

地球 発見 CHIKYU HAKKEN

EARTH DISCOVERY

地下生物圏の謎に迫る

SPECIAL TOPIC 1 :

豊かな海底下生物圏が広がる
沖縄トラフ熱水域を掘る

SPECIAL TOPIC 2 :

海底下深部への生命探査の旅は
まだ始まったばかり



CONTENTS

地下生物圏の謎に迫る

SPECIAL TOPIC 1

3 豊かな海底生物圏が広がる
沖縄トラフ熱水域を掘る

SPECIAL TOPIC 2

7 海底深部への生命探査の旅は
まだ始まったばかり

GRAPHIC GUIDE

9 世界に誇る地殻内微生物研究の拠点
高知コア研究所

DISCOVER THE EARTH

11 人類史上初のモホ面貫通をめざす
マントル掘削への取り組み

FACE

12 船上で研究航海を統括する二人の最高責任者
「ちきゅう」船長と OIM

CDEX DECK

13 新しい地球科学を開拓する「ちきゅう」の活躍
もっと知ってほしい！

FOR THE FUTURE

14 科学掘削の成果を
社会に活かしていくことが大切

CLOSE UP

「ちきゅう」船上からのつづやき

地下生物圏の謎に迫る

深海掘削によって海底下に存在する微生物圏を探る

1990年代以降、地球内部に巨大な地下生物圏が広がっていることが明らかにされてきた。IODPでは、深海掘削によってこうした地下生物圏の探索を行い、地球内部環境と生命現象の関係を解明することを、主要な科学目標のひとつとして掲げている。日本が誇る地球深部探査船「ちきゅう」によって、まだ私たちが知らない地下生物圏の存在やその活動、分布などを解明することが期待されている。



豊かな海底下生物圏が広がる 沖縄トラフ熱水域を掘る

海底下生物圏の解明は、統合国際深海掘削計画 (IODP) 第一期の重要な科学目標に掲げられている。今回、満を持して、「アマゾン川」に例えられるほど生命豊かな沖縄トラフ・伊平屋北の海底下で、海底下に流れる川とそこに広がる地下生物圏の解明をめざした掘削が行われる。

注目される熱水噴出孔の海底下生命圏

1977年、アメリカ西岸のガラパゴスリフトで、海底の熱水噴出孔とその周辺に棲息する奇妙な生物たちが発見された。それは生物学上も地球化学上でも、今までの常識を覆す大発見であった。

ガラパゴス熱水生物群の発見に伴い、このような熱水生物群は、プレートが生まれる中央海嶺に多く見られるだけでなく、日本周辺のようにプレートが沈み込む地域の火山にも存在するだろうと考えられてきた。最初の発見から約10年後、日本で最初に発見された熱水生物群が沖縄トラフである。その発見をきっかけに、日本でも本格的な熱水域の研究が始まった。

1990年代以降、海底下には微生物による地球最大の生物圏が存在することが明らかになりつつある。ただし、海底下に棲息する微生物の大部分は、表層で光合成により生産された有機物などを食べて生きる生物の死骸が海底に落ちてきたものを食べてかろうじて生きており、3000～1万年の間に1回分裂する程度と、非常に活性が低い。生と死の境界の辺りでかろうじて生きている存在である。ところが、熱水噴出孔の海底下では光合成に依存せず、分裂速度が高い微生物の世界があるという仮説を、1993年にアメリカ・ワシントン大学のジョディ・デミングとジョン・バロスが発表した。それを受けて熱水噴出孔の海底下に広がる、通常の生物にとっては生息することが極めて難しい、「極限環境」微生物の世界に関心が集まるようになっていた。



取材協力
高井 研 博士
海洋研究開発機構
海洋・極限環境生物圏領域
深海・地殻内生物圏研究プログラム

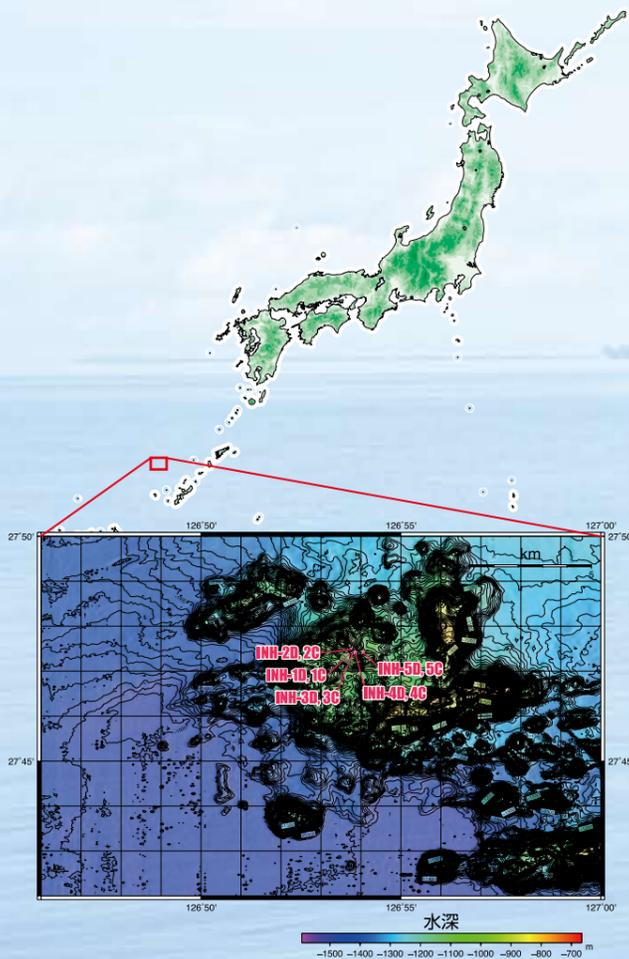


図1 沖縄トラフの位置
日本で初めて海底の熱水噴出域が発見されたのが、沖縄諸島の北西に位置する沖縄トラフだ。沖縄諸島は、過去の日本列島と同じくプレートの沈み込み帯で島弧を形成しており、地質学的には日本列島をミニチュアにして現代に持ってきたような特徴を持つ。今回の掘削ポイントは伊平屋北フィールドである。

