., Letouzey, J., Barbier, F., Charvet, J., Foucher, J.-P., Hilde, T., Kimura, M., Ling-Yun, C., Marsset, B., Muller, C. and Stephan, J.-F., 1987, Back arc extension in the Okinawa Trough. *Jour. Geophys. Res.*, **92**, 14041–14063.
- Smith, D. C., Spivack, A. J., Fisk, M. R., Haveman, S. A. and Staudigel, H., 2000, Tracer-based estimates of drilling-induced microbial contamination of deep sea crust. *Geomicrobiol. Jour.*, **17**, 207–219.
- 高井 研(Takai, K.), 2017, 沖縄トラフ熱水域の科学掘削(IODP331次航海)におけるポストドリリング研究展開(Post-drilling research of IODP Expedition 331: a test-bed for anthropogenic impacts and experiments on deep-sea hydrothermal activity and ecosystem). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **123**, 225–235(本特集号).
- Takai, K., Mottl, M. J., Nielsen, S. H. and the Expedition 331 Scientists, 2011, *Proc. IODP*, **331**, Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., Tokyo.
- Takai, K., Mottl, M., Nielsen, S. H. and the IODP Expedition 331 Scientists, 2012, IODP Expedition 331: Strong and expansive subseafloor hydrothermal activities in the Okinawa Trough. *Sci. Drill.*, **13**, 19–27.
- Takai, K. and Nakamura, K., 2011, Archaeal diversity and community development in deep-sea hydrothermal vents. *Curr. Opin. Microbiol.*, **14**, 282–291.
- Takai, K., Nakamura, K., Toki, T., Tsunogai, U., Miyazaki, M., Miyazaki, J., Hirayama, H., Nakagawa, S., Nunoura, T. and Horikoshi, K., 2008, Cell proliferation at 122°C and isotopically heavy CH₄ production by a hyperthermophilic methanogen under high-pressure cultivation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **105**, 10949–10954.
- Tsuji, T., Takai, K., Oiwane, H., Nakamura, Y., Masaki, Y., Kumagai, H., Kinoshita, M., Yamamoto, F., Okano, T. and

- Kuramoto, S., 2012, Hydrothermal fluid flow system around the Iheya North Knoll in the mid-Okinawa trough based on seismic reflection data. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **213-214**, 41–50.
- Ueno, H., Hamasaki, H., Murakawa, Y., Kitazono, S. and Take-da, T., 2003, Ore and gangue minerals of sulfide chimneys from the North Knoll, Iheya Ridge, Okinawa Trough, Japan. *JAMSTEC Deep Sea Res.*, **22**, 49–62.
- Van Dover, C. L., 2000, *The Ecology of Deep-Sea Hydrothermal Vents*. Princeton University Press, New Jersey, 448p.
- Wheat, C. G., Jannasch, H. W., Kastner, M., Plant, J. N. and DeCarlo, E. H., 2003, Seawater transport and reaction in upper oceanic basaltic basement: Chemical data from continuous monitoring of sealed boreholes in a mid-ocean ridge flank environment. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **216**, 549–564.
- Yanagawa, K., Breuker, A., Schippers, A., Nishizawa, M., Ijiri, A., Hirai, M., Takaki, Y., Sunamura, M., Urabe, T., Nunoura, T. and Takai, K., 2014, Microbial community stratification controlled by the subseafloor fluid flow and geothermal gradient at the Iheya North Hydrothermal Field in the mid-Okinawa Trough (Integrated Ocean Drilling Program Expedition 331). *Appl. Environ. Microbiol.*, **80**, 6126–6135.
- Yanagawa, K., Ijiri, A., Breuker, A., Sakai, A., Miyoshi, Y., Kawagucci, S., Noguchi, T., Hirai, M., Schippers, A., Ishibashi, J., Takaki, Y., Sunamura, M., Urabe, T., Nunoura, T. and Takai, K., 2017, Defining boundaries for the distribution of microbial communities beneath the sediment-buried, hydrothermally active seafloor, *ISME J.*, **11**, 529–542.
- Yanagawa, K., Nunoura, T., McAllister, S., Hirai, M., Breuker, A., Brandt, L., House, C. H., Moyer, C. L., Birrien, J. L., Aoike, K., Sunamura, M., Urabe, T., Mottl, M. J. and Takai, K., 2013, The first microbiological contamination assessment by deep-sea drilling and coring by the D/V Chikyu at the Iheya North hydrothermal field in the Mid-Okinawa Trough (IODP Expedition 331). *Front. Microbiol.*, **4**, 327.
- Yeats, C. J., Hollis, S. P., Halfpenny, A., Corona, J.-C., LaFlamme, C., Southam, G., Fiorentini, M., Herrington, R. J. and Spratt, J., 2017, Actively forming Kuroko-type volcanic-hosted massive sulfide (VHMS) mineralization at Iheya North, Okinawa Trough, Japan. *Ore Geol. Rev.*, **84**, 20–41.
- Zierenberg, R. A., Fouquet, Y., Miller, D. J., Bahr, J. M., Baker, P. A., Bjerggård, T., Brunner, C. A., Duckworth, R. C., Gable, R., Gieskes, J., Goodfellow, W. D., Gröschel-Becker, H. M., Guérin, G., Ishibashi, J., Iturrino, G., James, R. H., Lackschewitz, K. S., Marquez, L. L., Nehlig, P., Peter, J. M., Rigsby, C. A., Schultheiss, P., Shanks, W. C., III, Simoneit, B. R. T., Summit, M., Teagle, D. A. H., Urbat, M. and Zuffa, G. G., 1998, The deep structure of a sea-floor hydrothermal deposit. *Nature*, **392**, 485–488.

