



統合国際深海掘削計画 (IODP)  
— 2003 年から 10 年の成果 —

# Exp331 DEEP HOT BIOSPHERE

## 沖縄熱水海底下生命圏掘削と 掘削後研究展開

高 井 研

**Drilling- and post-drilling-exploration of  
functionally active seafloor biosphere  
beneath Iheya North hydrothermal system**

**Ken Takai**

たかい けん：独立行政法人海洋研究開発機構  
海洋・極限環境生物圏領域

IODP331 次調査は、海底熱水直下生命圏の実証に焦点を当て、深部探査船「ちきゅう」を用いて、沖縄トラフ伊平屋北熱水フィールドの海底熱水噴出域の掘削・コアサンプルの回収、人工熱水噴出孔の創成を行った。海底熱水直下生命圏の存在の実証や海底下熱水滞留帯の熱水の特異性解明などの成果が挙げられている。

### 要約

IODP331 次調査は、深海熱水活動域における海底熱水直下生命圏の直接証明と海底下広域熱水循環系の構造と熱水の物理・化学的プロセス、そして海底下熱水活動に依存した微生物生態系の関わりの解明を目指した IODP 掘削研究提案 (IODP Proposal 601) に基づいて、特に海底熱水直下生命圏の実証に焦点を当て、深部探査船「ちきゅう」を用いて沖縄トラフ伊平屋北熱水フィールドの海底熱水噴出域の掘削・コアサンプルの回収、人工熱水噴出孔の創成を行った。計 5 つのサイトの掘削を行い、そのうち 3 つのサイトにおいて、リエントリーコーン、ステンレスパイプによるケーシング、ウェルヘッドアッセンブリから構成される人工熱水噴出孔を創成するとともに、1 つのサイトには掘削によって創成された新しい熱水噴出孔を形成した。伊平屋北フィールドの熱水活動の中心である NBC と呼ばれる巨大な熱水マウンドや近傍の C0016 サイトにおいては、硫化物や硫酸塩の熱水性鉱物が露出する海底を掘削し、コア回収率が極めて低かったものの、世界で初めて現在活動中の深海熱水域海底下に存在する黒鉱コアサンプルの回収に成功した。それ以外のサイトでは、変質を受けていない海洋堆積物と火山性破砕物の互層で構成される最表層とその下に広がる激しい熱水変質帯という共通した層序からなるコアサンプルを比較的高い回収率で得た。これらのコアの間隙水や溶存ガスの組成や濃度変化から、海底下熱水の存在様式や化学特性を明らかにした。その結果、海底下数メートルから数十メートルにおいて広範囲に渡る複数のキャップロック構造が形成され、その下部に気液二相分離と分配によって

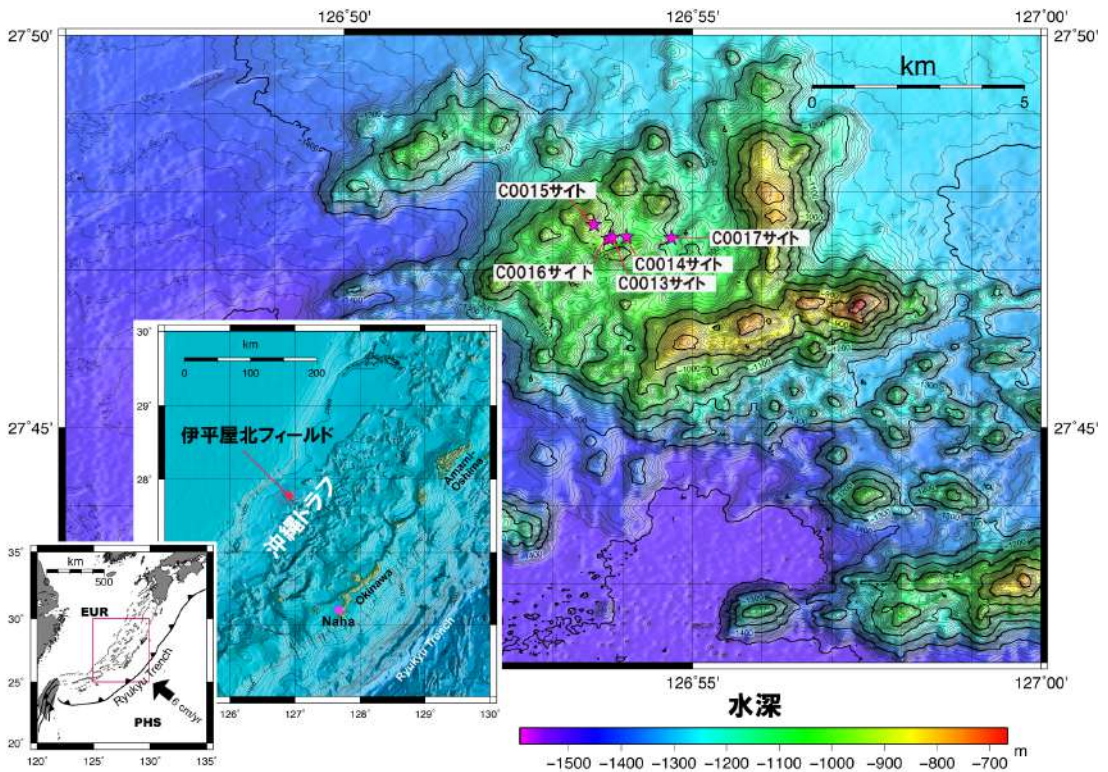


図1 沖縄トラフの位置, 中部沖縄トラフの海域図, 伊平屋北海丘の海底地形図, 掘削サイトの位置. EUR=ユーラシアプレート, PHS=フィリピン海プレート.

