



## 掘削情報科学が 教科書を書き換える



国際地学オリンピック 日本大会報告

国際海洋環境情報センター  
GODAC 15周年





# 掘削情報科学で地球の未来を予測する

取材協力 山田泰広 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 海洋掘削科学研究開発センター (ODS) 研究開発センター長

「茶わんが割れる前には、小さなひびがたくさんできます。やがてそれらが大きな割れ目に成長して茶わんが割れます。たくさんの小さなひびを正確に計測し、その計測データを分析することで、茶わんがいつどのように割れるのかを予測することができます。空間と時間のスケールは大きく異なりますが、私たちは同じようにして海底の変動を計測・分析して、地球の未来を予測することを目指しています」。山田泰広さんは海洋掘削科学研究開発センター (ODS) の目標をそう説明する。

山田さんは東北大学理学部地学科で学んだ後、油田やガス田を探索する石油企業に就職した。「石油や天然ガスは、断層によって変形した地層の岩石の隙間にたまります。油田やガス田を見つけるには、どのような仕組みで地層が変形するのかを理解する必要があります。私はその研究を担当しました」

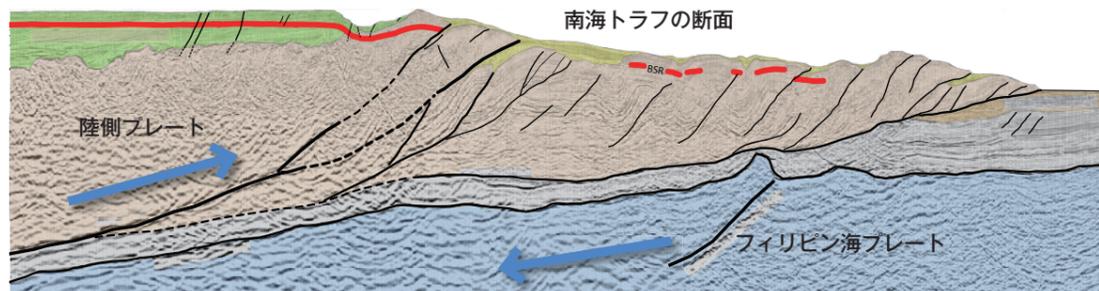
その後、大学に移った山田さんは、箱のなかにつくった地層モデルの砂箱実験やコンピュータシミュレーションにより、地層が変形する仕組みの研究を続けた。「茶わんに小さなひびができるように、地下でも熱や圧力、水の流れなど、細かな変動が起きています。そのような“揺らぎ”が、やがて変形に成長する過程を、砂箱実験やシミュレーションで再現することができるようになります」

した。地下を掘削して揺らぎを計測することができれば、そのデータを実験室で行ってきた研究と対応させることで、未来を予測できるに違いない。そう考えた私は研究室を飛び出し、フィールドに向かうことにしました」

こうして山田さんは2014年、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) ODSの研究開発センター長に就任した。

なぜ海洋掘削なのか。「私は地下を調べて地球の過去を知り、未来を予測したいのです。地球の歴史を刻み込んだ堆積物は、陸上では風化しますが、海底では情報が乱されことなく保存されています。海洋底拡大説や恐竜絶滅の隕石衝突説など、地学の教科書に載っている地球の歴史は、海洋掘削により仮説が実証されたものが多いのです」

では、なぜJAMSTECなのか。「JAMSTECは、海底を知るために欠かせない3つの研究基盤がそろった、世界で唯一の研究機関だからです」。海底を知る3つの研究基盤とは、人工地震が海底を伝わる速度を観測するなどの物理探査を行う調査船、海底を掘り進める掘削船、掘削試料 (コア) を分析する研究施設だ。JAMSTECには物理探査を行う深海調査研究船「かいらい」、世界最新鋭の科学掘削船である地球深部探査船「ちきゅう」、そ



南海トラフにおける断層形成の砂箱実験 (下)

南海トラフでは、フィリピン海プレートが陸側のプレートの下に沈み込んでおり、周期的に巨大地震が発生して新しい断層が形成されている。そのような断層形成の過程を砂箱の地層モデルで再現した。

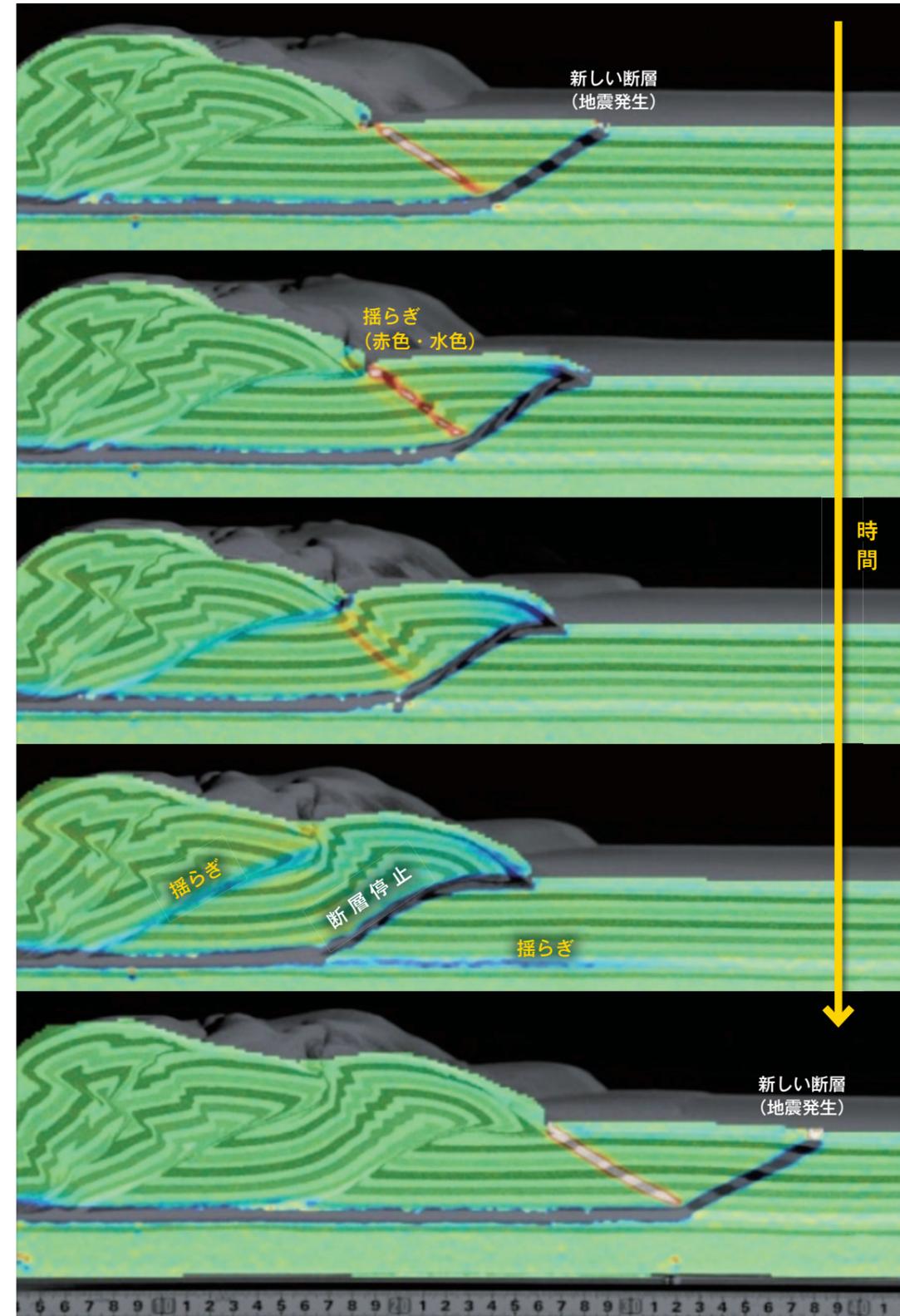


して世界三大コア研究所の1つである高知コア研究所がある。さらに2016年、高精度物理探査システムと海底掘削ロボットを搭載した最新鋭の海底広域研究船「かいらい」が加わった。

「私たちは、それらの研究基盤を駆使して、“掘削情報科学”という新しいサイエンスを進めています。これまでの掘削科学は、コアの分析が主な手

法でした。それに加えて、これまで科学研究で活用してこなかった掘削・運航データや、掘削した孔内での計測でビッグデータを取得し、情報科学の手法で分析して未来を予測する、それが掘削情報科学です」

掘削情報科学によって、どのような未来予測が目指されているのか――

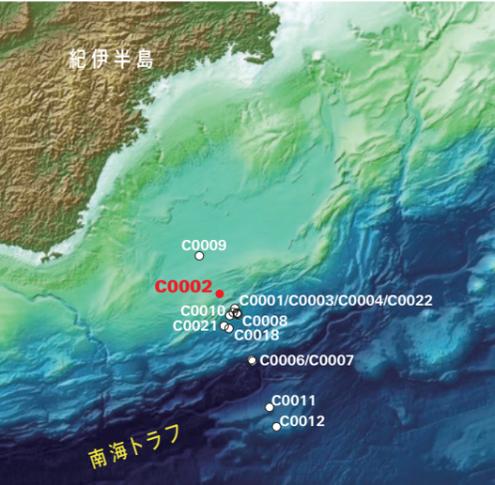


砂箱実験の画像解析

砂箱実験を画像解析して地層のひずみ (揺らぎ) を抽出した (赤色・水色)。揺らぎが成長して新しい断層が形成されていく過程が分かる。実際の掘削データには、自然の揺らぎが含まれている。自然の揺らぎを正確・精密に計測することで、地下で何が起こりつつあるのか、近未来を予測することができる。

