



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

ファンデフーカ海嶺翼部 における IODP Expedition 301 航海

浦 辺 徹 郎
中 川 聡
辻 健

**Brief outline of the Exp. 301 Cruise of
JOIDES Resolution in the Juan de Fuca
Ridge area**

**Tetsuro Urabe • Satoshi Nakagawa • Takeshi
Tsuji**

うらべ てつろう：東京大学名誉教授
なかがわ さとし：北海道大学大学院水産科学研究院
つじ たけし：九州大学カーボンニュートラル・
エネルギー国際研究所 (I²CNER)

統合国際深海掘削計画の最初の航海 Exp. 301 は、国際深海掘削計画 (IODP) の大きな成果の一つである海底下微生物圏の発見と、機器上の成果である CORK 装置を組み合わせた計画として行われた。ファンデフーカ海嶺東翼で行われた本航海とその成果について概観する。

1. はじめに

統合国際深海掘削計画 (IODP) Exp. 301 航海は、2004 年 6 月 27 日から 8 月 20 日にかけてアメリカ西海岸ワシントン州沖 250 km において行われた (図 1)。この航海の目的は JOIDES Resolution 号を用いて、ファンデフーカ海嶺東翼の海洋地殻中の広域熱水循環と、水文地質学的な性質、およびそれに伴う熱水変質と微生物生態の挙動を明らかにすることであった (Fisher *et al.*, 2005)。本航海のコチーフは A. Fisher と浦辺徹郎で、それ以外に日本から清川昌一、稲垣史生、後藤秀作、中川聡、坂口真澄、野口拓郎、辻健が参加した。

2. ファンデフーカ海嶺

航海が行われたファンデフーカ海嶺東翼では 1996 年に最初の掘削航海 ODP Leg168 が実施され、その掘削孔の一つから採取された熱水と、有人潜水艇アルビン号により付近の基盤岩の露出域 Baby Bare から湧出が確認された熱水との温度と化学組成がよく一致する事が知られていた。堆積物に覆われた玄武岩質の海洋地殻最上部に透水率がきわめて高い層準、いわゆる「海底下の海」があって、その中を中温 (60–70°C) の熱水が流れている (Wheat and Mottl, 2000)。

Exp. 301 航海では、複数の掘削孔を用いてキロメートルオーダーでの地殻内での水の動きを観測するために、前回の航海で設置したものの不具合のあった CORK (後述) 観測装置 1 台を回収し、新たに改良型 CORK2 台を設置した。海嶺翼部の低温の熱水循環によって、海底下の広範な範囲で微生物圏に化学合成エネルギー源が供給されているという推定 (Cowen *et al.*, 2003) を確かめるのが目的である。翼部の熱水循環は、海嶺軸部

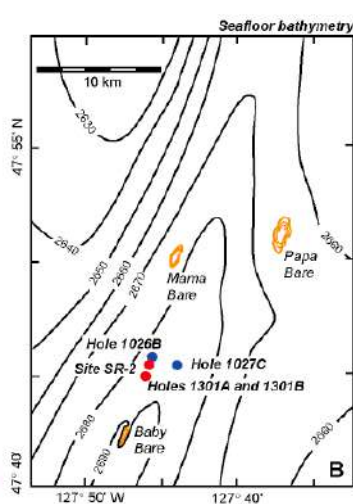
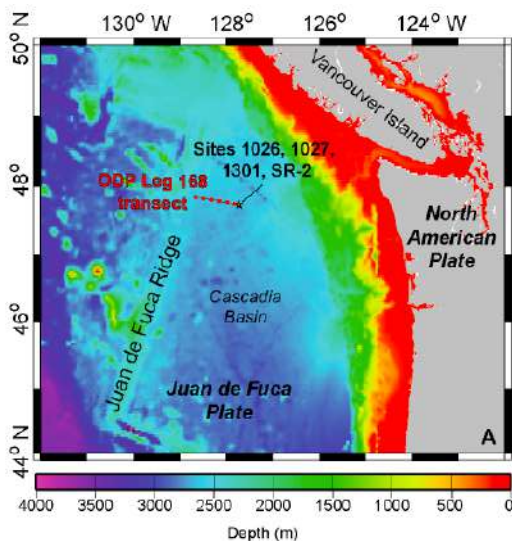


図1 IODP Expedition 301のサイトマップ (Fisher *et al.*, 2005). A. ファンデフーカ海嶺の東翼に位置している. B. 詳しい掘削孔の位置.

(<百万年)のそれと比べて、総量では熱放出量にして3倍以上、物質循環量で10倍以上を担っていると計算されており、きわめて重要な現象である (Mottl and Wheat, 1994).