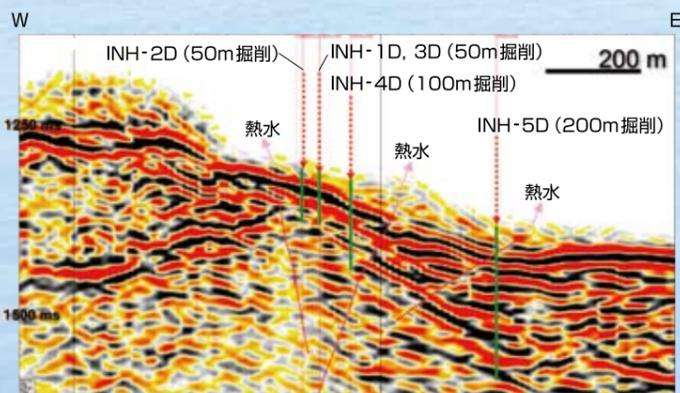


図2 掘削予定地点の海底下構造
地震波探査で明らかになった、伊平屋北フィールドの海底下の構造。これをもとに、もっとも研究目的にかなった掘削ポイントが決定された。

	イオウの大河	水素の大河	鉄の大河	メタンの大河
	 TOTOカルデラフィールド	 かいいいフィールド	 Vai Lili フィールド	 伊平屋北フィールド
熱水循環の原動力	マグマ活動	テクトニクス	玄武岩地殻の冷却	マグマ活動もしくはテクトニクス
流域の決定的構成因子	マグマ	超マフィック岩	玄武岩	陸源堆積物
温度	高温熱水	中温～高温熱水	低温熱水	中温～高温熱水
時間スケール	数日～数百年?	数千年～百万年?	百万年～数億年?	数百年～数千年?
特徴的な地球化学反応	マグマの脱ガスと高温化学平衡・相分離	蛇紋岩化反応とフィッシャートロプッシュ型反応	玄武岩の風化	有機物の熱・微生物による続成反応
大河中の優占するエネルギー源 (候補)	還元無機硫黄化合物	水素	2価鉄 (Fe(II))	有機物、メタン、アンモニア
大河が支える一次生産者 (候補)	硫黄酸化菌 (酸素、硝酸)、水素酸化硫黄還元菌、硫黄不均化菌、一酸化炭素酸化菌	水素酸化菌 (酸素、硝酸、硫酸、3価鉄、硫黄)、メタン菌、ギ酸酸化菌、嫌氣的メタン酸化菌	鉄酸化菌 (酸素、硝酸)、硫黄酸化菌 (酸素、硝酸)、アンモニア酸化菌 (酸素)	嫌氣的&好氣的メタン酸化菌、嫌氣的&好氣的アンモニア酸化菌、メタン菌、等々

図3 熱水域を4種類の「大河」に分類
熱水はその熱源や母岩との化学反応等の条件によって、化学的組成が大きく異なる。沖縄トラフはこの表の「メタンの大河」にあたる。

そのような経緯があり、IODPでは、海底下の微生物の真の姿の解明も主要な科学目標の一つとして設定された。またIODPに主導的な立場で参加する日本からも、その目標に合致した海底下微生物研究のプロポーザル(提案書)を出す機運が高まってきたのである。

最初のプロポーザル提出と立ちふさがる課題

2001年、そのプロポーザルの作成にあたったのが、当時のJAMSTEC地殻内微生物研究グループのメンバーたちだった。今回、微生物研究の立場から、掘削航海の共同首席研究者を務める海洋・極限環境生物圏領域 深海・地殻内生物圏研究プログラムの高井研博士は、そのころ、熱水の化学組成の違いによって棲息する生物や微生物の種類が変わるということ、伊豆小笠原諸島の海底に存在する水曜海山と琉球列島の北西の深い海域である沖縄トラフを比較しながら研究していた。水曜海山の熱水では硫化水素を餌とする細菌がシンカイヒバリガイと共生しているが、沖縄トラフのシンカイヒバリガイに共生しているのはメタンを餌とする細菌である。水曜海山の熱水には硫化水素が、沖縄トラフの熱水にはメタンが多いためだ。その熱水組成の差はどこから来るのかを、地球化学の研究者とともに探求していった。その結果、沖縄トラフには水を通しにくい堆積物の層が存在するため、その堆積物層の直上を流れる熱水は、地下に流れず水平方向に広がり、その規模を拡大する。熱水が堆積物層の上を時間をかけて流れ、

堆積物の成分を吸収することで、メタンの多い熱水となり、非常に豊かな微生物の世界が海底にも海底下にも広がっていることが分かってきた。

「当時、一緒に研究を進めていた地球化学の研究者と相談し、『海底下の活性の高い微生物を掘るのなら、微生物のすみかが確保されていてエネルギー源が多い沖縄トラフがいいだろう』という話になりました。われわれが研究ターゲットにしていた伊平屋北がいいのではないかということ、伊平屋北の海底下の生物圏を掘削するという掘削プロポーザルを書いたのです」(高井博士)

IODPのプロポーザルは、書けば簡単に通るというものではない。プロポーザルを提案する研究者は、世界中の研究者から集まってくる数多くのプロポーザルの中で、競争に勝ち抜かなければならない。IODPでは、提案されたプロポーザルに対して詳細な検討を行い、提案者である研究者へ問題点を指摘し改訂を求める。そのような過程を経て、プロポーザルを実施可能な状態まで育て上げるといふしくみが採用されている。当初、提出したプロポーザルに対しては非常に厳しい意見が多く、数多くの批判を受けるなか、「海底下の生命圏に対するチャレンジは今始まったばかりだから、ポジティブなところを見つけて育てていかなければならない。このプロポーザルは熱水の下にいる活性の高い微生物を研究しようという面白いテーマであるから、ぜひIODPの基準に合うように努力すべき」という一つの意見があった。それが何よりの救いとなって次の段階に進むことができたのだと高井博士は言う。

	アマゾン川	沖縄熱水
流域面積	世界最大	世界最大?
支流	たいへん多い	たいへん多い
流域の特徴	熱帯雨林 ジャングル 多様な生物	有機物に富んだ堆積物 多様な海底下微生物 (海底下の森)
流れ	極めてゆっくり	極めてゆっくり

図4 伊平屋北熱水系は「アマゾン川」

地上を流れる大河の中で、もっとも流域面積が広く豊かな生物圏を育むアマゾン川と、今回掘削する伊平屋北熱水系は、表に示したように類似点が非常に多い。

海底下の構造を解析するという 難関をクリア

次に問題になったのが事前調査だった。そのうちの重要な課題の一つが海底下地質の構造解析である。高井博士は「そのとき指摘されたのが、海底下の熱水の流れを見極めないといけないということです。海底の研究の蓄積から、この下にはどのような微生物がいるかについてはだいたい予想できましたし自信もありましたが、そこにどのように熱水の流れをはめ込むかが問題でした。IODPでは、『なぜその場所を、これだけの深さまで掘らなければいけないのか』という理由づけをきちんとしなければなりません。そのためには地震波探査をし、海底下地質の構造を解析して、熱水の流れているところに活性の高い微生物がいるからここを掘るのだというストーリーを作る必要がありました」と話した。

このプロポーザルの関係者は微生物の研究者と地球化学の研究者が中心だったため、皆、地震波探査による海底下地質構造の解析などしたことがなかった。また当時、南海掘削が別のプロポーザルとして提案され、審査中だったため、そちらに地震波探査による海底下地質構造解析のできる研究者や機材、船などが総動員されて、自分たちの代わりに沖縄トラフ海底下の地質構造解析をやってくれる人も見つからないという状況だった。仕方なく個人的なつてを頼りに東京大学海洋研究所から機材を借りて海洋研究開発機構(JAMSTEC)の海洋調査船「かいよう」に積み込み、マルチチャンネルという地震波探査を実施するところまでこぎつけた。

次にその探査データを解釈し、海底下の地質構造を決めなければならないのだが、そのやり方もよく分からない。「プロポーザルの締め切りが近づいているし、『これってどういうふう解釈すればいいんですか?』と日本中のいろいろな人に聞きました。サイトサーベイパネルにそのデータを出したところ、『これが足りない』とか『この解釈が間違っている』とか、またぼろぼろに批評され、本当に困りました。そのとき救いの手を差し伸べてくれたのが、