化学特性が大きく異なる熱水の滞留帯（あるいは熱水流路）が存在すること、また、その海底下熱水滞留帯が掘削前の予想を大きく超える空間的広がりであることが考えられた。この化学特性が大きく異なる熱水を導く海底下熱水流路の存在は、掘削後の人工熱水噴出孔を利用した熱水化学調査によって実証されただけでなく、海底下熱水の人工噴出によって自然熱水噴出ではほとんど観察されないような物理特性や鉱物組成を有した海底熱水沈殿物が形成されることも明らかとなった。IODP331 次調査は「ちきゅう」での様々な掘削方法によって回収されたコアサンプルを用いた微生物研究を主目的とする初めての調査であり、掘削・コア回収時の泥水・循環水からの化学成分や微生物の汚染が系統的に調べられた。その結果、

汚染の影響がない海底下コア中にも微生物細胞の存在が確認でき、海底熱水直下生命圏と言える微生物群集の存在が明らかとなった。さらに掘削後研究によって、世界で初めて IODP 研究調査での海底掘削が熱水化学合成生態系に及ぼす影響が系統的に調べられた結果、掘削によって熱水噴出パターンや噴出量に大きな変動が観察され、それらの変動が化学合成生物群集に新しい生息場の提供と既存群集の段階的の伝播をもたらすことが明らかとなった。

### 1. IODP331 次調査の科学目標

中央海嶺系、島弧背弧系、ホットスポット域といったマグマ活動が活発な海洋底において観察される現世の海底熱水活動は、地球規模での海洋元

素循環や化学組成の安定性と変動に重要な役割を果たしているだけでなく、海底化学合成生態系の成り立ちや広がり、海洋や地球生命の進化に大きな影響を及ぼしてきた。また深海底熱水活動によってもたらされるエネルギーや物質は、熱水噴出域近傍の海底での生命活動のみならず、海底熱水循環系を通じて、海底下に広がる膨大な空間規模と多様な機能を有した微生物生態系、特に熱水噴出域の海底下環境における海底熱水直下生物圏の存在様式や活動を支えていることが予想されている (Deming and Baross, 1993 ; Takai *et al.*, 2001)。これまで海底熱水直下生物圏の存在は、世界の様々な熱水域の高温熱水や低温熱水の生物地球化学・微生物学的研究を通じて間接的に示されてきた (Akerman *et al.*, 2013 ; Campbell *et al.*, 2013 ; Huber *et al.*, 2009 ; Perner *et al.*, 2011 ; 2013a ; 2013b ; Nunoura and Takai, 2009 ; Nunoura *et al.*, 2010 ; Takai *et al.*, 2008 ; 2009 ; and many references in Takai *et al.*, 2006 and Huber and Holden, 2008)。中部沖縄トラフに位置する伊平屋北熱水フィールドにおいても、海底に広がる多様な化学特性を示す高温・低温噴出熱水や熱水チムニー構造物中の微生物群集の解析や熱水化学組成の詳細な分析によって、多様な化学合成独立栄養微生物を一次生産者とする (空間的な広がりやバイオマス密度の観点から他の海底熱水直下生物圏に比べて)「肥沃な」海底熱水直下生物圏が存在することが示唆されてきた (図 1) (Nakagawa *et al.*, 2005)。また、その海底熱水直下生物圏が、熱水の海底下気液二相分離の影響を強く受けた微生物群集を形成していることも予想されている (Nakagawa *et al.*, 2005)。とりわけ、沖縄トラフの熱水に特徴的に観察される極めて高濃度の CO<sub>2</sub> や CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, あるいは熱変性を逃れた有機物といった炭素・窒素化合物の供給が、肥沃な海底熱水直下生物圏の形成に大きな影響を及ぼしていると考えられた (Nakagawa *et al.*, 2005 ; Kawagucci *et al.*, 2011)。さらに IODP の掘削研究提案のために展開された全海底熱水循環解明のための海底下構造の物理探査と伊平屋北フィールド熱水の地球化学・微生物学的特性の包

括的な解釈から、伊平屋北フィールドの海底熱水循環系が、熱水噴出域の火山地形 (伊平屋北海丘) 周辺だけでなく遙か遠く離れた (例えば数 10 km の水平距離) 沖縄トラフの陸源堆積物や火山性破砕物からなる分厚い堆積層における無数の断層と堆積層内流路を経て、最終的に伊平屋北海丘の熱源による熱水反応を通じて海底熱水として噴出するという全海底熱水循環構造が予想された (Kawagucci *et al.*, 2011 ; Tsuji *et al.*, 2011)。その極めて高温の熱水反応場と高温熱水流路や滞留帯を除くすべての熱水循環系環境において、海底下微生物群集の形成と熱水循環の物理・化学特性と密接に関わり合っていると考えられている (Kawagucci *et al.*, 2011)。IODP331 次調査の科学目標は、伊平屋北フィールドの海底熱水流路や滞留帯の形成やその熱水化学の変化に伴う海底熱水の物理・化学特性の変化に強く相関する活動的熱水直下生物圏の存在を直接的に証明することであった。IODP 掘削研究提案は、深海熱水活動域における海底熱水直下生命圏の直接証明と海底下広域熱水循環系の構造と熱水の物理・化学的プロセス、そして海底熱水活動に依存した微生物生態系の関わり方の解明を目指したものであったが、IODP331 次調査は、様々な事由により実質的な掘削オペレーションが 20 日程度という IODP においては異例の変則的な調査であったために、(1) 活動的熱水直下生物圏の存在の証明、(2) 海底熱水噴出域の海底熱水流路構造や熱水海水 (間隙水) 混合プロセス、熱水変質や熱水鉱床形成プロセスの解明、(3) 掘削後熱水活動の変化と熱水化学合成 (微) 生物生態系への影響研究のためのプラットフォームとしての人工熱水噴出孔の創成、を科学目標として設定した。

## 2. 調査の背景

沖縄トラフはフィリピン海プレートとユーラシアプレートの沈み込み帯における、琉球海溝とアジア大陸に挟まれた総延長 1200 km に及ぶ背弧海盆である (図 1) (Lee *et al.*, 1980 ; Letouzey and Kimura, 1986)。沖縄トラフを横断する地震波反射法探査

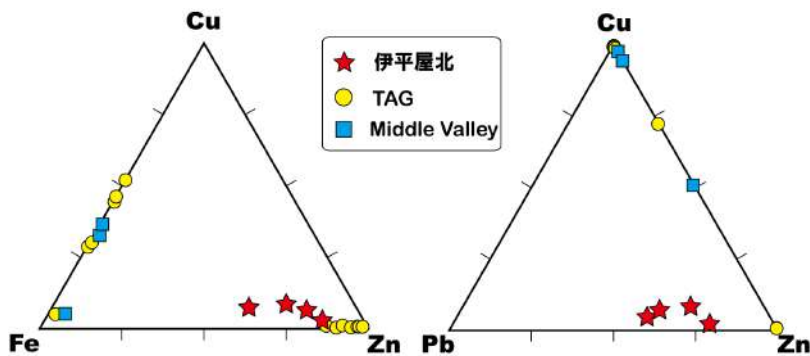


図2 伊平屋北フィールドから得られた硫化物沈殿物の金属組成の三相図. TAG=大西洋中央海嶺のTAGフィールドの巨大マウンドから得られた硫化物. MiddleValley=ファンデフーカ海嶺MiddleValleyフィールドから得られた硫化物.