ファンデフーカ海嶺東翼は北米大陸岸に近く、3百万年前以降の厚いタービダイト層に覆われている (図2)。そのため、それが不透水性キャップとなって直下の海洋地殻中に熱水貯留層が形成されている。そのため循環水の温度が同じ年代の他の海嶺翼部のそれより数十℃高く、さらに、その熱水が拡大軸から翼部に向かって流れるのではなく、軸と平行な方向に循環していることが分かっていた (Davies *et al.*, 1999)。

3. 堆積物についての研究

乗船者の一人である清川および共同研究者は堆積物中の重鉍物の頻度および化学組成を分析し、それらの供給源を明らかにした。同時にナンプランクトンにより年代測定を行い、どのくらいの堆積速度および、海底がいつから堆積物が覆われていたかを明らかにした (Kiyokawa and Yokoyama, 2009)。

この海域の堆積物の供給地である北米大陸西岸にはコロンビア川とフレーザー川の2本の大河川が知られており、それぞれ異なった地質帯を流域

としている。コロンビア川流域では、広く15 Maの洪水玄武岩が広がり、東方は北カスケード島弧断片、第四紀火山岩、原生代基盤岩変成岩類からなる。一方フレーザー川流域では、付加体であるランゲリア・テレーン、白亜紀島弧の花崗岩帯、古生代付加体キャッシュクリーク層、原生代変成基盤帯、およびロッキー山脈の古生代層からなる。それらの結果、フレーザー川が主たる堆積物の供給源であると考えられることが分かった (Kiyokawa and Yokoyama, 2009)。

後藤は堆積物と岩石の物性計測を行った。というのも、それらの熱物性を理解することは、地下の温度構造を推定する上で重要な制約条件を与えるからである。熱物性には熱伝導率 (K)、熱容量 (ρc_p)、それに熱拡散率 (κ) の3種類がある (熱容量は密度 (ρ) と比熱 (c_p) の積)。これらは、 $\kappa = K / \rho c_p$ という簡単な関係で与えられる。海底堆積物の熱伝導率は、熱流量を決定するために精力的に計測されているが、その一方で、熱容量や熱拡散率についてはこれまでほとんど計測されていなかった。

これまでODPの掘削航海では、海底堆積物の熱伝導率の計測がルーチン的に行われていた。その計測では、ニードル・プローブと呼ばれる、ヒーター線と温度センサーを封入した直径数ミリの