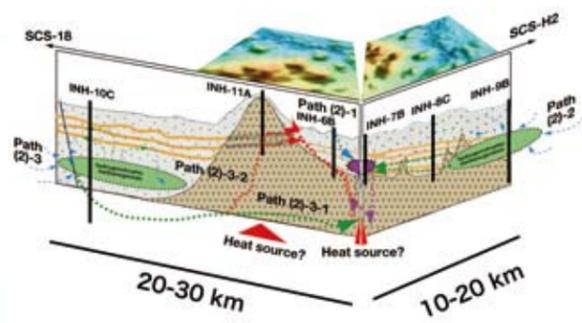


図5 伊平屋北熱水の海底下の流域

伊平屋北熱水の海底下では、海山の下にある熱源(マグマ)が水の循環を作り出す。海山を出入り口とし、水を通にくい堆積物の層の上を水平方向に流れて熱水域の規模を拡大する。全体としては図のような水の流れが起こっていると想定される。

JAMSTEC から民間の石油会社に帰られた研究者の方でした。本当に好意で、必要な条件を満たせるよう手助けしてくれました。やる気さえあれば必ず誰かが救ってくれると思いました」

そのおかげで、沖縄トラフの海底下の地質構造を決め、熱水の通り道についての根拠ができ、掘削すべき場所も深さも決まった。IODPの基準を満たしつつ、海底の観察から分かることを補足する形で海底下の地質構造の解釈をつけることができたのである。2001年にスタートし、プロポーザルが採択されたのが2007年のことだった。苦勞のかいあって、IODP科学計画委員会によるランキングでこのプロポーザルは2位となっている。

「とは言っても、上位だからといって必ず掘削されるわけではないですから、そこから実現までが、また長かったです」と高井博士。科学的に掘削研究の意義が認められても、調査海域や掘削を実際に行う運航船の状況など様々な条件が整って、ようやく掘削が実現するのである。

沖縄トラフは「海底下のアマゾン川」

海底の下にはもう一つ、熱水や低温の湧水といった水をたたえる領域がある。その水は海底一面に広がっているのではなく、流れやすいところを流れる海底下の川のようなものである。水はさまざまな物質を運び、地下に存在するであろうマグマによってエネルギーも供給される。そこには活性の高い微生物の世界があるはずだ。

今回の掘削地点である伊平屋北を含む沖縄トラフ熱水域の特徴は、火山から噴出されたスポンジのように水を通しやすい軽石の層と、主に揚子江から流れてくる有機物を多く含む堆積物の層が交互に堆積し、ちょうど洋菓子のミルフィーユのように何重にもなった地層を作っているところだ。

掘削地点である沖縄トラフ海域の火山のマグマは、気体となって発泡する成分が多く、岩石となる時に軽石状になるため水を通しやすい。一方、この海域では、堆積物は粘土のように水を通さないで、海底下を流れる水

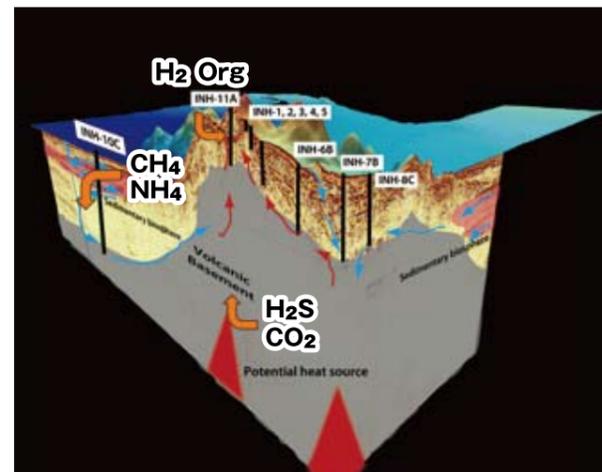


図6 海底下構造と水の流れ

図5で示された水の流れと掘削ポイントに地震波探査による地下構造を加え、やや角度を変えて図式化したもの。赤い矢印は熱源によって温められた熱水の上昇を、水色の矢印は、それによって引き起こされた水の流れを示す。オレンジ色の矢印は、そこから水に加味される化学成分など。玄武岩の母岩からは硫化水素が、軽石と堆積物が層を成している部分では多数の微生物が作り出すメタンや窒素化合物が水に溶け出し、と考えられる。また今回掘削予定の「熱水河口域」にあたる部分では熱水噴出孔直下の微生物が採取できると期待されている。

は、有機物を豊富に含む堆積物の上をひたひたと横方向に流れ、断層があれば下に移動し、再び堆積物の上を横方向に広がっていくという複雑な流れ方をする。普通、海底下の熱水域では鉛直方向に水が循環し、水平方向の距離は数kmといわれているが、掘削地点の熱水は、この堆積物のおかげで横方向にも広がって規模を拡大する。ちょうど多くの支流を持ち流域面積が広いアマゾン川のようなものである。

熱水の成分は、その場所の地質学的な条件(熱水が通る母岩の性質)によって変わる。中央海嶺などに見られる玄武岩由来の熱水には硫化水素が多い。一方、沖縄トラフの熱水は、有機物を豊富に含む堆積物の層があるために、メタンなど有機物を多く含むのが特徴だ。沖縄トラフの「海底下の大河」流域には堆積物の層に育まれる豊かな微生物圏があり、その中を熱水が通る間にメタンをたっぷり含むことになる。これも熱帯雨林の土壌を流れ、有機物を豊富に含むアマゾン川に似ていると高井博士は指摘する。

今回の掘削地点とその後の活用計画

当初のプロポーザルでは沖縄トラフで11カ所の掘削を行い、この「海底下のアマゾン川」の全体像を解明する計画だった。「1~5番の掘削ポイントは、熱源に温められ、海山の中を通過して最後に熱水として噴き出すところです。実は熱水が北側からも来ている可能性もあるので、6~9番はそれを確かめるための掘削。10番は水が水平方向に広がり『海底下の熱帯雨林』といわれている場所で、11番が最後に見つかった熱水の通り道です。この熱水のすべてを明らかにしたいというのが、プロポーザル段階での話でした。でも今回の航海は時間が限られているため、ターゲットは5番まで。熱水が噴き出す最後の部分、アマゾン川で言えば、河口域の三角州を掘る掘削になると思います」

そのため、今回の掘削の主目的は、まさに熱水噴出孔の直下にいる微生物となる。そこに活性の高い微生物たちの世界があるという仮説は、熱水を採取して分かった間接的

な証拠はあるものの、いまだ直接証明されていない。今回の掘削はその直接証明になるはずだ。「それには沖縄トラフは最適です。インド洋の場合は、玄武岩の割れ目に沿って微生物が棲息するので、そこを掘り抜かないと外れます。沖縄トラフの場合、軽石の中にたくさん棲息していますから遭遇する確率が高いのです。豊富なメタンが作られている場合は今回の掘削ポイントではないと考えられますが、『これだけの量のメタンは、熱水噴出孔直下だけでは到底できません』と示して、次のステップにつなげることはできません」と高井博士は期待している。

さらには掘削した孔には、ケーシングという、掘削孔が崩れないような内枠となるパイプを設置し、今後10年は使えるような「人工熱水噴出孔」にする計画である。それを一種の現場培養器として、様々な微生物を培養することに使えば、海底下の微生物の研究がさらに進むと期待されている。