# 南海トラフの地震発生帯の断層で 巨大地震の切迫度を知る

取材協力 木下正高 東京大学地震研究所 教授 / ODS 招聘上席技術研究員

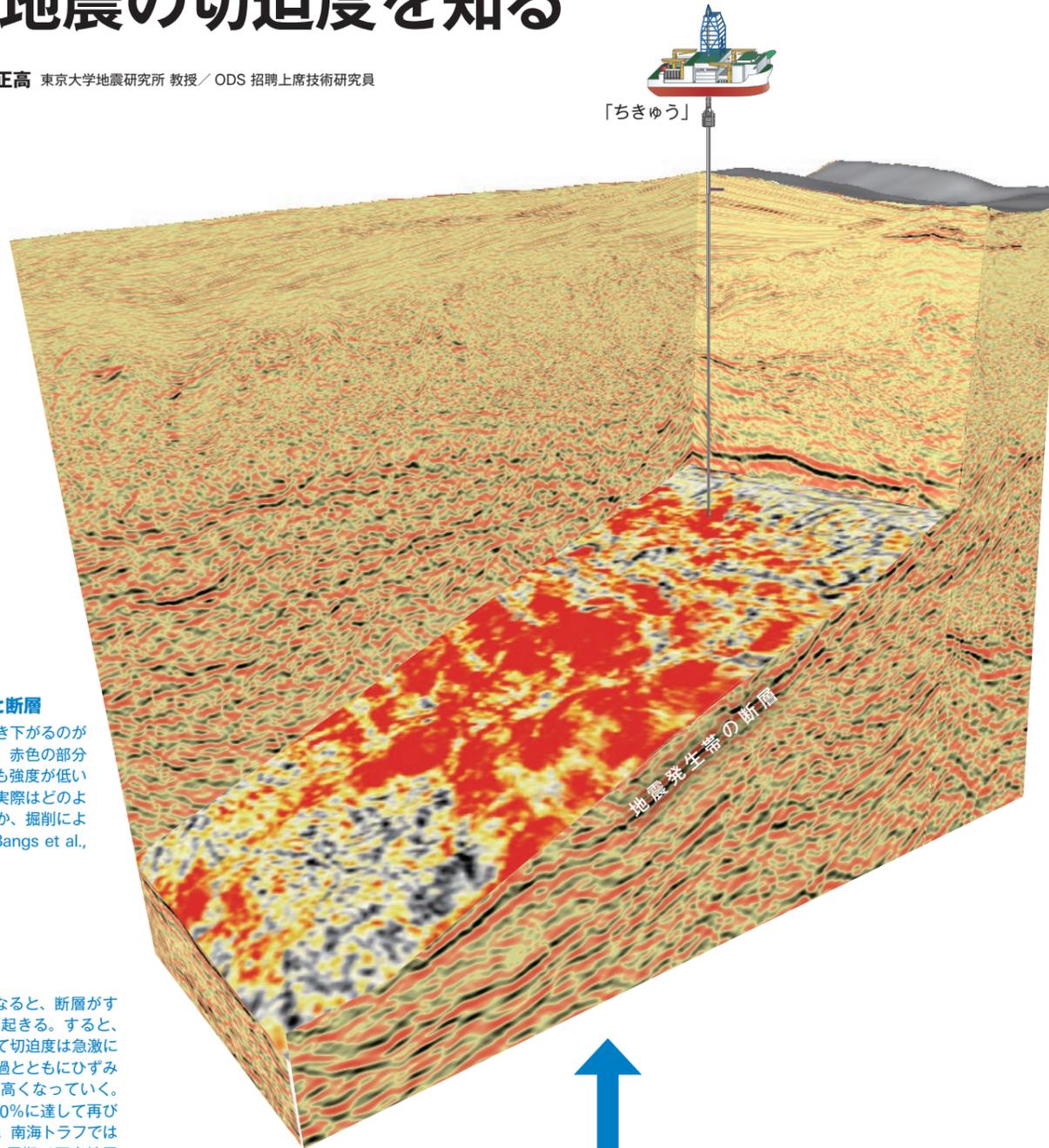
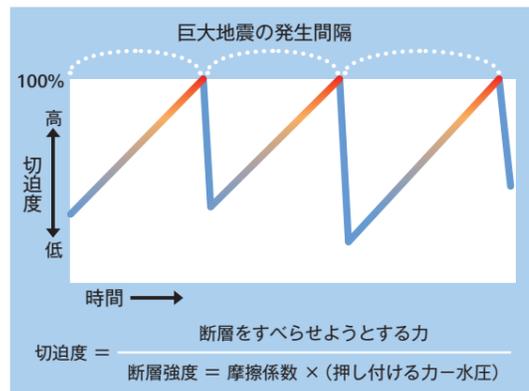


## C0002サイトと断層

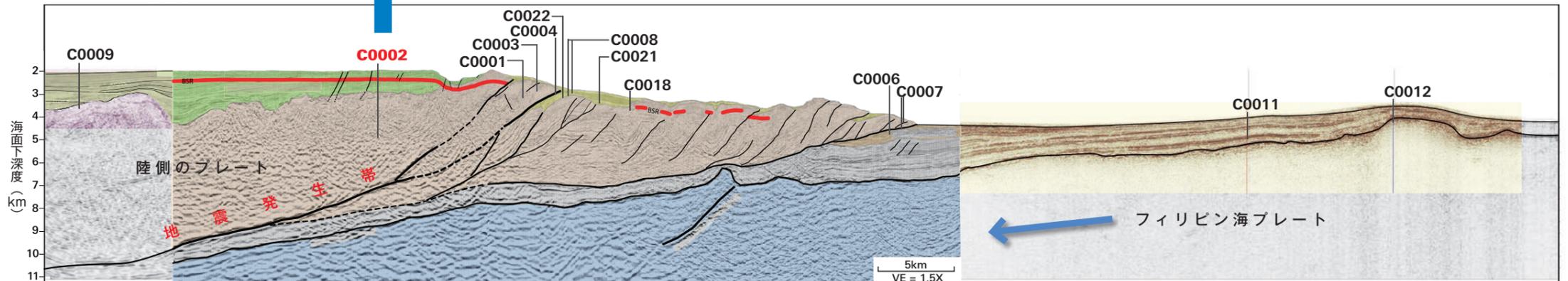
右上から左下に傾き下がるのが地震発生帯の断層。赤色の部分はほかの部分よりも強度が低いと推定されるが、実際はどのような特性を持つのか、掘削により明らかになる。(Bangs et al., 2009 EPSLより)

## 切迫度の概念図

切迫度が100%になると、断層がすべて巨大地震が起きる。すると、ひずみが解放されて切迫度は急激に低下する。時間経過とともにひずみがたまり切迫度が高くなっていく。やがて切迫度が100%に達して再び巨大地震が起きる。南海トラフでは100~150年ほどの周期で巨大地震が繰り返し起きてきた。



南海トラフの断面と掘削サイト



「海底を掘削すれば、南海トラフ地震について知りたい情報は得られると思っていました。しかし現実にはそう甘くはありませんでした」。2007年から続く「ちきゅう」による南海トラフ掘削調査を主導してきた木下正高 教授はそう振り返る。

南海トラフでは100~150年ほどの周期でマグニチュード (M) 8クラスの地震が繰り返し起きてきた。1944年にM7.9の昭和東南海地震、2年後の1946年にM8.0の昭和南海地震が発生。国の地震調査研究推進本部では、今後30年以内に南海トラフでM8~9クラスの地震が起きる確率を70%程度と発表している。「ただしこれは、過去の地震の記録から統計的に導き出された数値であり、地震が起きるメカニズムや震源域の観測データに基づく予測ではありません」と木下教授は説明する。

南海トラフでは、フィリピン海プレート (海洋プレート) が年間4cmほどの速さで陸側のプレートの下に沈み込んでいる。それに伴い陸側のプレートが引きずられ、プレート境界の断層にひずみがたまっていく。そしてあるとき、ひずみに耐え切れなくなり断層がすべて巨大地震が発生する。「巨大地震がいつ起きるのかを予測することは難しいのですが、どれくらい巨大地震が差し迫っているかという“切迫度”を、震源域の観測データをもとに科学的根拠のある数値として導き出すことは可能だと考えています」

単純に言えば、断層をすべらせようとする力が断層の強度を上回ったときに地震が起きる。断層の強度は、断層のすべりにくさ (摩擦係数) と、断層が地層や海水の重さによって上から押さえ付けられている力の積で決まる。ただし、断層に水が含まれていると、その水圧により断層を上から押さえ付ける力を押し返して、断層をすべりやすくする。

「私たちは、切迫度に関するそれらの数値は、掘削すればすぐに分かると考えていたのです。しかし、なかなか思い通りにはいきませんでした。海洋プレートの沈み込みに伴うひずみは陸側プレートの

地層全体に蓄積しているもので、切迫度を断層だけでなく海底面から深度ごとに連続的に調べていく必要があります。ところが、南海トラフの海域は世界有数の速い海流である黒潮が流れ、また海底は掘削した孔が崩れやすいため、コアを連続的に採取することがとても難しかったのです」

そのような状況で地層・断層の状態を知ることができないものか。研究者たちは、「ちきゅう」で掘削・運航を担当する技術者に相談した。「たとえば、ドリルビットを回転させて地層を掘削すること自体が摩擦係数を調べる実験だと考えると、掘削データを使える! と気がきました」。ドリルビットにかかる力 (トルク) から地層の摩擦係数を導き出すなど、いままです科学的研究では活用してこなかった掘削・運航データから知りたい情報を得る取り組みが、「ちきゅう」船上で始まった。

「掘削・運航データを活用するには、それぞれのデータが地層のどのような情報を反映しているのか、また誤差はどれくらいかなどを検討する必要があります。そして、それら質の異なるさまざまな種類のビッグデータを統合して、知りたい情報を導き出すには、情報科学の手法を駆使した掘削情報科学が必要なのです」

現在、南海トラフ掘削による最深掘削深度は、東南海地震の震源域C0002サイト (水深1,938m) の海底下3,045mで、地震発生帯の断層まで約2,000mの地点だ。同サイトの海底下約780~980mの掘削孔には、地震計や圧力計、ひずみ計、傾斜計、温度計を備えた長期孔内観測システムが設置されている。

そして早ければ2018年までに、地震発生帯の断層までの掘削が行われる予定だ。「断層の掘削孔にも長期孔内観測システムを設置して、切迫度に関わる数値の時間変化を捉えることで、より高い精度で切迫度を導き出すことができるはずだ」