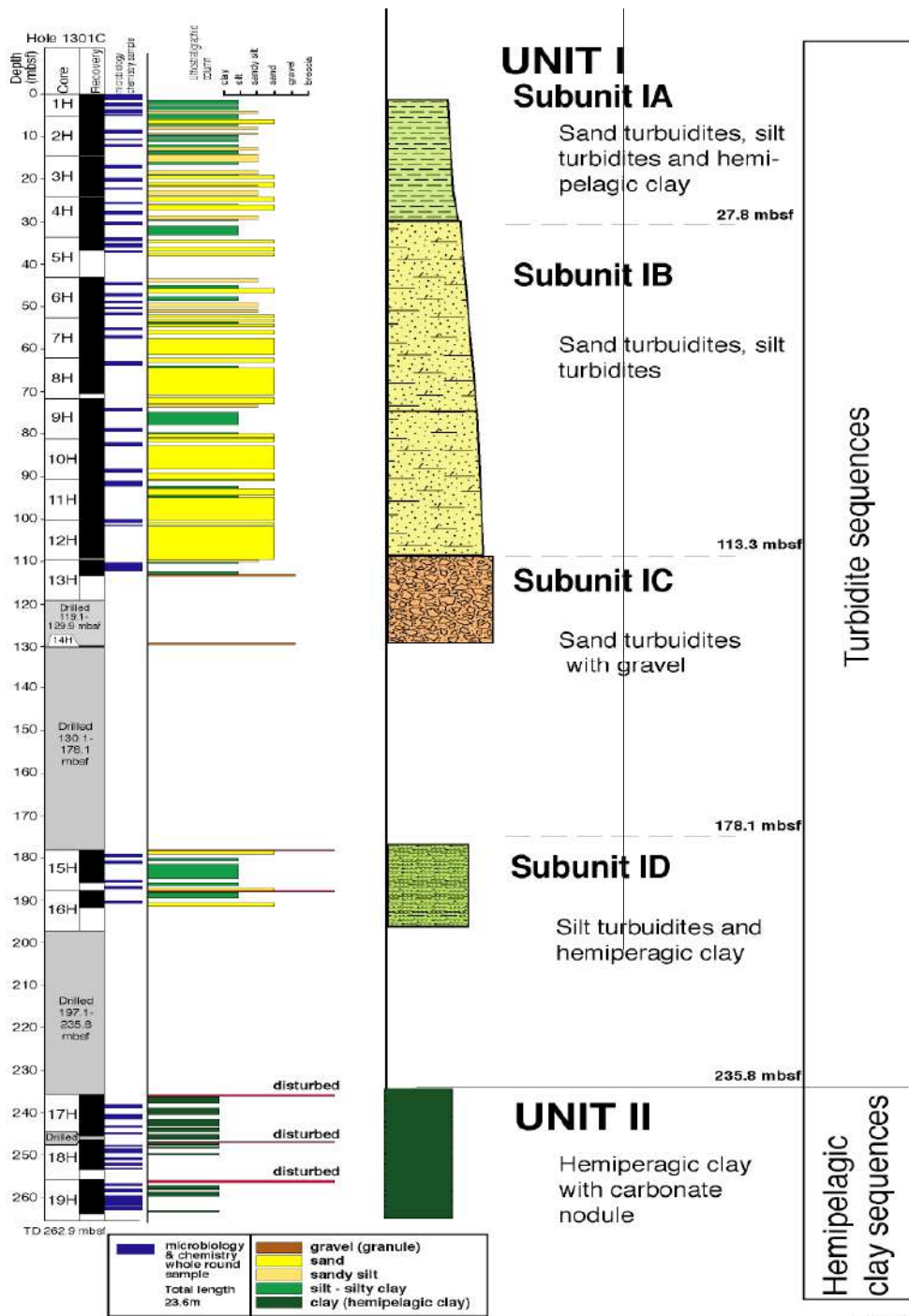


Figure 1301-D-1

図2 1301Cコアの岩相。ユニット1がタービダイト層、ユニット2が半遠洋性堆積物とはっきり分かっている (航海報告より)。

「針」を堆積物に差し込んで数分間加熱し、その温度変化から熱伝導率を見積もる。この温度変化には、熱伝導率だけでなく熱容量や熱拡散率の情報も含まれているが、船上では熱伝導率のみが見積もられていた。本研究では、ニードル・プローブで得られた温度データから熱伝導率と熱容量を見積もる手法を開発し、本航海で実際に得られた温度データに適用した。その後、上述した熱物性の関係式から残りの熱拡散率を算出し、それぞれの熱物性の関係を調べた。

泥質堆積物の熱伝導率と熱拡散率の鉛直プロファイルと比較すると、両者には明瞭な正の相関が見られた。一方、熱伝導率と熱容量の鉛直プロファイルと比較したところ、負の相関を示した。また、熱物性と間隙率の鉛直プロファイルと比較した。その結果、熱伝導率と熱拡散率は間隙率に負の相関を示し、逆に熱容量は正の相関を示した。

タービダイトについては、ばらつきの大きい熱物性値が得られた。しかし、その熱物性値は泥質堆積物に対するものとは明らかに異なっていた。これは、堆積物を構成する鉱物の組成が熱物性に大きく影響を与えていることを示している。

4. 堆積物中の間隙水についての研究

野口およびアラスカ大学の Wheat は、堆積物中の間隙水の地球化学的性質の検討を行った。船上における無機地球化学分析では、間隙水の陽イオン・陰イオン、栄養塩（アンモニウム、リン酸、ケイ酸）、重金属元素、pH、アルカリ度などの測定が行われた。本航海の海域では、ODP Leg. 168 において掘削および CORK の設置が行われており、その際の 1026 サイトで得られた間隙水のデータが報告されている。今回の 1301 サイトにおける間隙水中の化学成分（主成分陽イオン、陰イオン、栄養塩、pH など）の鉛直分布は、1026 試料とよく一致しており、海底下約 50 m と 125 m において活発な硫酸還元を示す結果が得られた。硫酸還元層においては堆積物中のメタン濃度および溶存バリウム濃度が高くなっていることが明らかになり、また、アルカリ度や塩素イオン、アンモニウ

ムイオン濃度は、掘削海域を通過する中温熱水と同源とされる Baby Bare 熱水域の端成分組成を持つことが確認された。

一方、鉄、マンガン、ホウ素、ストロンチウムなどの鉛直分布は 1301 と 1026 の結果に違いが生じた。鉄やマンガンは酸化還元の影響を受けやすい元素であり、本航海では間隙水の絞り出しに際して、汚染が予想される堆積物コア表面の除去 (peeling) を行う時に、空気による酸化を防ぐため簡易グローブボックス内に窒素ガスを充填して作業を行った。その結果、実際の海底下環境における間隙水の鉛直分布を得られることができたと考えられる。ポストクルーズの研究として無機地球化学分野では希土類分析や鉛同位体分析を行っており、低温熱水循環による熱水変質や微生物活動との相互作用に関する知見が得られることが期待される。

ブレーメン大学の Heuer は LC/MS を使って水に可溶性の代謝物質の炭素同位体を測定する手法をこの堆積物に応用した。彼女が目じたのは酢酸塩である。酢酸は独立栄養微生物により水素と二酸化炭素から生成されたり、発酵によって作られたりする一方、これを使って硫酸還元を行ったり、酢酸を分解してメタン生成をおこなう微生物活動があることから、それぞれの代謝に特徴的な炭素同位体の分別を手がかりに 1301 サイトの堆積物に適用して調べている。まだ確定的な結果は得られていないが、注目に値する研究である。

5. 玄武岩コアについての研究

坂口および共同研究者は玄武岩の熱水変質作用と変質作用に伴う全岩化学組成の変化について詳しい記載を行った。上にも述べたように、この海域では海嶺玄武岩が海底付近でいったん通常の酸化的な低温の変質を受けた後、急速な堆積物の発達により開放系の海水循環が制限され、閉鎖系の中温の熱水循環があることが推定されている。そのような変遷が、岩石中に記録されているかどうかが焦点となる。