(著者プロフィール)

石橋純一郎 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門 准教授。89年 東京大学大学院理学系研究科化学専攻博士課程中途退学, 89年 東京大学理学部地殻化学実験施設助手, 91年 理学博士, 98年 九州大学理学部地球惑星科学科助教授, 07年から現職。研究内容: 海底熱水系の諸過程の地球化学的研究, 現在は熱水鉱床の成因論。地質学および水文学研究に関連する部分の原稿執筆を担当。E-mail: ishibashi.junichiro.779@m.kyushu-u.ac.jp

柳川勝紀 北九州市立大学国際環境工学部環境生命工学科 准教授。10年 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了(理学博士)。東京大学大学院理学系研究科特任研究員, 海洋研究開発機構ポストドクトラル研究員を経て, 14年 九州大学大学院比較社会文化研究院学術研究員。17年4月より現職。研究内容: 海底熱水やガスハイドレートなどの海洋環境における生命地球科学。微生物学研究に関連する部分の原稿執筆を担当。E-mail: kyanagawa@kitakyu-u.ac.jp

高井 研 海洋研究開発機構深海地殻内生物圏研究分野 分野長。97年 京都大学大学院農学研究科水産学専攻博士課程修了(農学博士)。97年より海洋研究開発機構に所属。プログラムディレクター, ユニットリーダーを経て, 14年から現職。研究内容: 深海や地殻内といった地球の極限環境に生息する微生物や生物の生理・生態や, その生態系の成り立ちと仕組みの解明。Exp.331の共同首席研究者としての立場から本原稿の監修と修正を行った。E-mail: kent@jamstec.go.jp

(要 旨)

石橋純一郎・柳川勝紀・高井 研, 2017, 熱水域掘削に基づく新しい熱水系描像と生命圏の限界: IODP 331 次航海の成果. 地質雑, **123**, 237–250. (Ishibashi, J., Yanagawa, K. and Takai, K., 2017, A new model for a hydrothermal circulation system and limit of the life. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **123**, 237–250.)

統合国際掘削 (IODP) 331 次航海は, 中部沖縄トラフの伊平屋北海丘を対象として 2010 年 9 月に実施された。熱水噴出を伴うマウンド直近の Site C0016 では, 黒鉱鉱床に比する熱水鉱化作用を見出した。マウンド東側数百 m に位置する Site C0013, Site C0014 からは, かなり浅い深度の堆積層にまで熱水成分が広がることを示す様々な証拠が得られた。一方, 1550 m 離れた Site C0017 では, 50 mbsf に至る海水の浸入が明らかになった。熱水域の海底下には, 熱水によって支えられる高温で還元的な環境と海水の浸入によって形成される低温で酸化的な環境が会う領域がキロメートルに及ぶスケールで広がっており, そのような領域に海底下生命圏が発達している。本掘削によって, 火山性碎屑層が分布する地質学的環境に発達する海底熱水系の新たな描像を示すことができた。