ただし、地震発生帯の断層への到達は容易ではない――

# 「ちきゅう」で掘削情報科学を築く

取材協力 モー・キョー ODS 研究開発センター長代理 掘削データ統合研究グループ グループリーダー

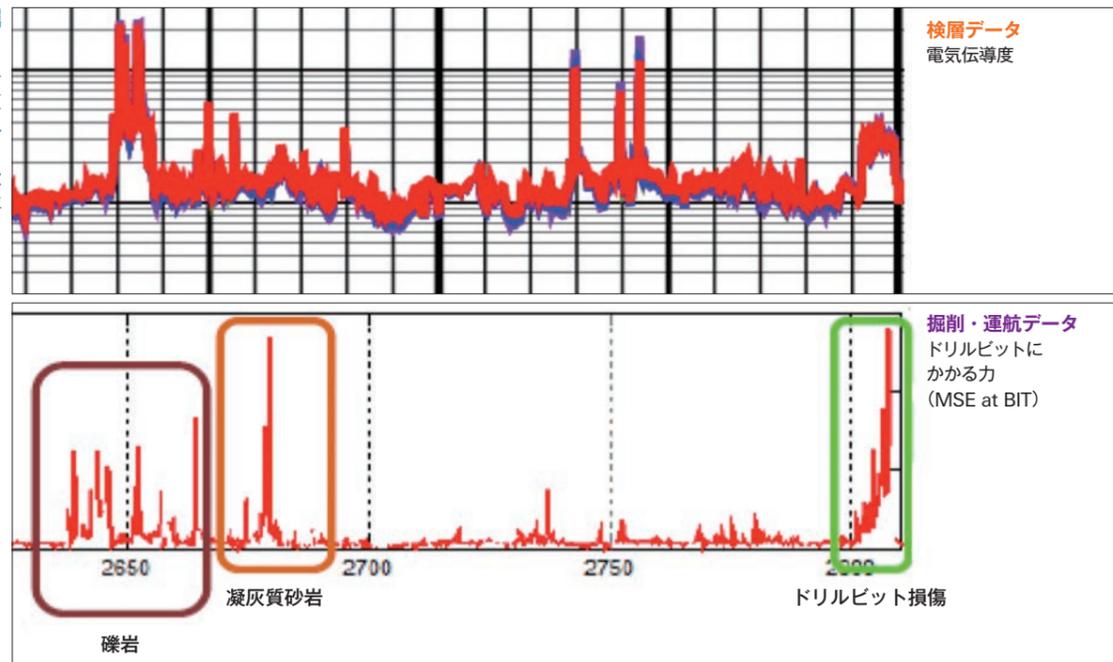
ミャンマー出身のモー・キョーさんは、石油企業で働いた後、1991年に東京大学 海洋研究所（現大気海洋研究所）に留学した。その後、米国の深海掘削船「ジョイデス・レゾリューション」（JR）で航海ロギングスタッフサイエンティストを担当した後、JAMSTECにおいて「ちきゅう」による海洋掘削に携わってきた。

掘削を行うドリルパイプの最先端部にあるドリルビットの上部にセンサーを取り付け、掘削と同時に地層の物性データを計測していく手法を「検層」と呼ぶ。電気伝導度や自然ガンマ線、音波速度などの項目を連続的に計測することができる。「ただし、1項目を計測するにも大きなコストがかかるため、調査目的に合わせて重要な項目だけ検層で計測を

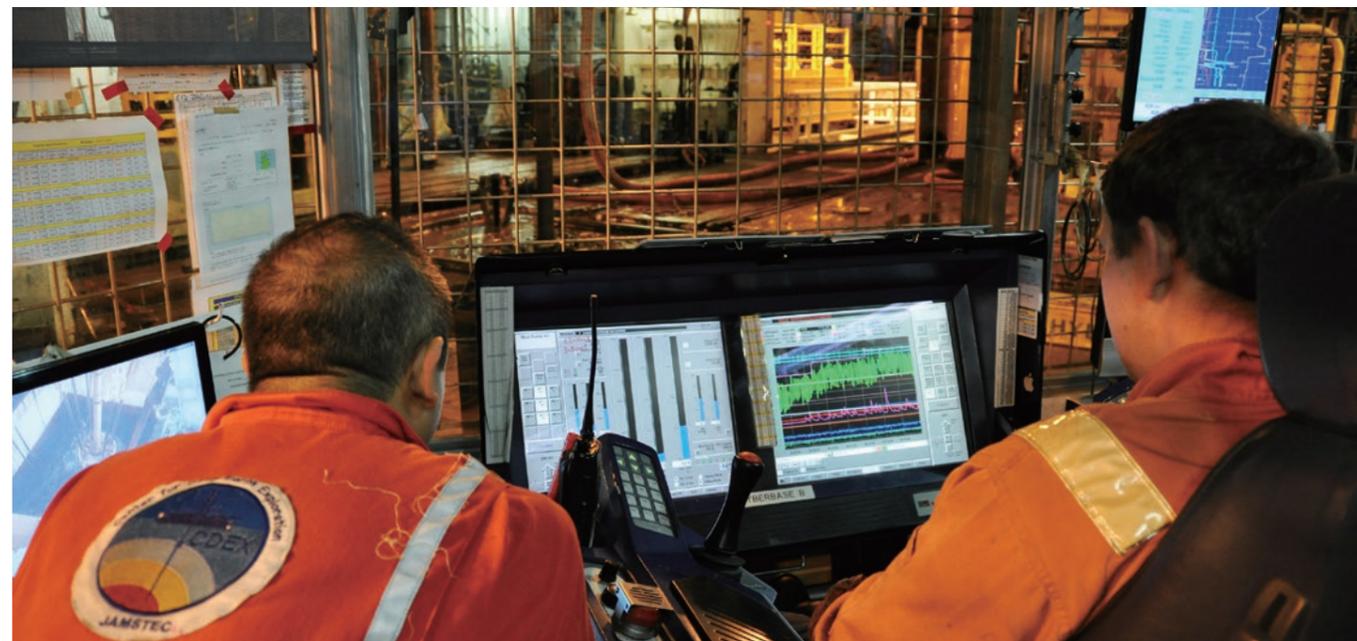
## 検層データと対応する掘削・運航データ

掘削・運航データが検層データと対応し、岩石の種類を反映していることが確かめられた。

「ちきゅう」によるIODP第337次研究航海「下北八戸沖石炭層生命圏掘削」のデータ



## 掘削作業コントロール室



行います」とモーさんは説明する。

安全に掘削・運航を行うために、「ちきゅう」には数多くのセンサーがあり、船体に働く波力やドリルパイプやドリルビットにかかる力がモニターされている。そのような掘削・運航データの一部は、地層の物性を反映しているという研究が、「ちきゅう」運航前に発表されていた。

「検層による計測データと同等の情報が、掘削・運航データに含まれている可能性があるのです。ただし、その研究はきちんと検証されていませんでした。1970年代から掘削を進めてきたJRには、掘削・運航のためのセンサーが少なく、データも記録されていなかったからです。一方、『ちきゅう』は1秒間に1,000種類もの掘削・運航データを取得し、すべてのデータを記録しています。私たちは、そのうち

の約30種類のデータからノイズを取り除き、それらが検層で計測する電気伝導度や自然ガンマ線などの物性データと対応することを確認しました」

コアの分析データや検層データだけでなく、掘削・運航データという第3のデータも活用して海底下を探る掘削情報科学が、まさに「ちきゅう」を舞台に進行中だ。「『ちきゅう』には過去10年にわたる科学掘削の掘削・運航データがすべて保存されています。私たちはそのデータを解析して、過去の掘削から新たな知見を見つけ出す研究を行っています。私たち掘削データ統合研究グループの数人のスタッフでは、とても手に負えないビッグデータですが……（笑）」

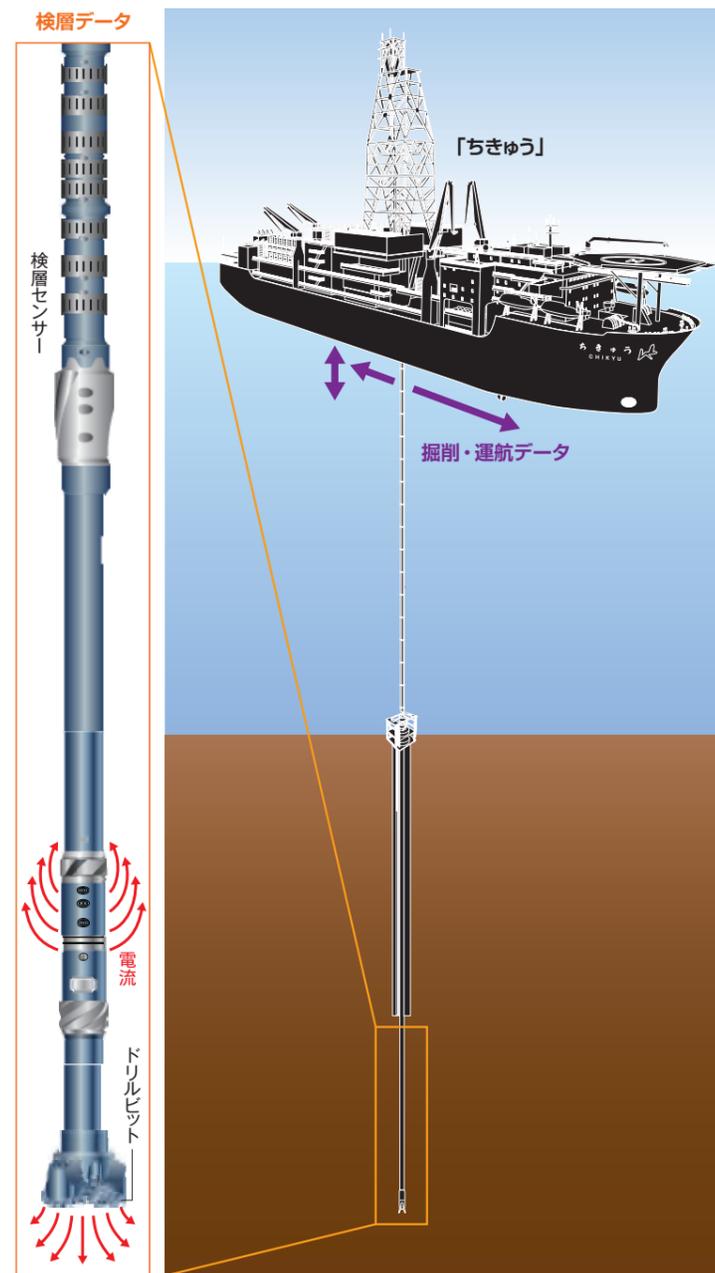
さらにモーさんたちは、掘削情報科学を発展させるための新たな取り組みを始めようとしている。「ちきゅう」を使った掘削実験だ。「たとえば掘削するときのドリルビットの回転速度をわざと遅くすると、掘削・運航データがどう変わるかを調べます。それにより掘削・運航データと地層の物性との対応がより詳しく分かるようになるはずです」

掘削・運航データから地層の物性をより正確にリアルタイムで知ることができるようになれば、科学研究だけでなく、安全な掘削・運航に極めて有効だ。そのため石油産業からも注目を集めている。「海底油田の探査は、なるべくコストがかからない水深が浅い海域から始められました。ただし近年、まだ発見されていない海底油田を探すため、水深1,000mを超える海域や海流が速い海域でも、掘削が必要になってきました。一方、私たちは黒潮が流れる南海トラフの水深約2,000mの海域で掘削を行い、経験を積んできました。さらにそこで“掘削実験”を行うことで得られる知見を、石油産業に提供していきたいと考えています」

「ちきゅう」にとっても、石油産業との連携が重要だとモーさんはいう。「南海トラフの地震発生帯の断層までの掘削やマントル掘削など、前例のない困難なプロジェクトに『ちきゅう』はこれから挑戦していきます。それらを安全に実現するには、数多くのノウハウを持つ石油産業の優秀な技術者たちの協力が不可欠です」

マントル掘削は、厚さ6kmほどの海洋地殻を貫通してマントルに達するという、海洋掘削の50年来の夢だ。「ちきゅう」は10年以内にマントル掘削を開始することを目指している。