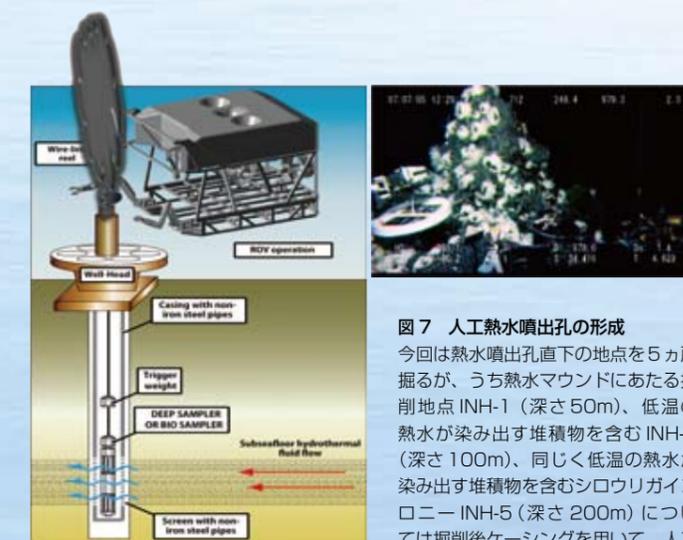


図7 人工熱水噴出孔の形成

今回は熱水噴出孔直下の地点を5カ所掘るが、うち熱水マウンドにあたる掘削地点 INH-1 (深さ 50m)、低温の熱水が染み出す堆積物を含む INH-4 (深さ 100m)、同じく低温の熱水が染み出す堆積物を含むシロウリガイコロニー INH-5 (深さ 200m) については掘削後ケーシングを用いて、人工熱水孔として維持する予定。これを現場培養器として活用し、海底下の微生物研究を継続的に行う。

海底下深部への生命探査の旅はまだ始まったばかり

長い間、海底下深部は生物が存在しない世界と考えられてきた。それを覆す学説が発表されたのは1994年のことだ。ODP（国際深海掘削計画）で掘削された海底下800mまでの堆積物コア試料から、膨大な微生物細胞が存在することが明らかになった。しかし、海底下深部のどのくらいの深さまで生物がいるのか、それらはどんな生物で、どのように生きているのか、多くの疑問が残されたままだ。今、その答えを求めて、IODPによる新たなチャレンジが始まろうとしている。

海底下に広がるアーキアワールドを発見

現在、米国の掘削船「ジョイデス・レゾリューション」によって掘削された海底下1,626mまでの堆積物コア試料から、微生物の存在が確認されている。そして、地球全体の海底下生物圏には 3.5×10^{30} 個体数に相当する微生物（角砂糖ほどのスペースに100万個体以上）が存在し、これは個体数にして陸域の動植物を含めた、地球の全生命体のおよそ10分の1に相当すると試算されている。

2008年には、高知コア研究所地下生命圏研究グループの稲垣史生博士、諸野祐樹博士が、ドイツ・ブレーメン大学と共同で、2006年に「ちきゅう」によって青森県下北半島東方沖で掘削された試料をはじめ、IODPなどで掘削された世界各地の海底堆積物試料を分析し、それまで予想されていた量をはるかに上回るアーキア（古細菌）と呼ば

れる微生物が海底下に存在していることを明らかにした。一般に微生物は、そのDNAの進化系統学的特性や細胞膜の構造などから、バクテリア（真性細菌）とアーキア（古細菌）に分類される（図1を参照）。稲垣博士らは、両者の細胞膜の構造の違いに着目し、その違いを検出することによって、バクテリアとアーキアの量比を算出した。その結果、約87%がアーキアであり、海底堆積物内においてアーキアが優占的に存在していることが明らかになった。なぜ海底下にアーキアワールドが広がっているのかについては、次のように考察された。太陽光が届かない閉鎖的な海底下の環境は、栄養源や酸化物質が乏しく細胞内のエネルギー貯蓄の拡散をできるだけ抑えた環境適応が要求される。アーキアの細胞膜脂質の構造は、バクテリアとは異なり、細胞膜を通すような物質のやり取りがおりにくい。これは海底下環境に適した進化形態であり、一方でさまざまな物質が通りやすいバクテリアの細胞膜脂質の構造は、常に太陽光を享受できる表層世界に適していると考えられる。海底下に広がるアーキアワールドは、地球の生命進化の中で微生物がどのように生息地を拡大してきたかを物語っている。

しかし、「これまでの研究で満足しているわけではありません。本当に海底下にどのような微生物が棲息しているのかを明らかにしたとは考えていません」と稲垣博士は言う。「海底下に棲息する微生物については、細胞膜の構造の違いからは約87%がアーキアという結果が出ましたが、DNA分析による遺伝子解析結果では、堆積物試料内の微生物全体の中で、アーキアは平均で40～50%でした。分析の方法による違いが生じていたのです。もしかしたら、他に私たちがとらえきれない未知の、例えばウイルスなどのような微生物系統群がいるのかもしれない、今はそう考えています。私たちが知らない未知の微生物を、既存の手法で生命として検出できていないのではないか、



取材協力
稲垣 史生 博士
高知コア研究所
地下生命圏研究グループ

それくらい疑い深く見ていく必要があると思っています。海底下深部で私たちが理解している範囲は、ほんの一握りでしかありません。実はまだ何も分かっていないのだと認識することが、新たなブレイクスルーを生むポイントではないかと、私は思っています」と稲垣博士は話す。

未知の生命圏への挑戦

海底下の生命圏は、地質学的な時間スケールのゆっくりとした代謝速度で活動しながら、長期的に地球内部の物質循環に影響を及ぼしていると考えられている。だが、膨大な数のさまざまな微生物が、地球内部の物質循環の中でどのような役割を担っているのかは、まだよく分かっていない。これらを明らかにしていくことも今後の重要な課題だ。

例えば、これまで掘削による海底下の試料を使った海底下生物圏の研究は、ほとんどが大陸沿岸の有機物が豊富な堆積物で行われてきた。そこで見られる生物は、海表で生産された有機物に依存していることが分かっている。では、そのような有機物がほとんどない海域ではどのようなことがおきているのだろうか。2010年10月から12月にかけて、南太平洋で「ジョイデス・レゾリューション」によるIODP第329次研究航海が実施される。掘削が行われる海域は、有機物の生産が地球上で極めて低いとされる場所だ。こうした海域の海底堆積物のなかにも、一般的な大陸沿岸の海底堆積物中のおよそ1,000分の1から100万分の1レベルで微生物細胞は存在している。だが、「そこには大陸沿岸の有機物に依存した生物圏とは別の世界が広がっているだろう」と稲垣博士は考えている。「大陸沿岸堆積物の場合、海底表層で酸素の消費が起きるので、結果として深部の堆積物は無酸素となり還元的な環境になります。しかし南太平洋還流の場合、海底表層で酸素の消費がほとんど起きないため、深部の堆積物であっても酸素が豊富に存在し、非常に酸化的な地下生物圏が形成されます。そこには玄武岩が多く存在し、鉄や硫黄などいろいろな元素が豊富に含まれています。その玄武岩のなかの元素と、海水に含まれる酸素によって自分たちの栄養分を作り出すような微生物が作り出す岩石内の生物圏、光合成によって生産される有機物に依存しない、まだ知られていない生物圏が、そこにあるかもしれません」と語る。