玄武岩 (1301B コア) は枕状玄武岩、塊状玄武

岩、角礫岩からなる。さらに、岩相や斑晶の有無・種類などから、8つのユニットといくつかのサブユニットに分けることができ、変質ハロに縁取られた細脈が見られる。変質鉱物の組み合わせは、以下の3つのタイプに分けられる；タイプ1(灰色の母岩)：サポナイト、サポナイト+炭酸塩鉱物、サポナイト+硫化鉱物、タイプ2(黒色、緑色、赤褐色の変質ハロ)：サポナイト+鉄酸化・水酸化物 $\text{FeO}(\text{O}, \text{OH})_x$ 、サポナイト+セラドナイト、サポナイト+セラドナイト+ $\text{FeO}(\text{O}, \text{OH})_x$ 、タイプ3：(ガラスと角礫岩の基質)：サポナイト+沸石、サポナイト+硫化鉱物、サポナイト+沸石+炭酸塩鉱物。これらの変質鉱物組み合わせは深度によって変化しない。これらの変質鉱物組み合わせを他の掘削孔(たとえば、Hole 504B；Hole 896A)と比較すると主要な変質鉱物組み合わせに変化はなく、タイプ1と3は非酸化的、タイプ2は酸化的な条件下で変質作用を受けていることが示唆される。これは、上記のように堆積物の有無に起因する熱水循環のステージの違いを反映していると考えられる。変質作用の進行順序について気孔の充填順序から検討すると、タイプ2の黒色、緑色、赤褐色の変質ハロの気孔は、セラドナイト、 Fe_3+ -rich-セラドナイト、 $\text{FeO}(\text{O}, \text{OH})_x$ 、サポナイトの順序、タイプ1の灰色のホストロックはサポナイト、炭酸塩鉱物の順序によって充填されている。また、まれに、 $\text{Fe}(\text{O}, \text{OH})_x$ +サポナイトを切るようなサポナイト脈を観察できる。これらの気孔の充填順序などから推定される変質作用の進行順序は、セラドナイト→ $\text{Fe}(\text{O}, \text{OH})_x$ →サポナイト→炭酸塩鉱物・硫化鉱物・沸石に優勢な状態に変化していくと推定される。

変質温度に関して、セラドナイト+ノントロナイトの形成は、酸素同位体のデータから40–60°Cの温度で形成させることが報告されている(e.g. Seyfried *et al.*, 1978)。また、変質鉱物組み合わせは、他の掘削サイトと類似していることから、変質温度は、他の掘削サイトと温度は大きく変化しないことが予想され、変質作用は、100–150°C以下の温度で起こったものであることが推定される。

灰色の母岩の変質温度は、変質作用を受ける際の海洋地殻の温度と関連があると考えられる。

全岩化学組成によると、いくつかの元素は、変質ハロと灰色の母岩でその濃度が異なっている。灰色の母岩は、黒色、褐色の変質ハロに対し、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、Sc、Co、Ni、Zn、Srに富み、 Fe_2O_3 、 K_2O 、Rbに乏しい。変質条件や全岩化学組成の結果から、変質作用と流体循環の関連を推定すると、黒色、褐色の変質ハロは、海嶺拡大軸付近において、基盤岩上部に堆積物が存在しないことにより、低温で K_2O や Fe_2O_3 に富んだ開放系流体循環によって形成される。一方、灰色の母岩は、拡大軸外の堆積物に覆われた基盤岩中において、基盤岩のもつ温度と似た温度の閉鎖系流体に起因して形成され、玄武岩中を循環する際に、 K_2O や Fe_2O_3 を消費し、 MgO 、Ni、Coなどを取りこんだ流体によって変質作用を受けたと推定される。今後は、さらにガラス部分の変質や同航海の研究者によるSr、O同位体の分析、構造地質学的な特徴、ODP Leg 168の研究結果をまとめることにより、ファンデフーカ海嶺東翼における玄武岩の熱水変質作用の詳細が明らかになっていくと思われる。

浦辺は同じコア中の黄鉄鉱のイオウ同位体組成の検討を行った。船上観察では玄武岩コアの中深度部を占める塊状溶岩を除いて、上下の枕状溶岩中には鉱染状の黄鉄鉱しか認められなかった。坂口および陸上研究者のAltによると、これらの黄鉄鉱は変質帯の外縁部に濃集していて、酸化的変質により岩石中を移動して沈殿していると考えられるが、イオウ同位体は±0%に近く、もともとのマンツルの値を示していた。つまり、枕状溶岩中の黄鉄鉱は玄武岩にもともと含まれていた還元イオウ種と鉄から無機的に沈殿したものと考えて差し支えない。

肉眼で認められる黄鉄鉱は中深度部の塊状溶岩中の脈ないし気孔にのみ認められる。しかも、微生物起源と考えられる軽いイオウ同位体(<-15%)を持つものはこの層準に限られる。Altもイオウ種に関する検討を行い、黄鉄鉱は酸化的

な変質ハロの外側にのみ産し、そこでは岩石中のイオウ量が増加しているため、この増加分が微生物による硫酸還元があったことをしめすと考えている。

6. 海底下生命圏についての研究

DSDP および ODP によって掘削された世界各地の堆積物コアの微生物学・地球化学の解析結果から、以下の2点の事実が明らかになっている。1) 1 km までの深度の堆積物中にはある程度均一に 1 cm³ あたり 10⁵ 乗を超える微生物細胞が存在している、2) 間隙水中の硫酸やメタンなどの濃度プロファイルから、海底下で微生物代謝活性が見られるのは堆積物表層もしくは大陸沿岸の堆積物中に限られている。