の解釈から、海底下約6 kmに上部マントルが存在し、海底下約3-6 kmには玄武岩からなる海洋地殻、海底下1-3 kmには火成岩層、そして約1 kmにおよぶ堆積物が被覆していると考えられている (Letouzey and Kimura, 1986). 1988年に、中部沖縄トラフの伊是名海穴 Jade フィールドや伊平屋海嶺 Clam フィールドにおいて、沖縄トラフで初めて海底熱水活動が発見された (Halbach *et al.*, 1989; Sakai *et al.*, 1990). 以後、南奄西フィールド、伊平屋北フィールド、伊是名海穴 Hakurei フィールド、与論海丘フィールド、多良間海丘フィールド、鳩間海丘フィールド、第四与那国海丘フィールドといった多くの海底熱水活動域が見つかってきている。IODP331次調査の研究対象は伊平屋北フィールドであり、これまでの海洋科学掘削では初めてとなる大陸縁辺部の堆積物に覆われた背弧海盆における熱水域の科学掘削を目的としていた (図1)。この伊平屋北フィールドの地質学的な立地条件は、例えば熱水性硫化金属沈殿物形成における元素組成 (Zn, Pb, Cu に富んだ黒鉱型熱水金属沈殿物) や  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ , I, K に富んだ熱水化学組成といった、熱水活動の熱水鉱床学的・熱水化学的特性に大きな影響を及ぼしていると考えられる (図2) (Sakai *et al.*, 1990; Gamo *et al.*, 1991; Konno *et al.*, 2006; Takai and Nakamura, 2010; Kawagucci *et al.*, 2011). ユーラシアプレートに沈み込む「若くて熱い」フィリピン海プレートが、島弧背弧域において、K や揮発成分 (例えば  $\text{CO}_2$ ) に富んだデイサイト一流紋岩質マグマを供給する (Sakai *et al.*, 1990; Gamo *et*

*al.*, 2006). 一方沖縄トラフを覆う有機物に富んだ陸源堆積物から熱水の源である間隙水へ、熱変性や海底下微生物活動によって、 $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ , I 等が集積される (Gamo *et al.*, 1991; You *et al.*, 1994; Nakagawa *et al.*, 2005; Inagaki *et al.*, 2006; Nunoura and Takai, 2009; Nunoura *et al.*, 2010; Kawagucci *et al.*, 2011; 2013a). さらに、伊平屋北フィールドをはじめとする沖縄トラフの海底熱水活動は、およそ水深 500-1500 m の比較的浅い海底に分布し、その浅い水深のために、海底あるいは海底下においては沸騰し、気液二相分離による熱水化学成分の分化作用を強く受ける (Suzuki *et al.*, 2008; Kawagucci *et al.*, 2011; Kawagucci *et al.*, 2013a). このような地質学的立地条件によって制約される熱水活動の物理・化学特性と活動的熱水直下微生物群集の関わりを明らかにすることは、海底熱水活動域のみならず全地球的な海底下環境における海底下生物圏の成り立ちや駆動原理を理解する上で極めて重要な手がかりを与えることが期待された。

### 3. 調査の概要

IODP331次調査では、沖縄トラフ伊平屋北熱水フィールドの海底熱水噴出域の5サイトにおいて、掘削・コアサンプルの回収、人工熱水噴出孔の創成を行った (図3)。伊平屋北フィールドの熱水活動の中心である NBC とよばれる巨大な熱水マウンドを伴う高温熱水噴出サイトの直上と近傍 (C0016 サイト)、高温熱水噴出域から東側へ 100 m 離れた低温熱水噴出域と 450 m 離れた化学合成



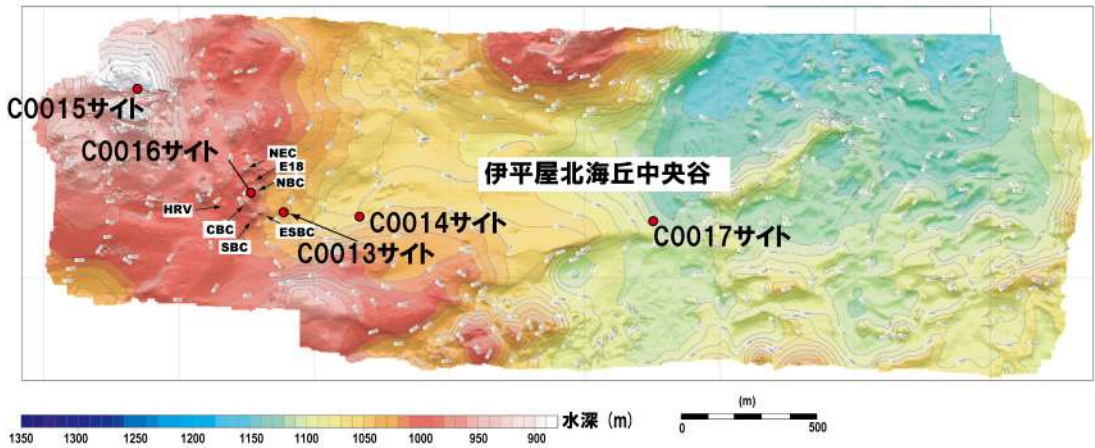


図3 伊平屋北熱水フィールドの拡大海底地形図と熱水イベントの位置と掘削サイト。HRV=高放射能マウンド、CBC=セントラルビッグチムニーマウンド、SBC=南ビッグチムニーマウンド、NEC=北端チムニーマウンド、E18=イベントマーカー18マウンド、NBC=北ビッグチムニーマウンド、ESBC=エセ南ビッグチムニーマウンド。