「私はその参考にするため、海洋地殻とマントル最上部が陸上に乗り上げた地層を掘削するプロジェクトに参加します」とモーさん。それは2016年秋から進められているオマーン・オフィオライト陸上掘削計画だ――



# 地殻とマンツルの境界は本当にモホ面か？

## オマーン・オフィオライト陸上掘削

取材協力 高澤栄一 新潟大学理学部地質科学科 教授

地球表面は十数枚のかたい岩板であるプレートで覆われている。海洋プレートは海洋地殻とマンツルの最上部から成る。海洋プレートは中央海嶺で生まれ、移動し、海溝で地球内部に沈み込む。このようなプレートテクトニクスが確認されているのは、太陽系の惑星や衛星のなかで地球だけだ。

海洋プレートが生まれては移動し、地球内部に沈み込むことで、水や炭素、熱が、大気・海洋と地球内部の間でやりとりされる。そのやりとりにより、地球環境は安定し、約40億年にわたり生命が存続できたと考えられている。

なぜ地球にだけプレートテクトニクスが起きているのかは、よく分かっていない。地球には海があることが、プレートテクトニクスが起きている大きな要因であることは間違いないだろう。しかし海洋プレートの構造を探る手法は、人工地震を起こしてその波が海底を伝わる速度を観測するなど、間接的な手法に限られてきた。

「海洋プレートを構成する岩石の種類や物性を直接知る上で重要な知見を提供してきたのが、オマーン・オフィオライトです」と高澤栄一 教授はいう。アラビア半島に分布するオマーン・オフィオライトは、海洋地殻からマンツル最上部までが陸上に丸ごと乗り上げて露出している地層だ。「オマーン・

オフィオライトは、約1億年前に中央海嶺でつくられた海洋プレートが、約8000万年前に陸上に乗り上げたものと推定されています。ほとんど変形を受けていない海洋地殻からマンツル最上部までの連続的な試料を得られる貴重な場所です」

高澤教授は1997年から、オマーン・オフィオライトのフィールド調査をほぼ毎年続けてきた。「露出している岩石を採取して分析を行ってきましたが、それらは風化作用でかなり変質しています。調査を続けていると、ときどき沢などに風化していないフレッシュな岩石が見つかります。また、最近の道路建設に伴い、地表から10mほど掘られた地層を見ることができるようになりました。そこでもフレッシュな岩石が見られます。それらの岩石は、私たちが長年調査してきた風化を受けた岩石とは、性質がかなり異なります。掘削調査が必要だと思いました」

2016年秋から国際陸上科学掘削計画（ICDP）の一環として、オマーン・オフィオライトを史上初めて陸上掘削するプロジェクトが始まっている。2017年1～3月には高澤教授やJAMSTEC ODSのモー・キョーさんたち日本チームを中心とする掘削が行われる。「大きな注目点は海洋地殻とマンツルの境界です」と高澤教授は指摘する。

海底下6km付近では、地震波の伝わる速度が速くなることが知られている。そこは「モホロビッチ不連続面（モホ面）」と呼ばれ、海洋地殻とマンツルの境界だと考えられてきた。「しかし、実際の海洋地殻とマンツルの境界を、まだ誰も見たことがありません。また、海洋地殻の約6kmという厚さがどのような要因で決まるのか、海洋地殻ができる過程もよく分かっていません。オマーン・オフィオライトでは、海洋地殻とマンツルを構成する岩石がはっきりと分かれ境界をつくっている地層が露出しています。ただし風化した岩石では、海洋地殻ができる過程の情報が半減しています。私たちは陸上掘削を行い、風化を受けていない場所で海洋地殻とマンツルの境界がどうなっているのか詳しく調べる計画です」

中央海嶺には、海底が高速に拡大するタイプと、低速に拡大するタイプがある。それぞれのタイプで、マンツルと海洋地殻の境界の構造はかなり異なることが、海底調査によって分かり始めてきた。

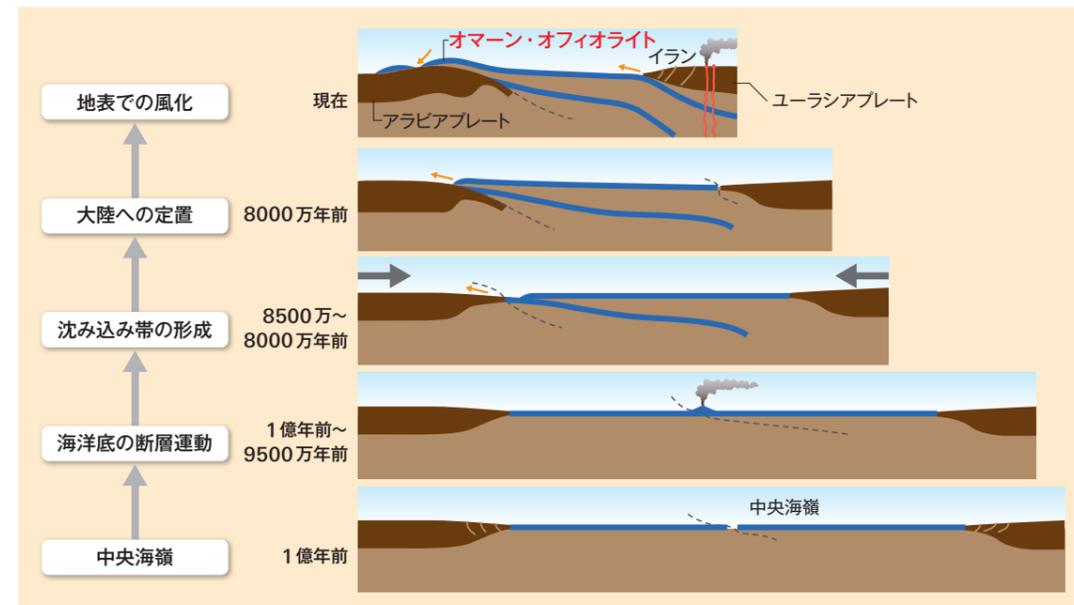
「たとえば低速拡大する中央海嶺でできたマンツルと海洋地殻の境界には、マンツルの岩石と水が反応してできる蛇紋岩の層があると推定している研究者もいます。ただし、そのような海域でも、モホ面は6km付近に現れることは大きな謎です。オマーン・オフィオライトは高速拡大する中央海嶺でできる海洋プレートの典型だと考えられています。陸上掘削により、海洋地殻とマンツルの境界が本当にモホ面と対応するのか、海洋地殻はどのようにできるのかを探っていきたいと思います」

「私は、海洋プレートが沈み込む仕組みについても研究を進めてきました」と高澤教授は続ける。「た

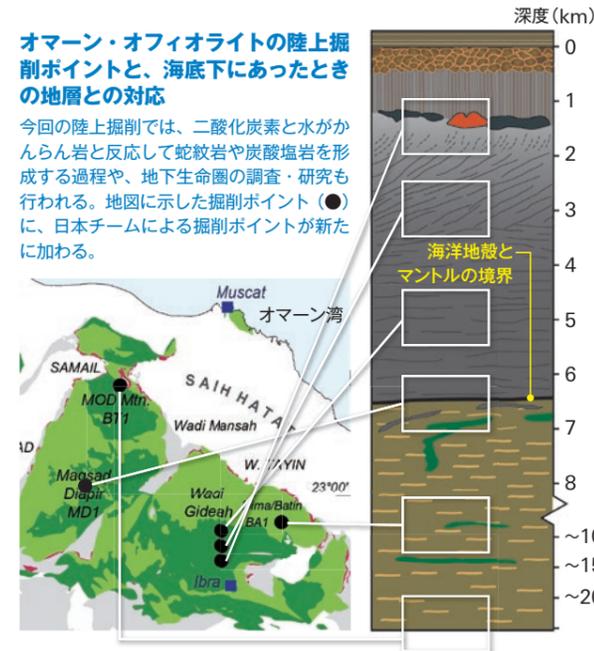
例えば、約5000万年前にフィリピン海プレートの下に太平洋プレートが沈み込むことで伊豆・小笠原・マリアナ海溝ができました。最初にどのような仕組みで、海洋プレートがもう一方のプレートの下に沈み込むのかよく分かっていません。オマーン・オフィオライトには、沈み込んだ海洋プレートが陸上に乗り上げた場所もあります。そこも陸上掘削で詳しく調べる計画です」

オマーン・オフィオライトの陸上掘削により、海洋地殻・海洋プレートの形成過程や沈み込みのメカニズムに関する理解が大きく進展すると期待される。「ただし8000万年前に陸上に乗り上げたオマーン・オフィオライトと、現在、海底下にある海洋プレートには違いがあるはずですが、どこが違いどこは同じか、いままでは仮説を立てて推論するしかありませんでした。モホ面を貫通してマンツルまで掘削しなければ、プレートテクトニクスや海洋地殻・海洋プレートの理解は、いつまでも仮説の上に積み重ねた議論しかできないのです」

早ければ2019年に史上初めてモホ面を貫通してマンツルまで掘削する計画が提案されている――



オマーン・オフィオライトの形成史 出典：Nicolas (1989)



陸上に露出している地層

# 2019年、小笠原海溝で 史上初めてマントルへ

取材協力 道林克禎 静岡大学理学部地球科学科 教授

大陸や海洋の地殻の下、深さ約2,900kmまでマントルが続く。半径約6,400kmの地球の体積の8割はマントルだ。しかし、人類はいまだにマントルにある岩石を手にしたことがない。

厚さ約6kmの海洋地殻を貫通してマントルまで到達することは、モホ面に孔（ホール）を開けるため「モホール計画」と呼ばれている。「ちきゅう」は10年以内にモホール計画を開始することを目指している。「私はその前に、小笠原海溝の斜面を掘削してモホ面を貫通してマントルに達する“前弧モホール計画”を提案しています」と道林克禎 教授はいう。

道林教授は過去10年にわたり、JAMSTECの有人潜水調査船「しんかい6500」などに乗り込み、伊豆・小笠原・マリアナ海溝の海底調査を続けてきた。「2014年には、『ジョイデス・レゾリューション』による国際深海科学掘削計画（IODP）第352次研究航海に参加しました。それは小笠原海溝の水深4,780mと3,100mの2地点で、海底下1,000mまで掘削するプロジェクトでした。それらの調査により、小笠原海溝の水深7,000m付近の斜面の奥にはマントルがあることを、私は確信しました。そこを100mも掘れば、変質していないマントルの岩石を史上初めて手にすることができるはずです」