一見この2つの知見は矛盾しているように見える。しかし、大洋底下では微生物代謝活性は埋没した細胞そのものを分解できないほど低く、アクリジンオレンジで染色可能な細胞が海底下に残存している、と捉えれば説明がつく。Exp. 301 の調査域であるファンデフカ海嶺東翼の熱水循環環境は、微生物代謝の電子受容体として重要な硫酸・鉄・マンガンなどの酸化物質が、堆積物の表層と下底の双方から堆積物へと供給される、理想的な海底下生命圏環境が広がっていると推測される。

Exp. 301 では、海底下生命科学用の試料として、大きく分けて3種類のものが得られた：1) 90°C 前後の熱水が循環する玄武岩コア (1301 B)、2) 約 16 mM の硫酸を含む 60°C 前後の熱水が影響する堆積物コア (1301 C,D)、3) ODP Site 1026 に設置された CORK の表層に付着した硫化物スケールである。これらについて、日本・ドイツ・米国・ノルウェーからの研究者によって構成される国際チームによって勢力的に研究が行われた。

まず、米国ノースカロライナ大学の Lever は、船上において掘削循環水に由来する外部からの微生物の混入(コンタミネーション)を PFT (Perfluorocarbon tracer) を用いて詳細に評価した。PFT を用いたコンタミネーションの評価法は ODP 時代にある程度確立されたものであるが、本航海で

は検出感度をより高めた手法を適用すると共に、試料の温度や回収後の経過時間などを考慮した堆積物コア側面から中心に向けての PFT 拡散モデルを構築した。さらに玄武岩質コアでは、表層を滅菌水・アルコール・火炎などで洗浄・滅菌することで岩石内部への外来微生物の侵入を防ぐ手法が PFT によって評価された (Lever *et al.*, 2006)。

1) 玄武岩コア：熱水循環が起こっている海底下深部玄武岩環境は、過去に玄武岩試料のフラクチャーから微生物様の構造が数多く確認されており、海洋や堆積物環境と距離的に隔離された水圏ハビタットとして注目されている。Exp. 301 では、ノルウェー・バーゲン大学の Steinsbu を中心として、90°C 前後の熱水が滞流する玄武岩コアを用いた研究が進められた。船上においてはフラクチャーや変性粘土鉱物層などの微生物の生息域となりえるような構造を含むいくつかのタイプの岩塊を対象に、嫌気グローブボックス内において粉碎したコア内部の試料や、表層を火炎殺菌した試料、キャットウォークにおいて即座に処理した岩石片を滅菌嫌気海水に加えたスラリー試料など、いくつかの微生物学的処理を施した試料が調製された。船上の約 80°C の培養温度下において鉱物片に付着した球菌の弱い増殖が確認できたため、そこに生命がいることは実際に確認できた。また、上に述べたように、玄武岩中の黄鉄鉱のイオウ同位体の結果から、海底下高温玄武岩環境における微生物代謝産物を示す興味深い結果が示されている。

また、Lever らは機能遺伝子や安定同位体の詳細な解析により、玄武岩中に炭素(メタン)・硫黄循環に関わる微生物活動が存在する証拠を発見することに成功した (Lever *et al.*, 2013)。一方で、バーゲン大学にて行われた粉碎試料を用いた分子生物学的手法(DNA)は困難を極め、海水または掘削循環水からの混入と思われる遺伝子シグナル以外に現場の好熱菌と思われるシグナルは得られなかった。またオレゴン州立大の Nielsen は 60°C で岩石と人工海水を用いて硫酸還元や鉄酸化・還元といった微生物代謝が起こるかどうかの実験を

50 週間行ったが、殺菌したものとしなかったものとの差は見られなかったとのことである。

2) 堆積物コア : Lever は、堆積物コア上部と下部における硫酸還元域とコア中心部のメタン生成域、さらにその境界域における微生物代謝フラックスと間隙水フラックスとの相関をシュミレーションし、表層および硫酸-メタン境界域における寄与が比較的大きいことを示した。ドイツのオールデンブルグ大学の Engelen らは、SYBER I とアスכולピン酸を用いた新たなプロトコールによって微生物細胞を染色し、堆積物の自家蛍光によるバックグラウンドとの対比をより明瞭にした顕微鏡視野における細胞数カウントを示した。また稲垣らは、ドイツ・マックスプランク海洋微生物学研究所との共同研究によって、定量 PCR によるアーキア・バクテリアの 16S rRNA 遺伝子の定量や現場温度条件下におけるフォスファターゼ活性、放射性同位体基質を用いた硫酸還元・嫌氣的メタン酸化活性などの鉛直プロファイルを構築し、シミュレーションによる結果と良い相関を示す興味深い結果を得た。さらに Engelen らは堆積物中から様々な微生物の定量的分離・培養に成功するとともに、放射性同位体元素を用いたインキュベーション実験により、地殻内流体が堆積物深部における微生物活性を促進していることを示した (Engelen *et al.*, 2008)。