生物群集域（それぞれ C0013 サイトと C0014 サイト）、高温熱水噴出域から東側へ 1.6 km 離れた局所的な海水のリチャージゾーンと予想された C0017 サイト、そして過去の熱水噴出域を予想された C0015 サイトである（図 3）。このうち C0015 サイトは本来、海底下 300 - 400 m に存在するキャップロック構造を貫通することによって熱水反応場から上昇してくる初成的な高温熱水溜まりの存在を検証するためのサイトであるのに対し、実際の掘削は 27 m ほど掘削したにすぎない試掘であったことから、以後の記述からは除外する。

### 3.1) C0016 サイト

C0016 サイトでは頂部の直径約 6 m、高さ 20 - 30 m の NBC マウンドと呼ばれる熱水性沈殿物の頂部（C0016A 孔）とマウンドの西側基部（C0016B 孔）で掘削を行った。C0016 サイトでは高温熱水の噴出と極めて堅くて脆い硫化物鉱床の掘削が予想されたために、通常の掘削編成ではなく、Baker-HughesInteq (BHI) 社の大口徑（直径 4 インチ）の掘削編成が用いられた。C0016A 孔では、海底下数メートルを掘削した直後から高温のブラックスモーカーが噴出し、約 8 - 12 m まで掘り進むことができたが、その後ドリルパイプが破損し、掘

削を続行することもコアサンプルを回収することもできなかった。しかしながら、直径 50 cm 程の口径を有する新しい熱水噴出孔を創成することができ、以後この C0016A 孔熱水噴出孔は伊平屋北フィールドの最も活動的な高温熱水噴出孔となった（図 4）。C0016B 孔では海底下 45m まで掘削を行い、合計 2.1 m のコアサンプルの回収に成功した。コア回収率は極めて低かったが、C0016B 孔から得られたコアサンプルはすべて激しく熱水変質を被った岩石と塊状あるいは脈状金属硫化物であり、特に海底下 9-27 m の領域から得られた塊状金属硫化物は、Zn、Pb、Cu の硫化物に極めて富んだ黒鉱であることがわかった（図 5）。このコアサンプルは現在活動中の海底熱水活動域の海底下から得られた世界で初めての黒鉱であった。また、C0016B 孔を掘削中、海底下 38 m 付近から極めて激しいブラックスモーカーの噴出が観察され、掘削終了後、海底下 1 m までのケーシングしかできなかったが、リエントリーコーン、ステンレスパイプによるケーシング、ウェルヘッドアッセンブリーからなる人工熱水孔 C0016B を創成することに成功した。