「水深7,000mにマントルがあるならば、水深6,500m付近の斜面の奥には地殻とマントルの境界があるはずです」と道林教授は続ける。「そこを貫通して試料を採取するとともに、掘削孔に密度や弾性波速度や帯磁率などを計測する観測機器を設置したいですね。そして、掘削孔の孔内検層によって得られる知見と、オマーン・オフィオライトの陸上掘削による研究成果を比較することで、地殻とマントルの境界に関する理解が大きく進展するはず。地震波の観測で見られるモホ面と、地殻・マントル境界との関係も明らかになるでしょう。掘削情報科学の大きな役割は、地震波による情報と岩石の種類や物性などの情報を対応させること、すなわち波と物質を結び付けることです」

水深7,500~8,000mの掘削も重要だと道林教授は指摘する。「そこにあるマントルの岩石は、水深7,000mのものとは性質が異なると予想されるか

らです。ぜひ掘削する前に、水深7,500~8,000mの海底調査も行いたいと思います。そのために、JAMSTECの無人探査機『かいこう』の最大潜航深度を、現在の7,000mから1万1000mにする改修を急いでいただきたいですね」

前弧モホール計画を実施すれば、モホール計画を実施する必要はなくなるのだろうか。「前弧モホール計画で到達するマントルは、島弧と沈み込んだプレートに挟まれたくさび形（ウェッジ）の領域“マントル・ウェッジ”です。そこを掘削調査することで、プレートの沈み込みに伴いマントルでは何が起きているのか重要な情報が得られます。ただし、典型的なマントルとはいえません。地球表面の7割を占める海洋の典型的な海洋地殻を貫通して、マントルに到達するモホール計画の意義は失われません」

オマーン・オフィオライトをはじめ陸上でもマントル由来のかんらん岩を入手することができる。それでもマントル掘削が必要なのか。「陸上で入手できるかんらん岩のほとんどは、マントル・ウェッジ由来である可能性がある、私は推定しています。マントル・ウェッジという特殊な領域の岩石から、私たちはマントル全体を理解しようとしていたのかもしれない。その意味で、典型的なマントルの岩石を採取するモホール計画は、以前にも増して重

要だと考えています」

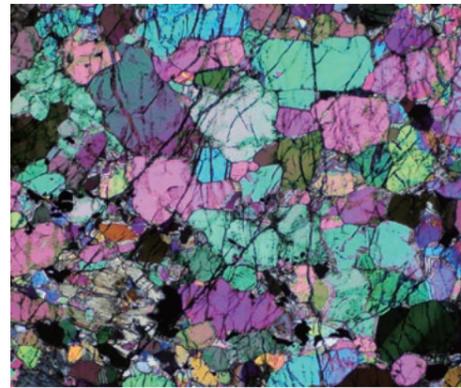
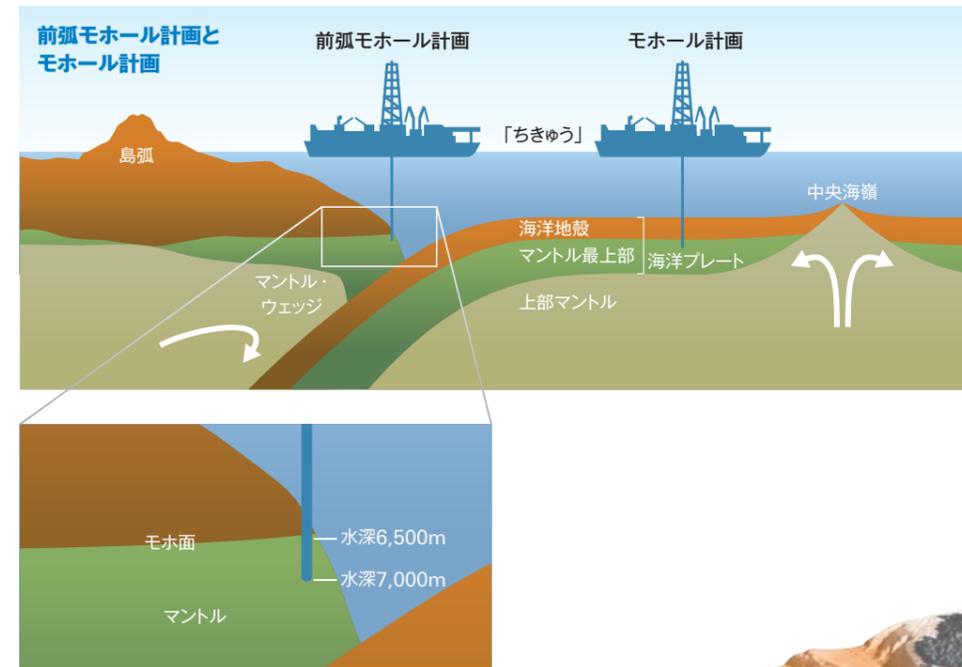
両計画とも、約2,900kmの厚さがあるマントルの最上部に到達するにすぎない。そこからマントル全体を理解することはできるのだろうか。「マントルでは炭素や水などの物質が大循環していると考えられています。最上部の岩石を採取することは、その大循環の一部分を切り取ることになり、マントル全体を理解する重要な情報が得られます。最近、大循環が起きているマントルには、いろいろな状態の岩石が混じっていて不均一であることが分かってきています。将来、モホール計画は、1地点だけでなく複数の地点で実施する必要があるでしょう。モホール計画は、火星探査を進める惑星科学者に

も魅力的な計画です。火星の主成分も、地球と同じかんらん岩だと考えられているからです」

モホール計画は惑星科学にも大きく貢献し、地球の本質を捉える上で欠かせない情報をもたらすと期待されているのだ。「前弧モホール計画やモホール計画の成果は、千年後の教科書にも残るはず」

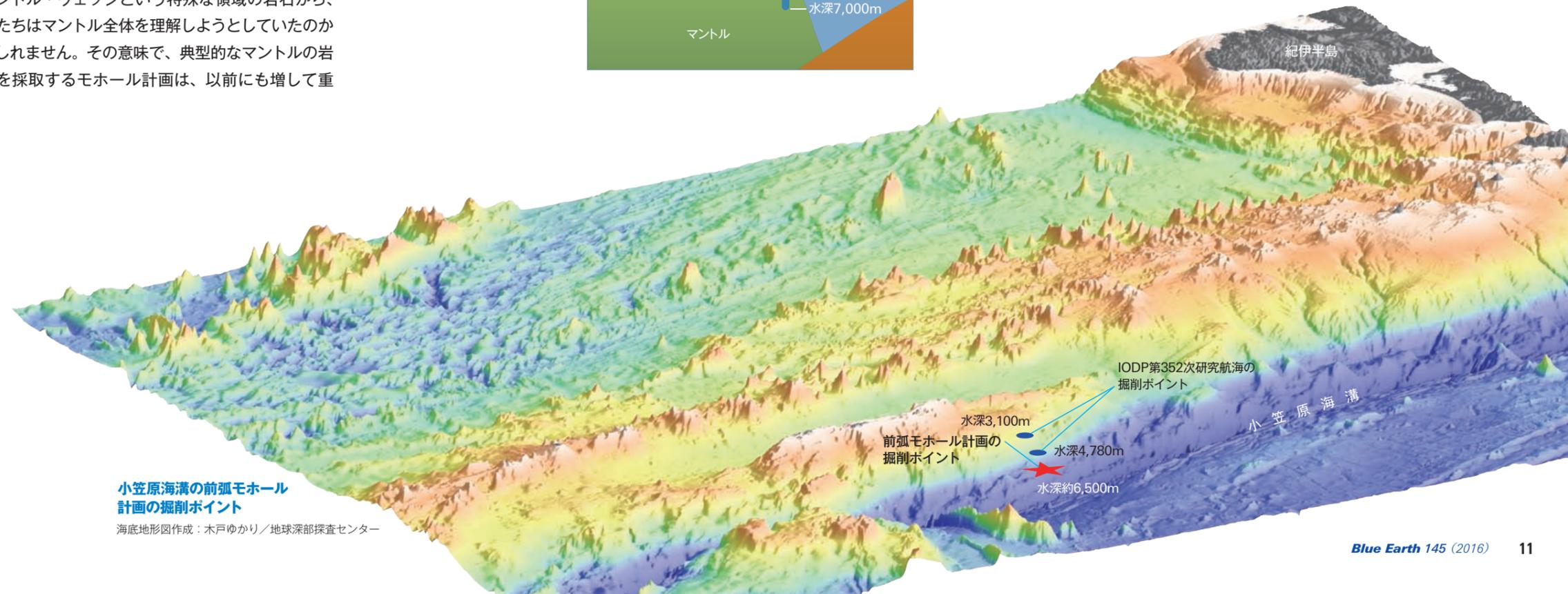
前弧モホール計画はいつごろ実施されるのか。「2019年1~3月に『ちきゅう』はオーストラリア沖で掘削を行う計画です。その帰路に前弧モホール計画を実施することを私は熱望しています」

「ちきゅう」がオーストラリア沖で行う掘削調査の目的は、水没した第7大陸の謎を解くことだ――



マリアナ海溝水深6,000m付近のかんらん岩の組織

「しんかい6500」第1,234回潜航によって採取されたもの。偏光顕微鏡で観察される最も色彩が鮮やかな鉱物がかんらん石である。



小笠原海溝の前弧モホール計画の掘削ポイント

海底地形図作成：木戸ゆかり／地球深部探査センター

# 水没した第7大陸の謎を解く

ロードハウライズ掘削

取材協力 齋藤実篤 ODS 堆積盆掘削研究グループ グループリーダー

「ここ10年ほどの研究から、オーストラリア東方沖で、広大な大陸が海に沈んでいることが分かってきました」と齋藤実篤さんは紹介する。大陸と海洋では地殻の厚さと構成する岩石の種類が異なる。海洋地殻は厚さ6kmほどで玄武岩などの重い岩石から、大陸地殻は厚さ30~50kmで安山岩や花こう岩などの軽い岩石から成る。ニュージーランドの研究者を中心とする研究グループによる海底調査により、広大な面積を持つ大陸が水没していることが分かってきた。その面積は世界6位のオーストラリア大陸よりは狭いが、世界最大の島であるグリーンランドよりも広く、「ジーランディア」と呼ばれている。第7大陸は、なぜ水没したのか？

ジーランディアは、8000万年前ごろに Gondwana 大陸の東の縁から分裂したらしい。Gondwana 大陸は現在のアフリカや南アメリカ、南極、オーストラリアなどが集まっていた超大陸だ。「ジーランディア

アはどのような要因で超大陸から分裂したのか、そしてなぜ水没したのか、その2つが大きな謎です」

ジーランディアは、細長い大陸の断片がたくさん集まってできていることが分かってきた。その断片を「コンチネンタル・リボン」と呼ぶ。「日本列島もユーラシア大陸から分裂したリボンの集合体です。日本海の海底には大和堆という高まりがありますが、それは水没したリボンと見なすことができます。ただし、ジーランディアの存在が明らかになるまで、科学者の間でも水没したリボンは注目されてきませんでした」