光合成に依存せず、さらに異なる生物圏の存在が期待されるのが、2010年9月に沖縄トラフで「ちきゅう」によって行われるIODP第331次研究航海だ。ここでは熱水活動によってマグマから供給される無機物質を栄養源として有機物を作り出す微生物の生態系が明らかにされる可能性がある。

「さらに、今後は有機物に依存しない生物圏を探るために、岩石のなかに直接アクセスする方法も重要になるでしょう」と稲垣博士。「岩石中を掘削して、そこに生命シグナ

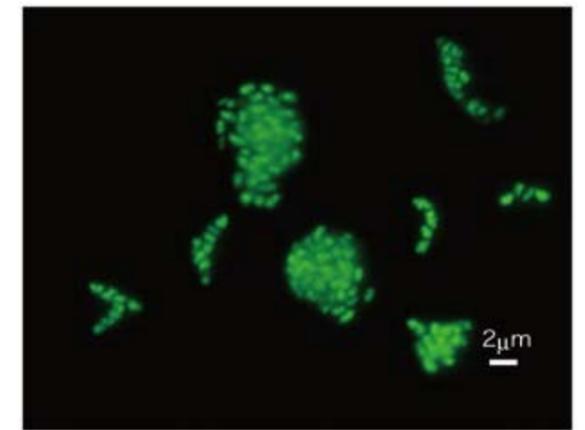


図2 「ちきゅう」によって青森県下北半島東方沖約80km、海底下約350mの掘削コア試料中で確認された活動的な微生物凝集構造の蛍光顕微鏡写真。

ルをとらえる観測機器を入れたり、掘削孔の海水などが入れ換わった後で採水する装置、そうした掘削後の掘削孔利用のための機器開発も、これからは非常に重要な分野となるでしょう」と話す。

DNAを用いたこれまでの研究で、海底下生物圏に棲息する微生物の多くが、未知の微生物であることが知られている。これらを何千年スケールではなく、もっと短時間で増殖させる培養法の確立は大きな課題である。この課題を乗り越える方策として期待されているのが、シングル・セル・バイオロジーという分野だ。単一細胞からDNAを増幅し、培養しなくてもほぼすべての遺伝子情報を読み取ることができる時代も近づいているという。

海底下生物圏を明らかにするためには、まだまだ多くの課題が残されている。海底下深部への生命探査の旅は、まだ始まったばかりだ。そして、謎に包まれた生物圏の解明には、人類未踏の海底下の世界にメスを入れる能力を持ち、研究に欠かせない貴重な試料を確実に処理・保存するための設備を備えた「ちきゅう」の果たす役割も大きい。

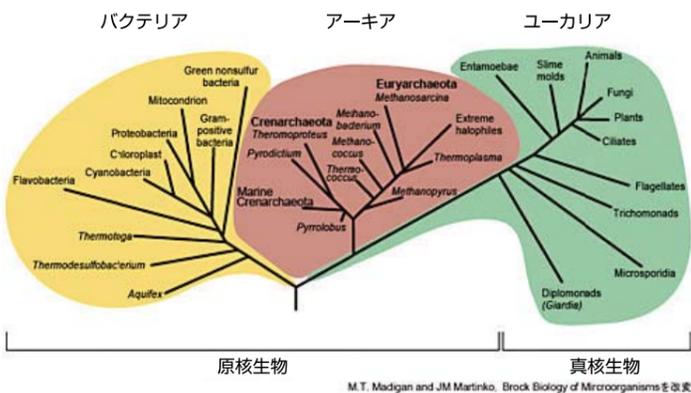


図1 地球上の生命体は、ユーカリア（真核生物）・バクテリア（真性細菌）・アーキア（古細菌）の3つに分けられる。人間などの動物や植物はユーカリアに、大腸菌や納豆菌などの微生物はバクテリアに、超好熱菌や高度好塩菌などの極限環境微生物の多くはアーキアに分類される。研究により、海底下の堆積物にはアーキアが大量に生息していることが明らかとなった。なお、真核生物は遺伝物質（核）が膜に覆われている生き物を、原核生物は遺伝物質が膜に覆われていない生き物をさす。原核生物のほとんどは単細胞生物で、身体の構造も真核生物に比べてシンプルだ。原核生物の外側は細胞膜で覆われ、栄養などの物質は細胞膜を通して体内に取り込まれる。

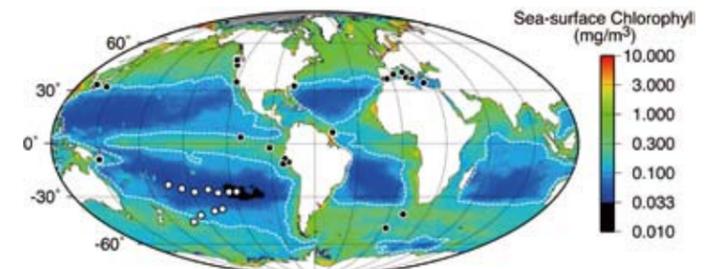


図3 IODP第329次研究航海では、地球上で最も海水中の有機物光合成生産が低い南太平洋環流を掘削調査する（白丸部分）。同様の海域は、地球表層の約40%以上を占めており（点線で囲った部分）、地球規模での地下生命圏の広がりや実態を解明する上で、極めて重要な航海となる。従来までの地下生命圏に関する情報が得られた箇所は、ほぼ大陸沿岸の有機物生産の高い場所であり（黒点）、従来にない新しい発見が期待される。

世界に誇る地殻内微生物研究の拠点 高知コア研究所

IODP において重要なテーマとなっている地下生物圏研究に対応するため、高知コア研究所では、より高度な微生物研究用コア試料の保存体制を整え、先端的な研究技術開発にも力を入れている。

高知コア研究所は、海洋研究開発機構の研究拠点の一つとして、IODP 研究航海などで得られたコア試料を用いて研究を推進するとともに、高知大学（海洋コア総合研究センター）と共同で高知コアセンターを運営している。高知コアセンターは、ドイツ・ブレーメン大学、米国・テキサス A&M 大学と並ぶ IODP における世界の 3 大コア試料保管拠点のひとつであり、地球深部探査船「ちきゅう」などの科学掘削船で採取されたコア試料のうち、西側太平洋域・インド洋域で採取されたものを保管・管理する施設だ。

高知コア研究所の大きな特徴のひとつは、コア試料を保管する施設と、これを用いて研究を行う施設とが一体的に運営されている点だ。コア試料の保管から試料採取・研究までがライン化されて、効率よく進められるように施設構成及び体制が構築されている。

高知コア研究所には、地震断層研究グループ、同位体地球化学研究グループ、地下生命圏研究グループという 3



高知コア研究所内に設置されるバイオ実験室の様子。

つの研究グループが置かれているが、近年、特に研究体制が強化されているのが、海底下の生物圏に関する研究分野だ。コア試料を用いた基盤的な研究はもちろん、先端的な研究技術の開発にも力を入れている。こうしたなか、蛍光色の違いによって海底下の試料から微生物細胞を検出・定量化する手法（10 ページ上）が新たに開発されるなど、優れた成果が得られている。また、「ちきゅう」で採取された微生物研究用のコア試料は、船上で真っ先に取り分けて、直ちに凍結保存され、高知コアセンターに運ばれる。そして、同センターには有機物や DNA などを含む重要なサンプルをできる限り良好な状態で長期保存するため、バイオ実験室には氷点下 80℃ の冷凍保管庫や、氷点下 160℃ の液体窒素凍結システムが用意されている。こうして保存することにより、貴重なコア試料を長期的かつ有効に微生物研究に活用することを可能にしている。