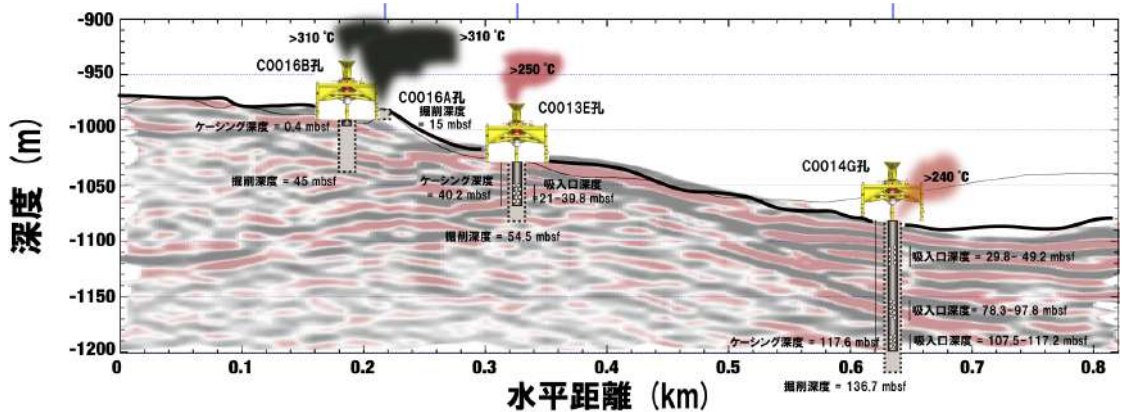


図4 掘削によって創成された新たな熱水噴出孔ならびに人工熱水噴出孔の模式図。創成直後の噴出する熱水の温度は、無人潜水機や温度感受性シールによって確認された温度。

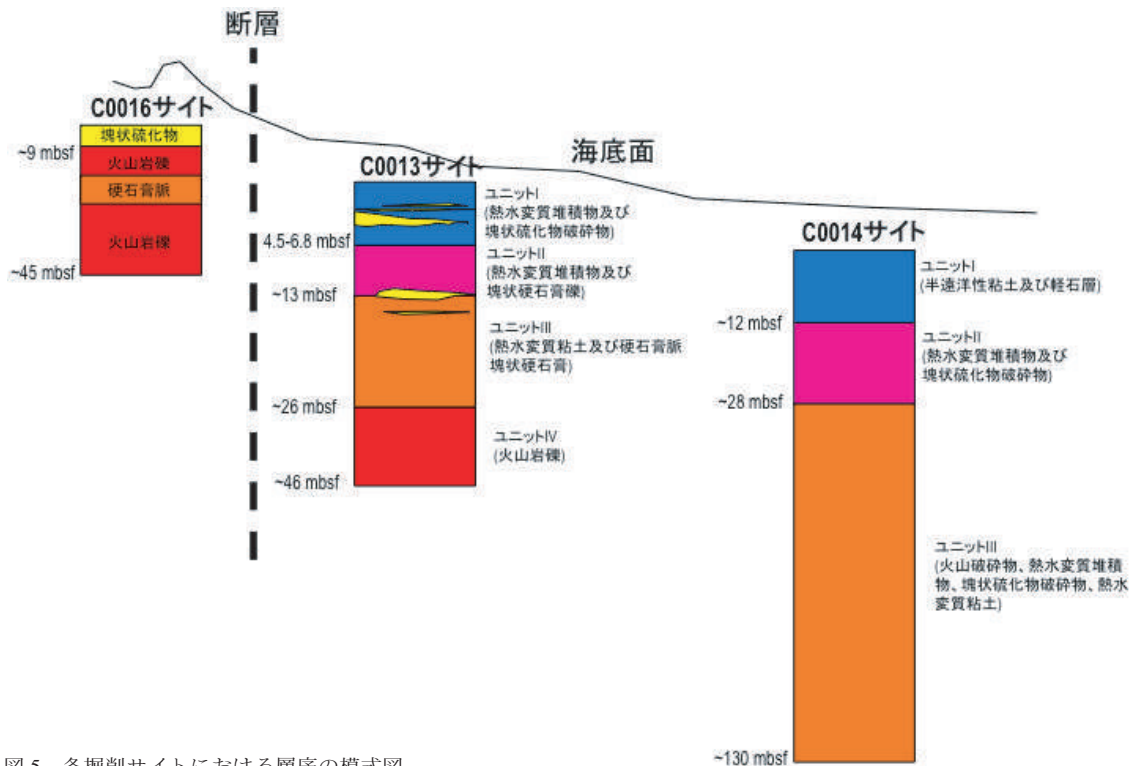


図5 各掘削サイトにおける層序の模式図。

### 3.2) C0013 サイト

C0013 サイトは、伊平屋北フィールドの高温熱水噴出サイトと巨大熱水マウンド群から東側に約 100 m 離れた低温熱水噴出域に位置し、熱水噴出

域の近傍にはゴエモンコシオリエビのコロニーが、その周辺には大きなシカイヒバリガイのコロニーが点在する地帯である。C0013 サイトでは計 8 つの孔の掘削が行われ、最大掘削深度は

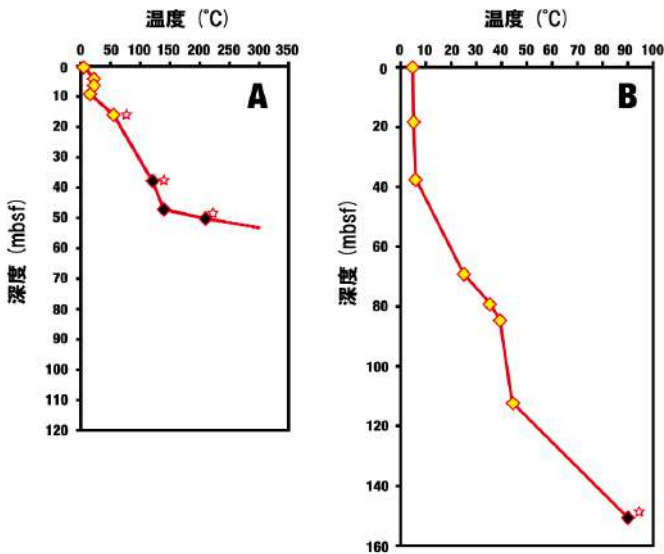


図6 C0014 サイト(A)とC0017 サイト(B)における温度測定の結果.黄色がAPCT3によって測定された温度.黒色が温度感受性シールによって確認された温度.

C0013E孔の54.5 mであった. C0013E孔には海底下21 - 39.8 mに熱水吸入口をもつ海底下40.2 mまでのケーシングが行われ, リエントリーコーンとウェルヘッドアッセンブリを合わせた人工熱水孔C0013Eが創成された(図4). 人工熱水孔作成直後から, 透明に近い高温熱水が噴出し, 掘削後1年以内に人工熱水噴出パイプが塞がるまで海底下熱水流路から直接噴出する高温熱水を噴出した. C0013サイトでは, 海底下0-2, 7-10, 20-30 mに極めて堅い不透水性のキャップロック構造が認められ, その直下には激しい熱水変質帯と熱水成分に富んだ間隙水が存在した(図5). また掘削中, キャップロックを貫通する度に激しい熱水噴出が観察された. このような熱水変質によるキャップロック構造の生成が, 水平方向に広がる海底下熱水流路や滞留層の形成を規定しており, また鉛直方向における熱水の密度分配を促し, さらに再混合を阻害していることが考えられた.

### 3.3) C0014 サイト

C0014 サイトは, 伊平屋北フィールドの高温熱水噴出サイトと巨大熱水マウンド群から東側に約450 m離れた低温熱水漏洩域に位置し, 掘削前には明らかな熱水噴出はほとんど見られず, 多くの場所が堆積物に覆われ, シロウリガイのコロニー

が点在する地帯であった. C0014 サイトでは計7つの孔の掘削が行われ, 最大掘削深度はC0014G孔の136.7 mであった. C0014G孔には海底下30-50, 80-100, 108-117 mに熱水吸入口をもつ海底下117.8 mまでのケーシングが行われ, リエントリーコーンとウェルヘッドアッセンブリを合わせた人工熱水孔C0014Gが創成された(図4). ほぼ人工熱水孔作成直後から, 透明に近い高温熱水が噴出し, 掘削後2年半以上, 海底下熱水流路から直接噴出する高温熱水を噴出している. C0014サイトでは, 海底下25-50 mまでの領域では, 堆積物と軽石のような火山性破砕物の互層が認められ, その後, 30-43 mと90-95 mに明確なキャップロック構造とその下に広がる熱水変質帯が観察された. C0014サイトの掘削中には, APCT3自己記録温度計シューと温度感受性シールを用いた温度測定を行った(図6). その結果, 海底下47 mまではおよそ3°C/mの温度勾配で約150°Cまで温度が上昇した. その後, 急激に温度が上昇したことから, 高温熱水滞留帯に至ったことが考えられる. C0014サイトの堆積構造はC0013サイトとほぼ共通していたが, C0013サイトよりも堆積物と軽石のような火山性破砕物の最表層堆積物が多く見られ, 熱水活動や断層活動に

伴う斜面崩壊や地滑りによって再堆積したものであると考えられた(図5)。間隙水の化学組成の変化や微生物細胞数の計測の結果から、この最表層堆積物のなかにもいくつかの不透水性の層準が認められ、その不透水性層に制約された熱水海水(間隙水)の混合域で、活動的な海底熱水直下微生物群集が形成されていることがわかりつつある。