なぜ、そしてどのようにして、ジーランディアは水没したのか。「これまでの地震波などを使った海底の調査により、ジーランディアの地殻表面は多くの断層によって細かく分断されていることが分かっています。2016年3~5月、私たちが深海調査研究船『かいらい』で行った調査によると、ジーランディアは大陸地殻としては薄い20kmほどの厚さであることも分かってきました。ぎっしりと本が並べられた本棚に隙間ができると、本全体が傾きます。同じようにリボンの集合体が傾きながら厚さが薄くなり、ジーランディアは水没したというのが仮説の1つです」

では、なぜジーランディアは超大陸から分裂したのか。分裂を開始する前の約1億年前、分裂が起きた場所には、マンツルの底から湧き上がる上昇流「マンツルブルーム」に伴う火成活動の跡が見ついている。また、分裂が起きた場所の東方沖には海溝があったと推定されている。「分裂した原因には主に2つの仮説があります。1つはマンツルブルームの上昇です。もう1つは、プレートの沈む角度が深くなったり海溝の位置が大陸から遠ざかったりすることで大陸の縁が引き伸ばされて分裂したというロールバック説です」

どちらの説が有力か、齋藤さんたちは「ちきゅう」による掘削で明らかにしようとしている。掘削地点はジーランディア北部のロードハウライズだ。「そこは典型的な水没リボンです。オーストラリア政府がこの掘削プロジェクトへの資金提供を検討しており、早ければ2019年前半に掘削が可能となります。海底下2~3kmの深部掘削により、大陸地殻を貫通して上昇してきたマグマ由来の岩石を採

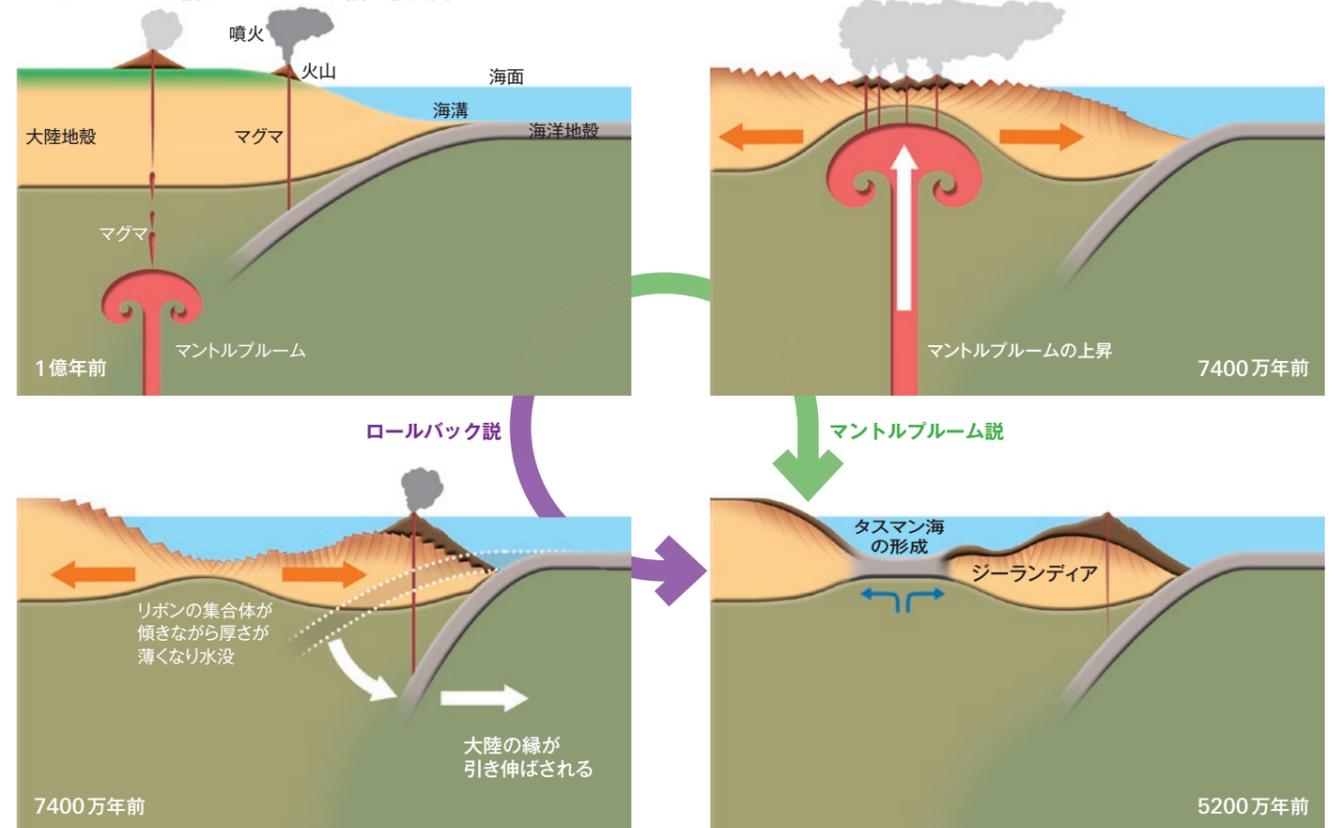
ジーランディアと、ロードハウライズの掘削予定地点



ジーランディアの超大陸からの分裂過程



マンツルブルーム説とロールバック説の模式図



超大陸から分裂した原因には主に2つの仮説がある。1つはマンツルブルームの上昇による「マンツルブルーム説」(上右)。もう1つは、プレートの沈む角度が深くなったり海溝の位置が大陸から遠ざかったりすることで大陸の縁が引き伸ばされて分裂したという「ロールバック説」である(下左)。いずれの説でも、細長い大陸の断片であるリボンの集合体が傾きながら厚さが薄くなり、ジーランディアは水没したと考えられている。

取して分析することで、マンツルブルームに伴うマグマ由来か、あるいはプレートの沈み込みに伴うマグマ由来の岩石かを判別して、どちらの説の仕組みが強く働いてジーランディアが分裂したのかを明らかにすることができるでしょう。さらに、分裂の前後に堆積した地層を詳しく分析することで、いつごろどのような環境で水没したのかが分かります。ジーランディアはどれくらいの速さで水没したのかも推定できるはずですよ」

ジーランディアの分裂が始まる約1億年前、現

在の大西洋などでは海底付近が無酸素状態になり、生物が大量絶滅したことが知られている。「それは海洋無酸素事変と呼ばれ、地球全体の海洋で起きた可能性があります。ただし、特に太平洋南半球の試料が不足しています。ロードハウライズの掘削により海洋無酸素事変の痕跡も調べます」

近年の海洋掘削により、海底下にも生命圏が広がっていることが明らかになっている。ジーランディアには、水没した第7大陸で命をつないできた生命圏が広がっているかもしれない――

# 海底下生命圏の温度限界を探る

## IODP T-リミットプロジェクト

取材協力 稲垣史生 JAMSTEC 高知コア研究所 研究所長代理 / ODS 研究開発センター長代理

かつて、海底下の深部は生命が存在しない死の世界だと考えられていた。「少なくとも1980年代まで、海底下10m以深にも生命圏があると主張した研究者は誰一人いなかったようです」と稲垣史生さんは紹介する。その常識は、1990年代以降の海洋掘削によって覆された。現在では、海水中の生物量（バイオマス）に匹敵する規模の海底下生命圏が広がっていることが明らかになってきた。

海底下のどの深度まで生命圏は広がっているのか。稲垣さんたちは2012年、IODP第337次研究航海「下北八戸沖石炭層生命圏掘削」を実施し、海底下2,466mにも微生物がいることを確かめた。

それ以前に確かめられた海底下生命圏の深度記録を500m以上、上回るものだった。

下北八戸沖の石炭層は、かつて陸上の森林や湿地だった場所が約2000万年前に海底下に沈み形成された。そこで発見された微生物は陸上起源であることが分かった。

では、約1億年前の白亜紀に水没した大陸の一部ロードハウライズには、当時の環境に由来する微生物が生き延びているのか。稲垣さんたちはその掘削航海に参加して調査する計画だ。「海底下生命圏における生命進化は未知です。下北八戸沖石炭層の微生物は、2000万年間にほとんど細胞分裂を

せず、進化もほとんどしていない可能性があります。1億年前に海底下に閉じ込められた微生物も世代交代をほとんどしていない、あるいは休眠状態で、まったく進化していない可能性があります。それら海底下で生き延びた微生物と陸上に残った子孫の遺伝情報や環境などを比較して、進化を促進あるいは抑制する環境要因を明らかにしたいと思います」

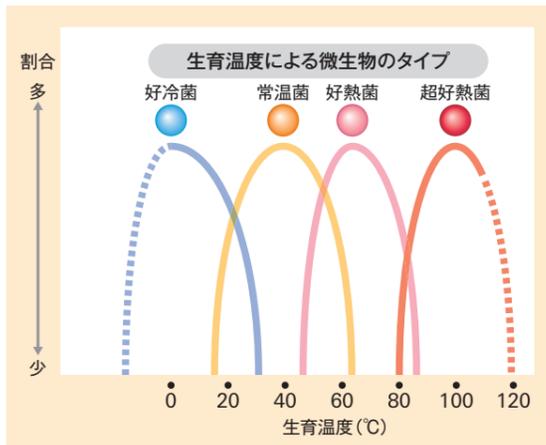
稲垣さんたちはロードハウライズ掘削の前に、IODP第370次研究航海「室戸沖限界生命圏掘削調査（T-リミット）」を実施している（2016年9～11月）。「海底下2,466mの下北八戸沖石炭層は栄養源が豊富で温度も60℃と好条件でしたが、微生物は1cm立方あたり100個以下と予想外に小さな生命圏でした。それは、生命活動に必要な水に乏しい、極めて乾燥した環境だからだと考えています。では、栄養分も水分もある海底下の堆積物環境では、どれくらいの温度まで生命圏は存在し得るのか、沈み込み帯先端部で海底下生命圏の温度限界（T-リ

ミット）を調べます」

室戸沖のT-リミットの掘削ポイントの海底付近は2～3℃、海底下1,200mは130℃以上だ。そのどこかに生命圏の温度限界があると考えられる。海底で熱水を噴き出す熱水噴出孔では、120℃以上で増殖する超好熱菌が見つかった。