稲垣・中川は、堆積物を対象に PCR 法によって増幅したアーキア・バクテリアの 16S rRNA 遺伝子のクローンライブラリーによる分子系統解析の結果を示した。アーキアの鉛直的群集構造は、DSAG (Deep-Sea Archaeal Group) を優占とする群集構造と MCG (Miscellaneous Crenarchaeota Group) を優占とする 2 タイプの群集構造が成層する興味深い結果を得た。群集構造の異なる成層的な海底下空間分布は、粘土層や砂層といった過去の地質イベントに関連する堆積学的な特性や、現在の現場環境における地球化学特性と密接な関わりがある可能性があり、今後の分野を横断した共同研究の成果が期待される。バクテリアの 16S rRNA 遺伝子の解析では、表層から 100 m までの DSAG



図3 デッキ上につり上げられたCORK。

アーキアが検出された 5 箇所の層準において、Chloroflexi, Actinobacteria, δ -Proteobacteria を優占種とする群集が存在することが明らかとなった。MCG が検出された層準や玄武岩水圏からの熱水の影響を受ける堆積物コア最深部からの遺伝子の検出には成功していない。

3) CORK 沈殿物 : Exp. 301 で回収された CORK は、1996 年 7 月に行われた ODP Leg 168 で掘削された Site 1026 Hole B に約 8 年間設置されたものである。ROV を用いた調査によって、1026B-CORK は完全に熱水を遮蔽できずに、玄武岩質水圏から供給される 60°C 前後の熱水がリークしていたことが分かっている。1026B-CORK を介して採取された孔内熱水の分子生物学的解析結果から、Ammonifex 属に近縁な細菌を優占とする多様な微生物が孔内の熱水環境に存在し、海底下の玄武岩から供給される熱水によってその生育が支えられていることが報告されている (Cowen *et al.*, 2003)。

中川・稲垣は、孔内熱水に検出された微生物の生理学的性状と現場環境中でのエネルギー源の解明を目的として、回収した CORK 1026B に付着していたスケールを培養法 (MPN 法)、クローン解析、炭素安定同位体解析、電子顕微鏡観察等の手法を合わせて解析した。スケールから検出された微生物は、同掘削孔の流体中に検出されていたものに部分的に共通していたものの、海嶺軸上の熱水孔環境で検出される微生物群集とは全く異なっていた。種々の培養条件を用いた定量的培養の

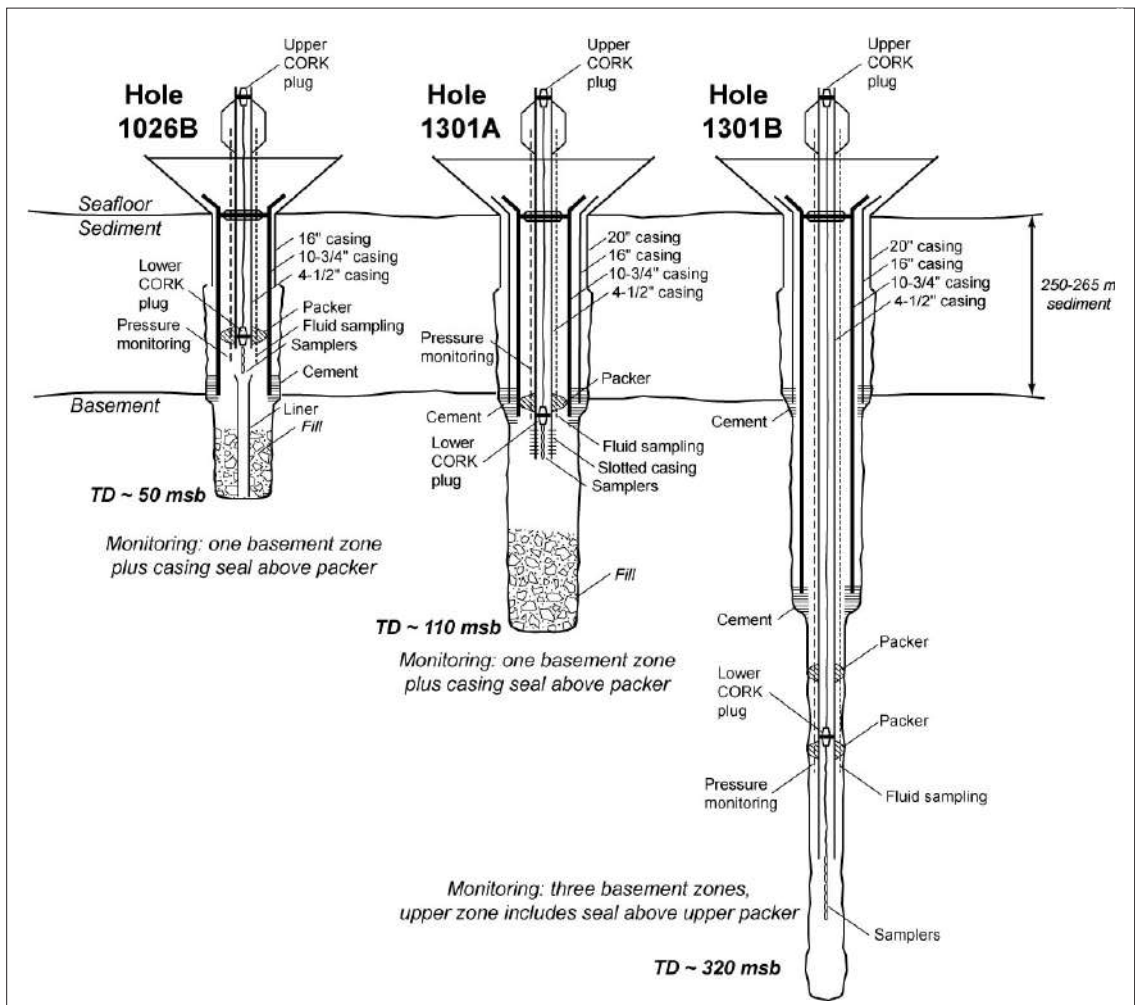


図4 IODP Expedition 301 航海で設置した3台のCORKの概念図(航海報告より).