高知コア研究所の館内図

科学掘削船などで採取したコア試料の保管から研究までを一体的に運営することにより、海底下の生物圏を解明するための効率的な研究が実施されている。

- コア・データ等保管ゾーン
- コア解析ゾーン
- 研究室ゾーン



コア保管

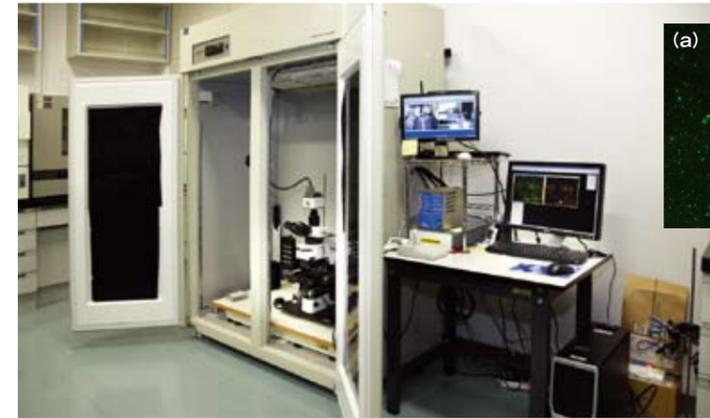
室温約 2℃ に保たれた広大なコア試料冷蔵保管庫（4 室）、氷点下 20℃ の冷凍保管庫（1 室）のほか、バイオ実験室には氷点下 80℃、氷点下 160℃ で保存するシステムも用意されている。

サンプリング

コア試料のサンプリングや非破壊物性計測、古地磁気測定などを行うためのコア一次解析ゾーンがコア保管庫に隣接して用意されている。

分析・実験

コア試料の専門的な研究を実施するための地球物理学、地球化学、微生物学などのさまざまな分析機器を用意した実験室が並ぶ。

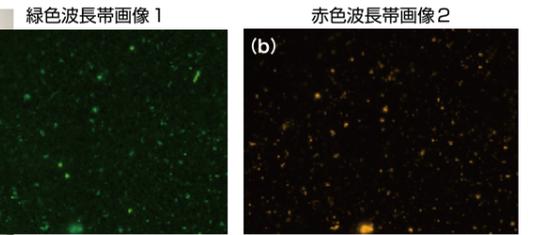


● SYBR-DiCE (サイバーダイス) 顕微鏡システム

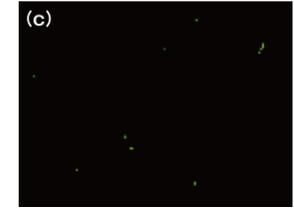
蛍光色の違いによって海底下のサンプルから微生物細胞と非生物粒子を自動的に検出し、定量化するシステム。高知コア研究所で開発された。目視では細胞の正確な判別が難しかったが、この手法を用いることにより、短時間で正確な判別・定量が可能となった。



顕微鏡システムに、試料を自動的に設置するスライドローダーを組み合わせて自動的に画像を撮影。さらにコンピュータを活用し、画像からの生物由来シグナルの検出・定量化までをすべて自動化した。



画像 1 と画像 2 の割り算
緑/赤 > 1.1 だけを表示



微生物細胞内の DNA と結合して蛍光を発する物質 (SYBR Green I) を用いて細胞を染色し、海底堆積物に含まれる微生物量を計測するとき、同時に多くの無機粒子も蛍光を発してしまい、正確な計測が難しかった。この手法では、両者の蛍光の色成分の違いを活用し、2 種類の光学フィルターを使って緑色波長画像 (a) と赤色波長画像 (b) を撮影し、イメージ上の割り算を行うことにより、生物由来のシグナルだけを取り出すことに成功した (c)。

● レーザーマイクロダイセクションシステム



顕微鏡で観察したサンプルの微小な部分をレーザーによって切り出すことができるシステム。細胞のなかから DNA を取り出す場合などに用いられる。

● コアカッター



凍結したコア試料を融かさずに小さくカットするために用いられる。カッターにはダイヤモンド粒子を特殊加工した刃が使われている。

● 嫌気グローブボックス



窒素（わずかに水素が含まれる）を充てんした、酸素のない嫌気条件下で無菌処理を行うために用いられる機器。

● 極低温試料室



写真のタンクは、小さく切り分けたコア試料を氷点下 160℃ で長期保存する。酸素に触れることなく微生物試料を保管することができる。他に氷点下 80℃ の冷凍保管庫も設置されている。

人類史上初のモホ面貫通をめざす

マントル掘削への取り組み

取材協力
小平 秀一 博士 阿部 なつ江 博士
海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域

「ちきゅう」によって海洋地殻を掘り抜き、地殻とマントルの境界であるモホロビッチ不連続面（モホ面）を貫通してマントルに到達する計画が、実現に向けて着々と進行している。どんな計画なのか、概要を紹介する。

海洋底科学掘削の長年の夢

2010年6月3～4日、石川県金沢市でマントル掘削の実現に向けた国際ワークショップが開催され、掘削候補地の絞り込みをはじめ、今後の調査計画、掘削・計測技術開発などに関して議論が交わされた。

1909年、東欧の地球物理学者モホロビッチによって、地球深部で地震波速度が急増する面が発見された。地殻とマントルの境界をなすこの不連続面は、彼の名前からモホロビッチ不連続面（モホ面）と呼ばれている。大陸地殻の厚さが30～50kmなのに対し、海洋地殻は5～8kmと薄いため、海洋底からマントルに到達しようという「モホール計画」が1960年代に行われたが、マントルには遠く及ばず、半世紀を経た今も実現していない。“海洋底科学掘削の長年の夢”であるマントル掘削は、IODPにおける重要課題として初期科学計画（ISP）で取り上げられ、第2期科学計画の優先課題の一つになろうとしている。今回の国際ワークショップは、日本が誇る地球深部探査船「ちきゅう」によるマントル掘削実現への大きな進展でもあった。

事前調査開始へ向けて

掘削地点については、科学面から、①平均的な地殻厚（6km以下）と構造を持つ高速拡大海洋リソスフェア（上部マントル）上であること、②地震波による探査で明瞭な海洋モホ面の存在が示されている場所であること