#### 3.4) C0017 サイト

C0017 サイトは、伊平屋北フィールドの高温熱水噴出サイトと巨大熱水マウンド群から東側に約1.6km離れた地温勾配が極めて低い局所的な海水浸透域であると予想された場所に位置し、掘削前には全く熱水噴出や化学合成生物群集の存在が認められなかった地帯である。C0017 サイトでは計4つの孔の掘削が行われ、最大掘削深度はC0017D孔の150.7mであった。C0017 サイトでは、掘削中明らかな熱水噴出は認められなかったが、最下層(1507m)では、約90°Cまで温度が上昇した(図6)。C0017 サイトの温度勾配から、海底下約50mまでは温度がほとんど上昇せず、その直下の不透水性層から徐々に温度が上昇してゆく傾向が見られた(図6)。この温度プロファイルから、海底下約50mまでは、比較的激しい海水が浸透や移流が存在し、最下層よりさらに海底下には高温熱水流路や滞留層が存在し、海底下約50-150mの領域においては鉛直方向の熱伝導によって温度上昇が起きていることが考えられた。この最表層の海水流の存在と掘削深度より深い場所での高温熱水流の存在は、間隙水の化学組成の結果からも確認されており、特にC0017 サイトにおける高温熱水流路や滞留層の存在は、掘削前のサイトサーベイからは全く予想できない現象であった。海底面での観察から、伊平屋北熱水フィールドの海底下熱水流構造は、NBCを中心にした500m程度の範囲内に存在するという予想は、掘削による検証によって、少なくとも数km以上の遙かに広い領域に広がっている可能性が示された。

3.5) コンタミネーション評価法の確立と予察的微生物学的解析

IODP331 次調査では、すべての掘削泥水に Per-

fluoromethylcyclohexane (PFT) を混入させ、回収されたコアサンプルから切り出された半割しないサブサンプルコアの中心部と縁辺部から、PFT による化学的な液体コンタミネーションを定量的に見積もった。また、いくつかの水圧コアリング(HPCS) で回収されたコアについては蛍光ビーズによる物理的粒子のコンタミネーションを見積もった(Yanagawa *et al.*, 2013)。さらに得られた掘削泥水とコアサンプルの中心部と縁辺部から微生物のDNAを抽出し、16SrRNA 遺伝子のクローン解析によって、PFT および蛍光ビーズによるコンタミネーションテストと実際の微生物学的コンタミネーションとの整合性についても検証を行った(Yanagawa *et al.*, 2013)。その結果、極めて多孔性で固結していない層準のみがコアサンプルとして回収された場合、掘削編成によらず、泥水による化学的なコンタミネーションの影響を強く受けることがわかった。一方、コア回収率が高い場合、微生物学的解析に用いられるコア中心部にはほとんど化学的・微生物学的コンタミネーションが見られず、高品質な試料が得られることがわかった(Yanagawa *et al.*, 2013)。いずれにせよPFT および蛍光ビーズによるコンタミネーションテストと実際の微生物学的コンタミネーションは強く相関していることが示され、船上コンタミネーションテストによって、コンタミネーションの危険性が示された試料については十分注意を払って分析・解釈する必要があることが示された。一方、船上での微生物細胞計数や培養実験の結果からは、C0016 サイトやC0013 サイトのような海底下数メートルにおいて高温熱水噴出が認められた場所においては、最表層を除くほとんどすべての層準で計数可能な微生物細胞や培養可能な微生物を確認することができなかった。しかしながら、C0014 サイトの海底下10-20mまでの領域では、堆積物と軽石のような火山性破砕物の互層において有意な微生物細胞密度が確認され、またC0017 サイトにおいても掘削最大深度までの領域で、検出可能な微生物群集の存在が確認された。現在、間隙水中の生物地球化学プロファイルや放射性同



位元素でラベルした基質によるトレーサー実験、分子生態学的手法を用いた微生物群集の組成解析や培養実験によって、C0013サイトの最表層部、C0014サイトやC0017サイトにおける海底熱水直下微生物群集構造やその機能について解析が進んでおり、掘削前に予想した（空間的な広がりやバイオマス密度の観点から）「肥沃な」海底熱水直下生物圏とは、かなり空間的広がりやバイオマス密度、さらに微生物組成や機能が異なるものの、伊平屋北熱水活動域の直下に存在する海底下微生物群集の全貌が明らかになりつつある。

#### 4. 掘削後研究展開

IODP331次調査において創成された人工熱水噴出孔から噴出する海底下高温熱水流路や滞留層の熱水の物理・化学的性質やその時間的変動を調べるため、また掘削オペレーションによって生じた伊平屋北フィールドの環境の変化が熱水化学合成生物群集に及ぼす影響を調べるため、掘削終了後2年間に渡って、約半年に一回以上の回数で無人潜水機（ROV）による海底観察や試料採取などの調査を行った（Kawagucci *et al.*, 2013b）。掘削終了後5ヶ月後の調査では、C0016Aの新しい熱水噴出孔、C0016B人工熱水噴出孔、C0013E人工熱水噴出孔、C0014G人工熱水噴出孔から激しい高温熱水噴出が観察され、それぞれ伊平屋北フィールドで観測された熱水の最高温度に等しい高温熱水であった（Kawagucci *et al.*, 2013b）。熱水の化学組成の詳細な解析から、これまで海底の自然熱水噴出孔から採取された例がない、海水よりも塩濃度が高く（Cl濃度が高い）、ガス成分に枯渇した気液二相分離の液相に富んだ熱水が噴出していることが明らかになった（Kawagucci *et al.*, 2013b）。特にC0016AやC0016Bでその傾向は顕著であり、海底下気液二相分離と密度分配によって、海底下熱水滞留層の下部に滞留した海底下高温熱水を噴出させることに成功したと考えられた。またC0016A噴出孔やC0016B人工熱水噴出孔の海底面では、極めて急速に成長するチムニー構造物が観察された。急速に成長した熱水沈殿物であるのに関わら