結果、好熱性・水素資化性メタン生成菌のMPN値が最も高く、他にも多様かつ新規な好熱性硫酸還元菌や好熱性発酵細菌が優占して培養された。好熱性硫酸還元菌の優占は、環境DNA中の硫酸還元鍵酵素遺伝子(*dsr* 遺伝子)の定量解析や、試料のSEM-EDX解析からも支持された。加えて、全有機炭素および各種脂肪酸の安定同位比質量解析の結果、スケール中の微生物群集は光合成由来の有機物を主な炭素源としていることが示唆された。本研究の成果は、海嶺翼部における地殻内微生物の活動や生態、海嶺熱水循環に依存した微生物

物の伝播を考える上で極めて重要な知見を与えるものである(Nakagawa *et al.*, 2006)。また、Steinsbuらは同試料から分離した新種の高度好熱性アーキアの生理学的・分類学的特徴を記載している(Steinsbu *et al.*, 2010)。

7. 地球物理学的研究について

本航海の最大の目的は、複数の掘削孔を用いて3次元かつ長期的な水理試験を行える準備をすることであった。そのためには、掘削孔にCORKと呼ばれる“栓”(図3、図4)をして、制御された

条件で注水試験などが行われる必要がある。ここには ODP Leg. 168 の際に設置された CORK3 台が存在するが、その内 2 台は不具合があり、本航海で交換するとともに、あわせて 4 台の CORK を設置するという予定であった。限られた日程の中で、それだけの作業をこなすことは大きな挑戦であったが、結果として 1 台を回収し、3 台を設置できたことは大きな収穫であった。カリフォルニア大学サンタクルス校の Fisher は、その後の潜水船による航海も含めて、CORK を用いたさまざまな結果を発表しているが、今回のまとめには取りあげない。ただ、2005 年 9 月にアルビン号による潜水調査では、CORK のヘッドに設置されていた圧力データロガー、オスモサンプラーとよばれる採水器などの機器が回収され、本航海で設置した 2 つの CORK はいずれもシールが完全でないことが判明した。詳しく述べると、Exp. 301 航海中に設置した 1301A の CORK はケーシングパイプと口径が合わず、海底面上のシールが取り付けられなかったことで、ケーシングパイプの下端をセメントすることで、海水と熱水を遮断しようとした。しかし、これがうまくいかなかったということらしい。もしそれが完全であれば、この掘削孔からは中温熱水が出て来ていなければならないのに、海水が孔内に流入していたのである。流れ込んでいる海水の量は不明である。一方、1026B に設置されている CORK は大丈夫であったが、1027 サイトの CORK は本航海で交換できなかったので掘削孔間の水理試験を行うためには、次の IODP 航海で交換する必要がある。1031B は 1031A から 30 m しか離れていないのと、深度の異なる帯水層の水理特性を調べるための仕切り（パッカー）が入っているが、その上下の玄武岩層の透水率が高いため、パッカーの上下で水が漏れていて、冷たい海水が入り込んでいることも分かった。つまり、ほとんどのシールが働いていないという結果が得られている。ただし予定通り行かなかったことばかりではなく、興味ある事実も分かってきた。2.4 km 離れた 1027 サイトの圧力は 1031 サイトの掘削時に注入された海水（掘削のための循環



図5 IODP Expedition 301 航海のTシャツのデザイン。挿入に失敗して折れ曲がったドリルパイプや、吊り上げ作業などの場面が示されている。

水) に呼応して上昇していることが分かった。これは将来の掘削孔間の水理試験に期待を持たせる結果といえる。

辻はロギング・グループの一員として航海に参加した。標準的な孔内計測（ロギング）ツールである Triple Combo 以外に、新しいツールである UBI および FMS/DSI、および垂直反射地震探査（VSP）のデータも取得したが、Triple combo 以外は深度方向に十分なデータが取れなかったり、地震波の異方性を調べるにはデータの解像度が不足していたりして、解析に使えなかった。そこで、コアサンプルの測定にもとづいて、割れ目と弾性特性との関係を調べた。封圧下で地震波速度と封圧との関係を調べたところ、地震波速度（ V_p , V_s ）は封圧に対し指数関数的な関係をもつことが分かった。また深度方向に大きな傾向は見られなかった。Kuster-Toksoz モデルを用いた解析を、地震波速度と封圧の関係に適用し、それぞれの岩相に対して気孔（間隙）のアスペクト比分布を推定した。その結果、それぞれの岩相の間隙形状の

特徴を調べることができた (Tsuji and Iturrino, 2008). さらに, このアスペクト比の情報を使うことで, 理論的に海洋性玄武岩の地震波速度と間隙率の関係を構築することができた. また間隙形状に加えて鉱物分布を調べるために, EPMA で得られる元素マップに対してニューラルネットワーク解析を適用し, 鉱物分布を推定した (Tsuji *et al.* 2010).