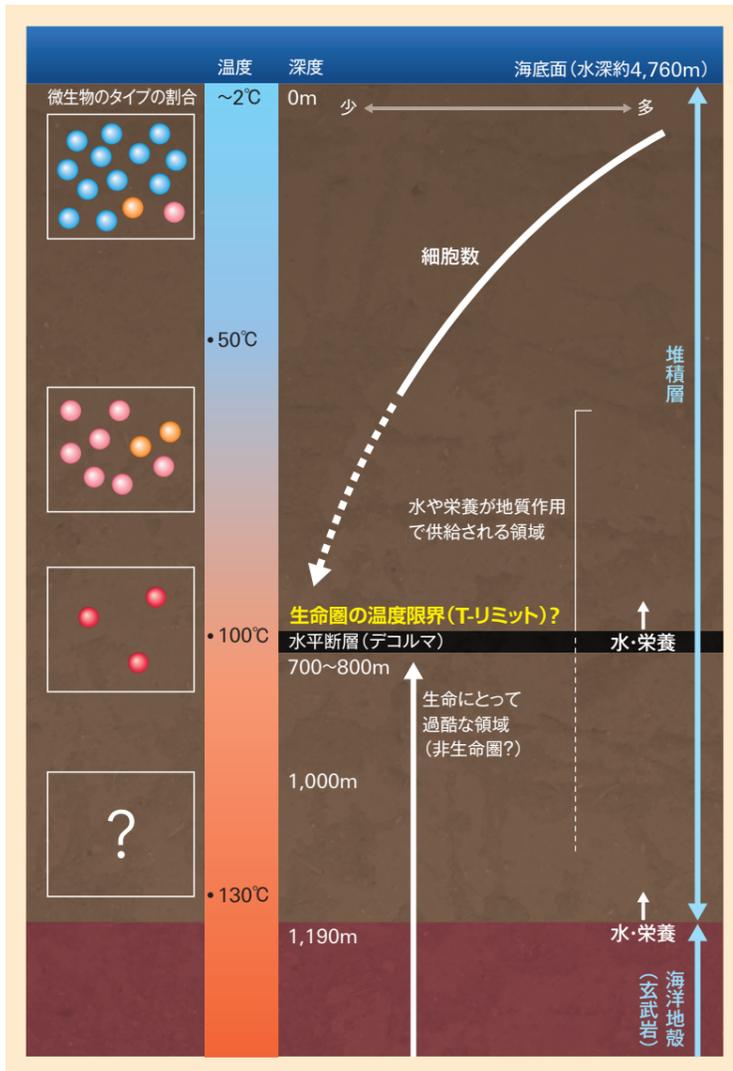
「室戸沖の温度限界付近にはどのような微生物がいるのか。もし熱水噴出孔にいるものと同種の超好熱菌が見つければ、どこからやって来たかが大きな謎になります。熱水噴出孔のものとはまったく異なる、未知の海底下微生物が見つかる可能性もありますし、まったく生命のいない非生命圏にたどり着くかもしれません」

今後、海洋掘削による生命圏の研究は、どのようなフロンティアを目指すのか。「これまでは、海洋地殻の上の堆積層の生命圏を調べてきました。次のフロンティアは、海洋地殻の亀裂に広がる岩石生命圏です。さらに海洋地殻の下、マントルで生命の起源に迫りたいと思います」



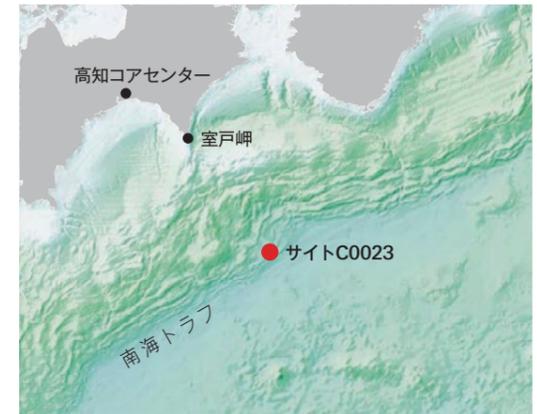
### T-リミット掘削ポイント (サイトC0023) 近傍における海底下生命圏の予想図

室戸沖の南海トラフのプレート沈み込み帯先端部、海底下700～800mには水平断層（デコルマ）がある。深度が深くなるとともに微生物の細胞数（密度）が減っていくとともに、微生物のタイプが入れ替わっていく。そして温度が100℃となる水平断層付近に生命圏の温度限界があると予測される。T-リミットでは、さらに海洋地殻の基盤岩（玄武岩）がある約1,200m（温度130℃以上）まで掘削を行い、コアを採取するとともに孔内温度計を設置する。



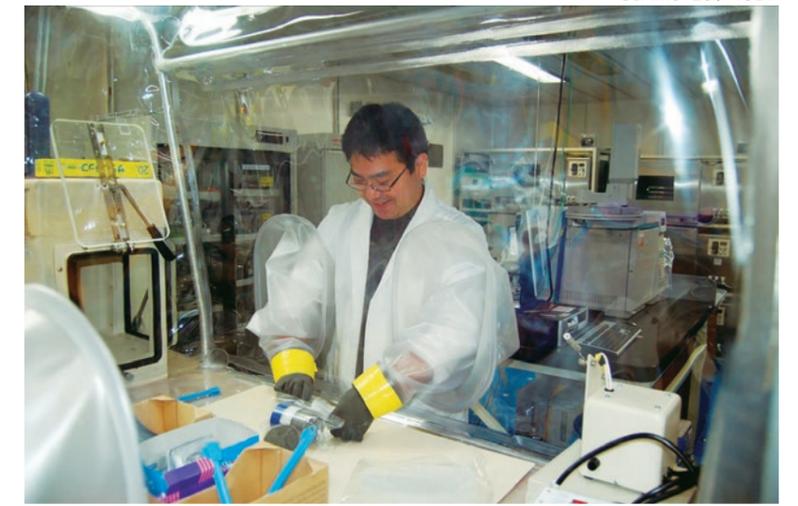
### T-リミットの研究体制

海底下生命圏の探査では、できるだけ早くクリーンな環境でサンプルの処理・分析を開始することが重要である。そのために船上研究チームと陸上研究チームを編成。「ちきゅう」船上でコアの分析を行うとともに、コアの一部を「ちきゅう」から高知コアセンターにヘリコプターで輸送し、スーパークリーンルームなどの分析機器を用いて高精度の最先端地球科学・生命科学を迅速に行う（高知コアセンターは、JAMSTEC高知コア研究所と高知大学海洋コア総合研究センターの共通名称）。



### 「ちきゅう」船上におけるコアの分析

©JAMSTEC / IODP



高知コアセンターのスーパークリーンルームにおけるT-リミットのコアの分析

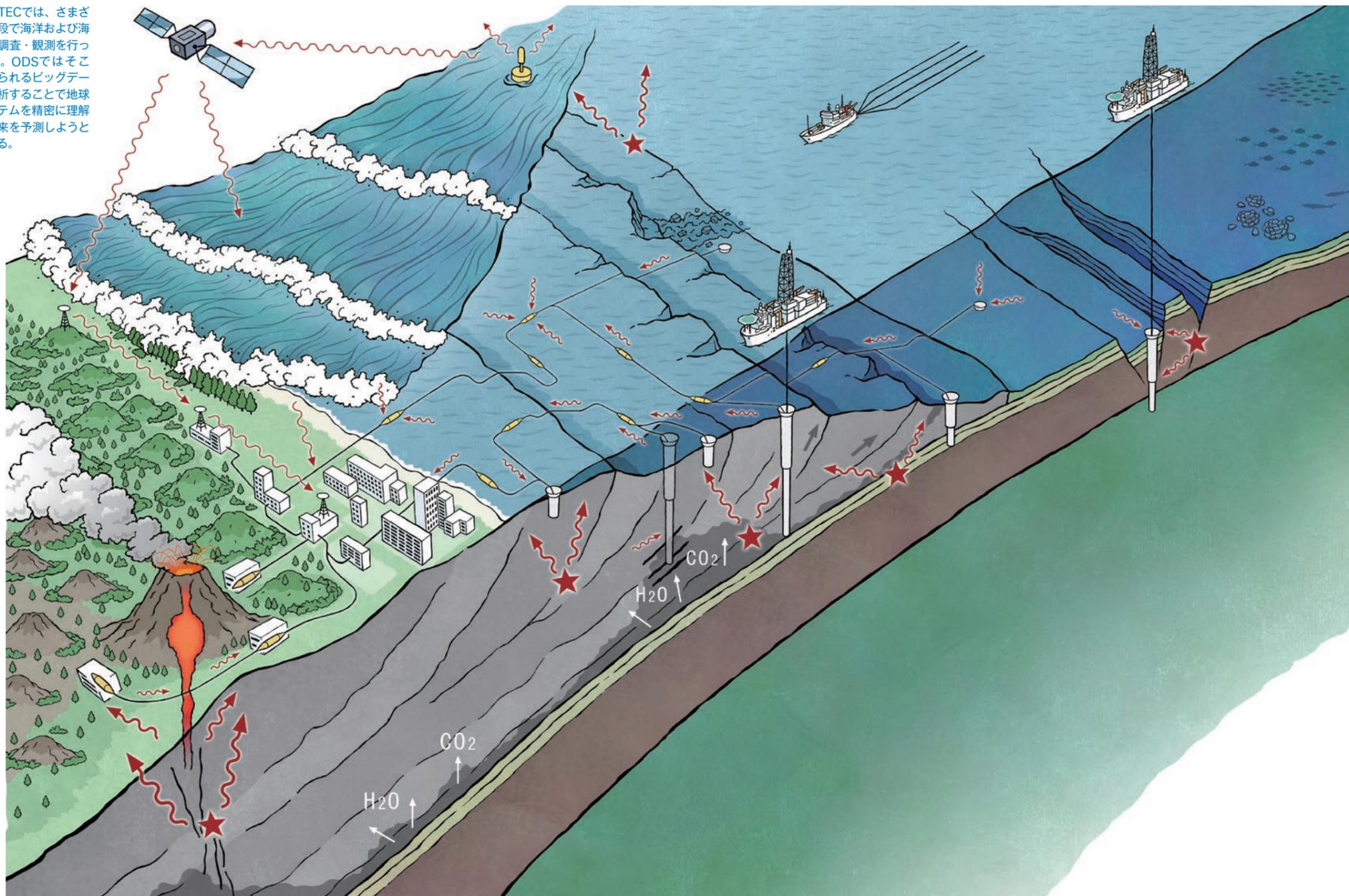
# 掘削情報科学を発展させ 地学を社会に役立てる

取材協力 稲垣史生 / 山田泰広

米国が深海掘削船「グロマー・チャレンジャー」により深海掘削計画（DSDP）を1968年に開始してから、半世紀を迎えようとしている。「この間、さまざまな分野の研究者が海洋掘削に参加し、海底下の情報を記載してきました。これからは、それぞれの分野で記載した情報の関連性を見いだすことが重要です。たとえば、地震による断層の摩擦で

水素などが発生し、それが海底下生命圏の栄養源となっている可能性が指摘されています。海底下生命圏はメタンハイドレートなどの資源形成に重要な役割を果たしています。地震—生命—資源といった、これまで分野ごとに記載されていた情報のリンクを見いだす必要があるのです。そして情報のリンクから地球システムを明らかにして、現在から過