ず、その鉱物組成はZn、Pb、Cuの硫化物に富んだ黒鉱であった。掘削によって形成された噴出孔に特異的に大規模な黒鉱沈殿物が生成される理由としては、熱水の化学成分の変化の可能性も考えられたが、おそらく掘削によって形成された大口径の熱水噴出孔によって熱水噴出量が増加するといった熱水噴出の物理特性の変化がもたらした可能性が高い（Kawagucci *et al.*, 2013b）。C0016B人工熱水噴出孔やC0014G人工熱水噴出孔では、掘削終了後2年間に渡って（実際は3年以上）高温熱水の噴出が継続している。その間徐々に化学組成（特に塩濃度）が掘削前の自然噴出熱水の組成に戻りつつあることが確認されている（Kawagucci *et al.*, 2013b）。一方、C0016B人工熱水噴出孔やC0014G人工熱水噴出孔が時間経過とともに、海底噴出孔が熱水沈殿物で塞がり始めるにつれ、人工熱水噴出孔の下部や人工熱水噴出孔以外の掘削孔から熱水噴出が認められるようになった。特にC0014サイトでは、掘削終了後1年経過してから、人工熱水噴出孔以外の6つの掘削孔から大量の高温・低温熱水が噴出し始め、堆積物に覆われた静かな海底だった地帯が、大きな低温熱水噴出地帯へと変貌した。それに伴い、広範囲にわたるイトエラゴカイのコロニーが形成され、さらに大量のゴエモンコシオリエビの移住（あるいは繁殖）によるコロニー形成が続いた。C0016B人工熱水噴出孔周辺にも、掘削前は生物密度が極めて希薄な薄く堆積物に覆われた熱水性沈殿物の海底であったのに関わらず、掘削終了後1年半経過してから、大量のゴエモンコシオリエビの移住（あるいは繁殖）によるコロニー形成が観察された。これらの掘削後研究は、IODP科学研究での海底掘削が熱水噴出パターンや噴出量、あるいは熱水化学特性といった熱水活動にどのような影響を及ぼすか、そして海底熱水活動域の環境変化が化学合成生物群集にどのような影響を与えるかを世界で初めて系統的かつ定量的に明らかにした研究であり、近年注目を集めている海底熱水鉱床開発に伴う環境影響の評価研究のマイルストーンとなるべき革新的な成果となった。

## 5. 展望

IODP331 次調査は、海底熱水直下生命圏の実証に焦点を当て、深部探査船「ちきゅう」を用いて、沖縄トラフ伊平屋北熱水フィールドの海底熱水噴出域の掘削・コアサンプルの回収、人工熱水噴出孔の創成を行った。人工熱水噴出孔を創成は、掘削後研究の展開に大きく貢献しただけでなく、全く新しい海底熱水資源開発研究の可能性を切り開くことになった。また掘削によって得られたコアの間隙水溶存成分や溶存ガスの組成や濃度変化から、海底下熱水の存在様式や化学特性を明らかにしただけでなく、微生物学的成果と包括的に解釈することによって、海底熱水直下微生物群集の存在証明およびその広がりや多様性・機能の解明に繋がっている。しかしながら既に述べたように、元々の IODP 掘削研究提案は、伊平屋北熱水活動域における海底熱水直下生命圏の直接証明と海底下広域熱水循環系の構造と熱水の物理・化学的プロセス、そして海底下熱水活動に依存した微生物生態系の関わり方の解明を目指したものであった。IODP331 次調査は、IODP においては異例の変則的な調査であったために IODP 掘削研究提案の科学目標の一部を達成したに過ぎず、本来の海底下広域熱水循環系の構造と熱水の物理・化学的プロセス、そして海底下熱水活動に依存した微生物生態系の関わり方については未だ全く検証されていないままである。そのような繰り言をチクチクと漏らしながら、今後、より強力な科学提案を再提出し、2001 年以来取り組んできた「伊平屋北熱水活動域における海底下広域熱水循環系の構造と熱水の物理・化学的プロセス、そして海底下熱水活動に依存した微生物生態系の関わり方の解明」を進展させることを「断固たる決意」で臨みたい。それを本稿の結びとしたい。

謝辞：IODP331 次調査を行うにあたって、極めて難度の高い操船を的確に安全に成し遂げた地球深部探査船「ちきゅう」の全乗組員、「ちきゅう」未経験の海底熱水掘削に際して現場での速やかか

つ臨機応変な対応によって予想を上回るコア回収や人工熱水噴出孔の創成を完遂した掘削チーム、船上でのコア処理や船上分析に際してルーチン作業のみならず、研究者のリクエストに柔軟に対応しやり遂げた船上テクニシャン、船上での作業だけでなく、調査前、調査中、調査後にわたり本研究を支えてくれたマントルクエストジャパン、マリワーク、海洋研究開発機構地球深部探査センターの職員、そして、2001 年の研究提案の提出から 2010 年の調査に至るあらゆる過程で研究実施のために協力してくれた関係者、これらすべての人々の協力・尽力・サポートがなければ IODP331 次調査の成功は不可能であった。また掘削後研究展開においては、海洋調査船での研究を実行するにあたり、日本海洋事業、海洋研究開発機構海洋・極限環境生物圏領域や海底資源研究プロジェクトの職員に多大な協力なしには実施できなかった。この場を借りて、これらすべての人々の協力・尽力・サポート・励ましに深く感謝する。また IODP 331 次調査は、別名「ちきゅう広報調査」と呼ばれるほど、調査の現場や成果や派生研究について多面的なアウトリーチを展開し、科学掘削の一般社会へ浸透・興味の喚起に多大な成功を取めたと自負している。このアウトリーチ活動の成功は海洋研究開発機構地球深部探査センター、海洋・極限環境生物圏領域及び広報関係部署の職員の努力の賜物である。

## 参考文献

- [ 1 ] Akerman, N. H., Butterfield, D. A. and Huber, J. A. (2013) : Phylogenetic diversity and functional gene patterns of sulfur - oxidizing sub sea floor Epsilonproteobacteria in diffuse hydrothermal vent fluids. *Front. Microbiol.* 4, 185.
- [ 2 ] Campbell, B. J., Polson, S. W., Zeigler Allen, L., *et al.* (2013) : Diffuse flow environments within basalt - and sediment - based hydrothermal vent ecosystems harbor specialized microbial communities. *Front. Microbiol.* 4, 182.
- [ 3 ] Deming, J. W. and Baross, J. A. (1993) : Deep - seasmokers : windows to a subsurface biosphere? *Geochim. Cosmochim. Acta* 57, 3219. 3230.
- [ 4 ] Gamo, T., Sakai, H., Kim, E. - S., *et al.* (1991) : High alkalinity due to sulfate reduction in the CLAM hydrothermal field, Okinawa Trough. *Earth Planet. Sci. Lett.* 107,

328v338.