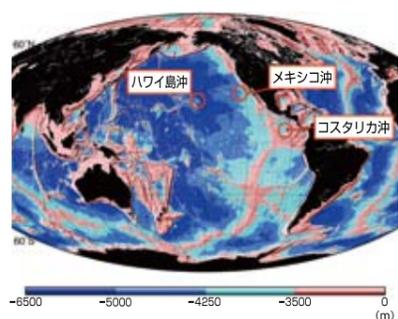


図1 マントル掘削の候補地点

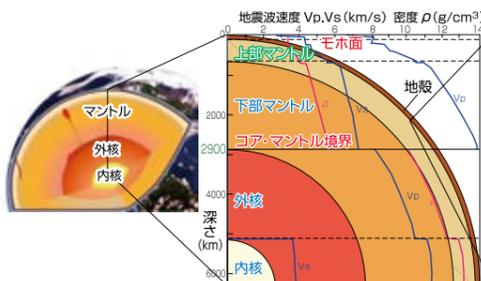


図2 地球の内部構造模式図と深度に対する地震波速度と密度



図3 地震波構造探査によってイメージングされたモホ面



2010年6月に金沢で開催された国際ワークショップ

点が条件とされている。さらに、技術的観点からの制約として、①水深4,500m以浅、②モホ面深度の温度が250℃程度以下、③船底からの掘削全長が12,000m以下、④陸上基地に近いこと、⑤安定した海流・海象であることなどが求められている。

今回の国際ワークショップにおいて、コスタリカ沖のココスプレート（IODP掘削サイト1256付近）、ハワイ島沖の太平洋プレート（ハワイ・ノースアーチ東端）、メキシコ・バハカリフォルニア半島沖の太平洋プレート（ディーブトウ・サイト）という太平洋上の3地点が有力候補として絞り込まれ、これまで全くデータがないメキシコ沖で事前に調査が行われることになった。「どのように事前調査を進めていくかは、今回のワークショップでも話題になりました。日本は1997年から南海トラフで地震波探査による海底深部構造の調査を開始し、その成果が現在の南海掘削に大いに役立っています。そのため、南海掘削での経験に学ぶべきという意見も出ました」と小平秀一博士はいう。

JAMSTECでは、すでにメキシコ沖で深海調査研究船「かいらい」による長期間の事前調査（反射法および屈折法による地震波構造探査）実施に向け準備を進めている。国際的なコミュニティの合意の下、まずは日本が先導的に取り組み、マントル掘削実現への道を拓こうという考えだ。「事前調査は、掘削地点を決めるという目的だけでなく、広域的なテクトニクス場をしっかりと理解した上で、掘削点の科学的な意味を明確にするという点でも大切です」と小平博士。「またマントル掘削は、私たち地震研究者がイメージングによって見てきたものを実際に検証できる機会であり、イメージングをさらに高精度化していくためにも重要です。事前探査でその実現に貢献していきたい」と話す。

船上で研究航海を統括する二人の最高責任者

「ちきゅう」船長とOIM



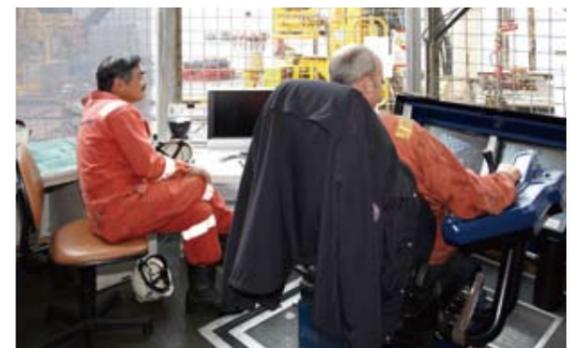
取材協力
箕浦祥 船長
樋口清三郎 OIM

航海と操船についての責任を負う船長、そして、掘削地点で「ちきゅう」での掘削作業の総指揮をするOIM（Offshore Installation Manager）。研究航海の成功と安全のため、それぞれの専門集団のトップに立つ二人が現場での状況判断という重責を担う。

「ちきゅう」船上では、掘削地点に着いてからの掘削関係の指揮をOIMが担当し、それ以外の運航関係は船長が指揮を執るという役割分担になっている。両者とも4週間乗船勤務した後、陸で休養していた2人と交代する。

「掘削中もダイナミック・ポジショニング・システム（DPS）という特別な装置で船の位置を定点に保持させ、事故のないようOIMとお互いに協力しながら作業を進めています。特に南海トラフは非常に黒潮の流れが強いところですので、気象にも海象にも常に注意を払いながら船を定点保持するように努めています」と船長の一人、箕浦祥さん（日本マントル・クエスト株式会社）は言う。「普通の船と根本的に違うのが、動くのではなくあらかじめ決めた地点に留まっているのが仕事ということですね。『ちきゅう』は信頼性の非常に高い、最新の計器を積んでいます。風の影響を非常に受けやすい船です。コンピュータの制御を正確に人間が読み取ってコントロールするという普通とは違った難しさもあります」

国籍の違う多くの作業クルーや研究者などが乗り込むため、一般の商船とはだいぶ勝手が違うというが、その分、今まで知らなかった世界の人たちと知り合う楽しみが



ドリラーズハウスにて、スタッフと話す樋口OIM(左)。



ブリッジに立つ箕浦船長。

ある。「船舶運航関係者以外の人たちと話をする機会が増え、その考え方や技術の高さにいろいろと刺激を受けています」

OIMの一人、樋口清三郎さん（日本マントル・クエスト株式会社）は、ガスや石油の開発を行う海洋掘削船の仕事に35年以上従事してきたベテランであり、日本人では初の「ちきゅう」OIMでもある。「以前の海洋掘削船はすべて人力での作業でしたので、私も若いころはマッチョな体型をしていました。『ちきゅう』は第5世代といわれる掘削船ですから、掘削関連機器は多くの部分で自動化されています。従って人力での作業に比べスタッフが怪我をする確率は格段に減りました。しかし、スタッフの人数そのものは変わりません。最後の微調整や判断をするのは人間ですから」

掘削作業中、最も気になるのは天候の変化である。「自然が相手ですから、それに逆らうわけにはいきません。特に問題なのが台風です。ライザー掘削の場合、稼働している海域や水深にもよりますが、ライザーを回収して安全に避難するためには、5日以上前に判断をしなければなりません。もし間に合わなかったら、そのままの状態に耐えるしかありません」

樋口さんにとって、「ちきゅう」での掘削作業は、石油や天然ガスを掘り当てたときはまた違った達成感がある。質の良いコアが採れるとやはりうれしくなると話す。「第322次研究航海で、のちに「奇跡のコア」とよばれる貴重な試料が上がってきたときには、私も初めてまじまじとコアを見ました。研究者の皆さんの喜びが、われわれの喜びでもありますね」

船長とOIMそれぞれの立場で、研究成果につながることを祈りながら、航海と掘削作業の安全な遂行のため心を砕いている。

新しい地球科学を開拓する「ちきゅう」の活躍 もっと知ってほしい!