テキサス A&M 大の Sager は古緯度を推定するため, 玄武岩の古地磁気を測定した. ここの地殻はガウス期の初期に生成しているのので, 正帯磁していると予想されたが, そうでないものもあり, 非常に複雑であることが分かった. 極性は最深部で逆帯磁となっている可能性がある. 傾斜角も下部で大きくばらつくが, これは下部で2回の熱水変質が起こり, その都度, 磁赤鉄鉱 Maghemite 化が起こったせいではないかと考えられる.

8. おわりに

本航海は CORK の回収と再設置が大きな目的であった. この装置は IODP 計画でも設置が流向になっているが, CORK の組み立てや設置はテクニシャンが2晩徹夜をして行っており, 彼らの献身と経験無しには実現ができないものであることがよく分かった. 残念なことに, 今回再設置の際に CORK の下側に取り付けたパイプが掘削孔の中に入っていらず, 複雑に折れ曲がって孔を塞ぐ事件が起こった (図3). テクニシャンが治具を製作し, パイプを引っかけて取り除き事なきを得たが, どんどん複雑になっていく改良型 CORK の難しさを示したできごとであった. なお, ここに引用できなかった成果については以下のサイトにまとめられている. <http://publications.iodp.org/proceedings/301/301bib.htm>

また, CORK のさまざまなトラブルのために掘削にかかる時間が大幅に削減され, 乗船研究者にとって十分なコアが供給できなかった. お詫びすると共に乗船研究者の皆様, 船長以下乗組員の皆様, ドリリングチームの皆様にご感謝したい.

参考文献

- [1] Cowen, J. P., Giovannoni, S. J., Kenig, F., Johnson, H. P., Butterfield, D., Rappe, M. S., Hutnak, M. & Lam, P. (2003) Fluids from aging ocean crust that support microbial life. *Science*, 299, 120-123.
- [2] Davis, E. E., Chapman, D. S., Wang, K., Villinger, H., Fisher, A. T., Robinson, S. W., Grigel, J., Pribnow, D., Stein, J., and Becker, K. (1999) Regional heat-flow variations across the sedimented Juan de Fuca Ridge eastern flank : constraints on lithospheric cooling and lateral hydrothermal heat transport. *J. Geophys. Res.*, 104:17675-17688.
- [3] Engelen, B., Ziegelmüller, K., Wolf, L., Köpke, B., Gittel, A., Cypionka, H., Treude, T., Nakagawa, S., Inagaki, F., Lever, M. A., Steinsbu, B. O., (2008) Fluids from the oceanic crust support microbial activities within the deep biosphere. *Geomicrobiol J*, 25:56-66.
- [4] Fisher, A., Urabe, T., Klaus, A., and the Expedition 301 Scientists (2005) Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Volume 301 Expedition Reports. Juan de Fuca Hydrology, Integrated Ocean Drilling Program Management Inc., Washington DC., USA. (CD-ROM).
- [5] Lever, M. A., Alperin, M., Engelen, B., Inagaki, F., Nakagawa, S., Steinsbu, B. O., Teske, A., (2006) IODP Exp. 301 Shipboard Scientific Party. Trends in basalt and sediment core contamination during IODP Expedition 301. *Geomicrobiol. J.* 23:517-530.
- [6] Lever, M. A., Rouxel, O., Alt, J. C., Shimizu, N., Ono, S., Coggon, R. M., Shanks, W. C., Lapham, L., Elvert, M., Prieto-Mollar, X., Hinrichs, K. U., Inagaki, F., Teske, A., (2013) Evidence for microbial carbon and sulfur cycling in deeply buried ridge flank basalt. *Science*, 339, 1305-1308.
- [7] Mottl, M. J., and Wheat, C. G. (1994) Hydrothermal circulation through mid-ocean ridge flanks : fluxes of heat and magnesium. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58:2225-2238.
- [8] Steinsbu, B. O., Thorseth, I. H., Nakagawa, S., Inagaki, F., Lever, M. A., Engelen, B., Ovreås, L., Pedersen, R. B., (2010) *Archaeoglobus sulfaticallidus* sp. nov., a novel thermophilic and facultatively lithoautotrophic sulfate-reducer isolated from black rust exposed to hot ridge flank crustal fluids, *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, 60:2745-2752.
- [9] Tsuji, T. and Iturrino, G. (2008) , Velocity-porosity relationships of oceanic basalt from eastern flank of the Juan de Fuca ridge: The effect of crack closure on seismic velocity, *Exploration Geophysics*, 39, 41-51.
- [10] Tsuji, T., Yamaguchi, H., Ishii, T., and Matsuoka, T. (2010), Mineral Classification from Quantitative X-ray Maps using Neural Network : Application to Volcanic Rocks, *Island Arc*, 19, 105-119.
- [11] Wheat, C.G., and Mottl, M., (2000) Composition of pore and spring waters from Baby Bare : global implications of geochemical fluxes from a ridge flank hydrothermal system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64:629-642.