- [ 5 ] Halbach, P., Nakamura, K., Wahsner, M., *et al.* (1989) : Probable modern analogue of Kuroko - type massive sulfide deposits in the Okinawa Trough back - arcbasin. *Nature* 338, 496 - 499.
- [ 6 ] Huber, J. A. and Holden, J. F. (2008) : Modeling the impact of diffuse vent microorganisms along Mid - Ocean Ridges and Flanks. *Geophys. Monogr. Ser.* 178, 215 - 231.
- [ 7 ] Huber, J. A., Morrison, H. G., Huse, S. M., *et al.* (2009) : Effect of PCR amplicon size on assessments of clonelibrary microbial diversity and community structure. *Environ. Microbiol.* 11, 1292 - 1302.
- [ 8 ] Kawagucci, S., Chiba, H., Ishibashi, J., *et al.* (2011) : Hydrothermal fluid geochemistry at the Iheya North field in the mid - Okinawa Trough : Implication for origin of methane in subseafloor fluid circulation systems. *Geochemical J.* 45, 109 - 124.
- [ 9 ] Kawagucci, K., Ueno, Y., Takai, K., *et al.* (2013a) : Geochemical origin of hydrothermal fluid methane in sediment - associated fields and its relevance to the geographical distribution of whole hydrothermal circulation. *Chem. Geol.* 339, 213 - 225.
- [10] Kawagucci, S., Miyazaki, J., Nakajima, R. *et al.* (2013b) : 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.
- [11] Konno, U., Tsunogai, U., Nakagawa, F., *et al.* (2006) : Liquid CO<sub>2</sub> venting on the seafloor : Yonaguni Knoll IV hydrothermal system, Okinawa Trough. *Geophys. Res. Lett.* 33, L16607.
- [12] Lee, C. - S., Shor, G. G., Bibee, L. D., *et al.* (1980) : Okinawa Trough : origin of a back - arcbasin. *Mar. Geol.* 35, 219 - 241.
- [13] Letouzey, J. and Kimura, M. (1986) : The Okinawa Trough : genesis of a backarc basin developing along a continental margin. *Tectonophysics*, 125, 209. 230.
- [14] Nakagawa, S., Takai, K., Inagaki, F., *et al.* (2005) : Variability in microbial community and venting chemistry in a sediment - hosted backarc hydrothermal system : impacts of subsea floor phase - separation. *FEMS Microbiol. Ecol.* 54, 141 - 155.
- [15] Nunoura, T. and Takai, K. (2009) : Comparison of microbial communities associated with phase - separation - induced hydrothermal fluids at the Yonaguni Knoll IV hydrothermal field, the Southern Okinawa Trough. *FEMS Microbiol. Ecol.* 67, 351 - 370.
- [16] Nunoura, T., Oida, H., Nakaseama, M., *et al.* (2010) : Archaeal diversity and distribution along thermal and geochemical gradients in hydrothermal sediments at the Yonaguni Knoll IV hydrothermal field in the southern Okinawa Trough. *Appl. Environ. Microbiol.* 76, 1198-1211.
- [17] Perner, M., Hentscher, M., Rychlik, N., *et al.* (2011) : Driving forces behind the biotope structures in the low - temperature vent in 5°S and 9°S MAR. *Environ. Microbiol. Repts.* 3, 727-737.
- [18] Perner, M., Gonella, G., Hourdez, S., *et al.* (2013a) : In-situ chemistry and microbial community compositions in five deep - sea hydrothermal fluid samples from Irina II in the Logatchev field. *Environ. Microbiol.* 15, 1551 - 1560.
- [19] Perner, M., Hansen, M., Seifert, R., *et al.* (2013b) : Linking geology fluid chemistry and microbial activity of basalt - and ultramafic - hosted deep - sea hydrothermal vent environments. *Geobiology* 11, 340 - 355.
- [20] Sakai, H., Gamo, T., Kim, E. - S., *et al.* (1990) : Unique chemistry of the hydrothermal solution in the mid - Okinawa Trough backarc basin. *Geophys. Res. Lett.* 17, 2133 - 2136.
- [21] Suzuki, R., Ishibashi, J., Nakaseama, M., *et al.* (2008) : Diverse range of mineralization in ducted by phase separation of hydrothermal fluid : case study of the Yonaguni Knoll IV hydrothermal field in the Okinawa Trough back - arcbasin. *Res. Geol.* 58, 267 - 288.
- [22] Takai, K., Komatsu, T., Inagaki, F. and Horikoshi, K. (2001) : Distribution of archaea in a black smoker chimney structure. *Appl. Environ. Microbiol.* 67, 3618 - 3629.
- [23] Takai, K., Nakagawa, S., Reysenbach, A. L. and Hoek, J. (2006) : Microbial ecology of mid - ocean ridges and backarc basins. *Geophys. Monogr.* 166, 185 - 213.
- [24] Takai, K., Nunoura, T., Ishibashi, J., *et al.* (2008) : Variability in the microbial communities and hydrothermal fluid chemistry at the newly discovered Mariner hydrothermal field, southern Lau Basin. *J. Geophys. Res.* 113, G02031.
- [25] Takai, K., Nunoura, T., Horikoshi, K., *et al.* (2009) : Variability in microbial communities in black smoker chimneys at the NW caldera vent field, Brothers Volcano, Kermadec arc. *Geomicrobiol. J.* 26, 552 - 569.
- [26] Tsuji, T., Takai, K., Oiwane, H., *et al.* (2012) : Hydrothermal fluid flow system around the Iheya North Knoll in the mid - Okinawa trough based on seismic reflection data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 213 - 214, 41 - 50.
- [27] Yanagawa, K., Nunoura, T., McAllister, S. M., *et al.* (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

□