「ちきゅう」が行う科学掘削によって、地球科学は新たな時代を迎えようとしています。地球深部探査センター(CDEX)では、「ちきゅう」の活動や科学掘削について、多くのみなさまに理解していただくため、さまざまな取り組みを実施しています。



夏休み「Sand for Students」に参加した高校生たち。

「いくぞ! 「ちきゅう」」特設ページで、「ちきゅう」の活動を追う



2010年7~8月、CDEXのホームページにて、南海トラフ地震発生帯掘削計画(南海掘削)の特設ページ、<いくぞ! 「ちきゅう」巨大地震発生帯をあばけ! >で、研究航海の目的や掘削作業を動画で伝える「JAMSTEC チャンネル」、研究の全容を解説するコラム記事「TEGAMI」、航海中の船上での活動を紹介する「デイリーレポート」や「フォトギャラリー」、さらにはツイッター配信などを掲載。9月には沖縄航海の特設ページを掲載し、その後に再び行われる南海掘削でも同様に掲載する予定です。ぜひ、アクセスしてみてください。

2010年7~8月に実施された南海掘削の特設ページ。動画や写真、日々のレポートなどで、研究航海の様子を伝えます。
<http://www.jamstec.go.jp/chikyuu/exp326/index.html>



海底を掘り進むために用いられるドリルビット。作業後の確認の様子。

夏休み「ちきゅう」授業を実施

夏休み期間に、スーパーサイエンスハイスクールをはじめ4校の生徒らが参加して、「Sand for Students (S4S)」野外実習および海洋科学掘削に関する授業が行われました。S4Sは、日本と米国が主導し、世界24カ国が参加するIODPのアウトリーチ活動として、多くの地球科学者や高校教諭らの応援のもとでCDEXが実施しています。



野外実習で、河原の石を調べる参加者たち。

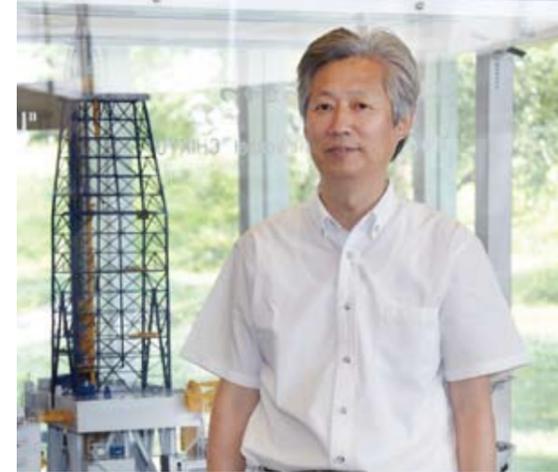
TV番組で「ちきゅう」が行う科学掘削を紹介

2010年7月には、TV特別番組「トヨタECOスペシャル 奇跡の海を行く! 僕たちの地球大航海」(日本テレビ系列)で「ちきゅう」船内の様子や海底下生物圏研究が紹介されました。

そして、2010年9~10月に実施されるIODP第331次研究航海「沖縄熱水海底下生命圏掘削」については、実施される掘削作業や船上での研究の様子などをTV番組で紹介することが決まりました。ご期待ください。

科学掘削の成果を 社会に活かしていくことが大切

2010年に実施される南海トラフ、沖縄トラフでのIODP研究航海においてめざすものは何か。CDEXセンター長の東垣が語る。



「ちきゅう」を使った新たな地下生物圏研究

今号の特集記事でも紹介したように、「ちきゅう」による本格的な地下生物圏に関する研究航海が、いよいよ沖縄トラフにおいて実施されます。

地球最大の生命圏ともいわれる海底下の生物圏探査については、IODPの初期科学計画でも重要な課題となっており、研究の成果が大いに期待されていますが、「ちきゅう」のオペレーションを担当する私たちCDEXにとっては、コア試料の回収率を高めるとともに、それらが海水や陸上の微生物などによって生物汚染されないようにしっかりと管理・保管を行うこと、船上での精度の高い分析や実験などの研究環境を整えること、さらに高知コアセンターでコア試料を適切に保管し、後の研究に提供していくことといった、トータルなマネジメントをいかに確実に実施していくかが重要であると考えています。

また、地下生物圏研究においては、掘削によって採取した試料を、その場所の環境、つまり圧力や温度などを保持したまま採取し保存するといったことも大切です。この先に予定している下北半島沖での掘削では、そうしたことに配慮した「実環境ラボ」の強化を図るための試験、さらには、回収された掘削泥水に含まれるガス成分(マッドガス)を、直ちに分析する「マッドガスラボ」の試験なども予定しています。こうした、新しい技術や手法を実現していくことによって、地下生物圏研究の新しい時代を開拓していくことも、「ちきゅう」の大切な役割であると考えています。

新しい技術や手法の開発ということでは、今号の11

ページで紹介したマントル掘削についても同様です。また先の話ですが、大水深(4,500m)かつ海底下7,000mという大深度ライザー掘削技術の実現、高温(250℃程度以下)かつ高水圧下で使用可能な検層ツールの開発など、乗り越えるべき技術的な課題はいくつもあります。人類未踏のマントル到達を果たすには、世界的な協力のもとで叡知を結集し、技術的課題をクリアしていかなければなりません。

安全を最優先する掘削によって社会への貢献をめざす

地下生物圏研究では、海底下から新たな生物資源が発見されることも、大いに期待されています。「ちきゅう」によって得られた試料は、できる限り広く研究者に分配し、科学者の好奇心を満足させるだけでなくとどまらず、新たな資源を有効に活用することによって社会に貢献し、地球の未来、人類の発展に役立てていただきたいと願っています。

社会への貢献という意味では、南海掘削にも大きな期待が寄せられています。今年度は長期孔内計測の実験が行われます。さらに今後は、地震準備過程をモニタリングするための計測機器を、できるだけ早いうちにDONET(海底地震・津波観測ネットワークシステム)と結び付けて、熊野灘海域に三次元的なリアルタイム地震観測網を構築する予定です。DONETで設置された海底の観測網と、海底下の孔内に設置された観測機器が有機的に連動することにより得られる観測結果は、巨大地震・津波の予測や減災対策に貢献するはずで

最後に、漁業関係者などみなさんからご質問いただいている科学掘削の安全性確保についてお話しておきます。2010年4月に、米国南部沖のメキシコ湾において、石油掘削孔から大量の原油が流出する事故がおきました。同様の事故が科学掘削でもおき得るのではないかとお考えになる人がいますが、科学掘削では掘削の前に4~5年という長い時間をかけて海底下深部構造探査、海底地形調査、海底土質サンプル採取といった事前調査を行い、できる限りガスや高圧の流体が噴出する可能性が少ない、安全な場所を選んで掘削を行っています。また掘削作業においても、安全性の確保を何よりも優先しています。どうかご安心いただき、科学掘削へのご理解とご協力をお願いいたします。



高知コアセンターのコア冷蔵保管庫にて。

C L O S E U P

「ちきゅう」船上からのつぶやき



「ちきゅう」研究航海情報などをツイッターで配信中。南海掘削ステージ3航海中も船上での出来事や船内の様子などをリアルタイムで伝えた。

写真は、ツイッターでも紹介したドリルフロアの立ち入り制限区域を示すライン。赤、赤白、トラ（黄黒）と制限レベルに応じて色が異なっている。

ツイッターアカウント
http://twitter.com/Chikyu_JAMSTEC/

CHIKYU HAKKEN
— EARTH DISCOVERY —

IODP日本実施機関レポート
2010年8月発行 第10号

IODP
INTEGRATED OCEAN
DRILLING PROGRAM

発行 独立行政法人海洋研究開発機構 地球深部探査センター 神奈川県横浜市金沢区昭和町3179-25
電話番号 045-778-5647 FAX 045-78-5704
EMAIL cdex@jamstec.go.jp ホールページ <http://www.jamstec.go.jp/chikyu/>
©地球深部探査センター 本冊子の内容を許可なく複製、再配布などの行為を行うことは禁止いたします。

JAMSTEC
CENTER FOR DEEP EARTH EXPLORATION
IODP
JAMSTEC



海洋研究開発機構
地球深部探査センター
<http://www.jamstec.go.jp/chikyu>