JAMSTECでは、さまざまな手段で海洋および海底下の調査・観測を行っている。ODSではそこから得られるビッグデータを解析することで地球のシステムを精密に理解し、未来を予測しようとしている。



去を推定するだけでなく未来を予測できるようにすること、それにより地震・津波に対する防災や、資源・エネルギー問題など、地球規模の課題や社会的課題の解決に貢献していくことが、掘削科学には求められています」。稲垣史生さんは今後の掘削科学の目標をそう語る。そして、そのような目標を実現するための研究体制を提言する。「JAMSTECでは、さまざまな分野の研究者が多様な手段で海洋および海底下の調査・観測を行っています。地球システムを明らかにするには、掘削分析科学を担当する高知コア研究所と掘削情報科学を進めるODSが強力にタッグを組み、産業界やJAMSTECのさまざまな分野の組織・研究者との連携を促進していく必要があります。それによって、新しい地球未来環境を創造していくことができます」

「特に、マントル掘削は、オールJAMSTECの最強チームで臨む必要があります」と稲垣さん。「マントルへの到達が目的では本末転倒です。何のためのマントル掘削か、何を知りたいのかが重要です。そのための議論がまだ不足しています。高知コア研究所とODSには、マントル掘削によって解明する科学目標を明確に打ち出していく責任があります。私はマントルの岩石と海水が相互作用することでどのような化学反応が起きるのか、マントル掘削孔で実験してみたいと考えています。約40億年前の原始地球において生命の材料がつけられた化学進化の素過程を知るため、重要な手掛かりが得られるはずですよ」

ODSを率いる山田泰広さんは、掘削情報科学を発展させて、地学が社会に役立つことを示していきたいと語る。「私も大学の地学科の学生のころは、地学がどのように社会に役立っているのかわかりませんでした。地学が産業界でとても役立っていることを実感したのは、石油企業に入ってからです」

山田さんは、産業界との連携を進めようとしている。「石油会社が油田でモニターしているデータには、石油を抜き取る過程で油田の地層に何が起きているのかが記録されています。しかしそのデータの分析は手付かずのままです。それを掘削情報科学の手法で行うことで、油田から石油を効率的に抜き取る手法、さらにはメタンハイドレートから天然ガスを取り出す手法、あるいは温室効果ガスである二酸化炭素を地下に安全に貯蔵する手法などを提案できるはずですよ。油田のデータは私たちにとっても貴重です。普通、自然に起きる海底下の現象は、結果は分かりますが、その原因を特定することは困難です。一方、油田の場合は、石油を抜き取ったという原因も、その結果として起きる地層の変動も分かります。油田のデータを分析することで、地層で自然に起きる現象を理解するためのヒントを得ることができます」

素材産業との連携も必要だ、と山田さんは続ける。「超高温・高圧のマントル掘削を実現するには、新しい材料の開発が必要だからです。そしてマントル掘削で大きな科学成果を上げるには、掘削過程や掘削孔からビッグデータを自動的に取得できるようにする必要があります。JAMSTEC内外の情報科学の研究者や情報産業と連携して、ビッグデータ取得や解析の技術を開発していきたいと思えます。開発した技術や知見は、ほかの分野のサイエンスや産業界にも役立つはずですよ」

ODSでは、さまざまな研究分野や産業界との連携を進めて掘削情報科学を確立し、教科書を書き換えるとともに、地学が社会に役立つことを実証しようとしている。

BE

巣の直径は1cm程度。透明な泡に見えるが、糸を張って空気をため込む構造になっている。巣は半球状で、ミズグモの頭胸部は水中に出ている。クモは腹部で呼吸するため、その部分が泡のなかにあれば呼吸ができる。腹部は細かい毛で覆われており、毛の間に空気の層を付けて潜り、その空気を巣のなかに送り込む。



繁殖期に巣のなかにつくられる卵囊。卵を産み付ける卵囊はたくさんの糸が使われ、白い繭のようにも見える。子は生まれてから半年から1年で繁殖期を迎える。共食いをすることはほとんどなく、親と子を同じ水槽に入れても大丈夫だ。



腹部に付いた空気の層は、巣にたどり着くまでの水中ポンペの役割も果たす。

井の頭自然文化園の水生物館でのミズグモの展示は、近くにある三鷹の森ジブリ美術館によるミズグモを題材にした映画上映がきっかけだった。2006年に共同企画として展示を始めて以来、展示を続けている。

ミズグモは、水中で糸を使って空気の泡の巣をつくる、ちょっと変わった習性を持つ。半球状の空気がたまったらドームから、頭胸部だけを水中に出し、逆立ちの状態ですと獲物を待ち続ける。眼はほとんど見えず、水を伝えるわずかな振動を敏感に感じ取ることで、餌にありつくのだ。生きているものしか食べられない。しかも動きは遅いので、飼育にはミズグモよりさらに遅い生きものを用意しなければならない。これがなかなか大変だ。いまは水生物館中の水槽から必死でミズグモを探し出し、ミズグモに与えている。

水中で暮らしているにもかかわらず、ミズグモはうまく泳げない。水に潜るときは、糸を出しながら水草を伝って歩く。水中だけで暮らすこともできない。ときどきは水上へ出て、身体を十分に乾かすというメンテナンスをしないと、死んでしまう。何というか、とにかく弱いクモなのだ。

繁殖期には、<sup>らんぷう</sup>卵囊と呼ばれる卵を保護するための“ゆりかご”を巣のなかにつくる。卵囊にはより多くの糸が使われ、白っぽく見える。普段の巣をつくるのでさえ、ミズグモにとっては大変な負担だ。さらに大量の糸が必要な卵囊をつくることはかなりの重労働になる。しかも普段の巣は半球状だが、卵囊は球状だ。

卵囊には卵が50~100個ほど産み付けられ、その後も雌が世話をし続ける。腹部にびっしりと生えた細かい毛の間に空気を付けて運び、卵囊のなかに新鮮な空気を送り込む。動きのゆっくりとしたミズグモが、何度も何度も空気を運んでくる。通常、雌は1回卵を産み、子が巣立った後に命尽きる。生まれた子どもたちは卵囊のなかに2回ほど脱皮し、1mmほどでふ化した子たちが2mmほどに成長して、巣立ちだ。

子たちも、誰に教えられることもなく小さな泡の巣をつくる。大人たちの巣は直径が1cmほどもあるが、子たちの巣はまだ数mmだ。水面近くに子たちのつくった無数の泡が並ぶ。まるで水草に魚が吐いた呼吸が引っ掛かっているかのようだ。その心もとない小さな泡の一つ一つに、命が陣取っている。BE

取材協力：木船崇司・渡辺良平／井の頭自然文化園水生物館飼育展示係  
写真提供：(公財) 東京動物園協会

◆ Information: 井の頭自然文化園  
〒180-0005 東京都武蔵野市御殿山1-17-6  
TEL 0422-46-1100

# GODACは沖縄、そして世界とつながっている

沖縄北部の東側、名護市豊原付近の国道329号線を走っていると、「見学無料」の看板が目に入ってくる。この日は「うみの工作教室 開催中」と書かれたのぼりもはためいている。そこが海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の国際海洋環境情報センター (GODAC) だ。

GODACは2001年11月、2つの使命を帯びてスタートした。2つの使命とは、JAMSTECの成果を世界に発信すること、海洋科学技術を人々にもっと身近に感じて知っていただくことだ。

GODACは今年15周年を迎える。GODACの活動と、その裏側を紹介しよう。

取材協力

地球情報基盤センター  
国際海洋環境情報センター 管理課  
内山正康 課長  
比嘉直人 事務副主任

地球情報技術部  
データ情報化技術グループ  
伊禮一宏 技術主任

(株) マリン・ワーク・ジャパン  
海洋地球科学部 海洋情報システム室  
海洋情報普及課  
澤野健三郎 総括主任

海洋情報技術課  
荻堂盛誉 総括主任  
松田尚子 主任

スタッフのアイデアから生まれた、深海をイメージした部屋での工作教室。写真は2016年春休みの様子。中央の熱水噴出孔の生物群集の模型はスタッフの手づくり。「絵が得意だったり、大工仕事が得意だったり、GODACには多彩なスタッフがそろっているので、アイデアをどんどんかたちにしていきます」と内山さん。



工作教室「さんご風鈴」の準備をするスタッフ。さんごのかけらは、スタッフが海岸から拾ってくる。



好きなかたちや大きさのさんごのかけらを選び、ひもで結び、棒につるしていく。さんご風鈴、完成!



年4回、沖縄県内で「GODACセミナー」を開催。最新の海洋や地球環境について、研究者が紹介する。



海の生き物のイラストをプリントしたシールは、子どもたちのお気に入り。イベントでクイズなどに参加すると、もらえるよ。



GODACがある沖縄の海について、もっと子どもたちに知ってもらいたい! そんなスタッフの説明に子どもたちも興味津々。



大人気の水圧実験。深海では、周りから大きな力がぎゅーとかかって、カップラーメンの入れ物が小さくなる。みんなも、ほっぺをぎゅー。



JAMSTECの海洋地球研究船「みらい」による北極航海の紹介。「めくったり、触ったり。楽しんでもらえる展示を心掛けています」と澤野さん。



「ちきゅう」の展示の前で。右から内山さん、比嘉さん、澤野さん。



沖縄県名護市の小学校とJAMSTECむつ研究所がある青森県むつ市の小学校をテレビ会議システムで結んだ合同学習。青森から届いた雪に感激。

## ●深海をイメージした暗い会場で

夏休み中とはいえ平日にもかかわらず、館内は開館直後から親子連れを中心にたくさんの人であふれていた。「夏休みで3日間だけのスペシャル工作教室の日なんです。午前中で限定の100人を超えてしまうかも……」と、イベントの企画などを担当している比嘉直人さんは目を細める。

会場の入り口の暗幕をくぐると、工作教室のイメージに反して、照明を落とした薄暗い空間が広がっていた。「皆さん、驚きの声を上げます」というのは、展示の企画や解説を担当している澤野健三郎さんだ。「JAMSTECといえば深海ですからね。壁面には海中の映像を投影して、雰囲気盛り上げています。明るい部屋より子どもたちが工作に集中するという思わぬ効果もあるんですよ」。この日のスペシャル工作は、さんご風鈴。会場には、カランカランと涼しげな音色と、子どもたちの笑い声があふれる。

## ●楽しんでもらえる自信がある!

ここ数年の年間来館者は1万5000~1万8000人。「いまでこそ、GODACは海の情報を知ることができる楽しい場所として、沖縄の皆さんに認識していただいています。しかし最初から順調だったわけではありません」と内山正康さん。内山さんは理解増進業務を取りまとめている。「沖縄県は海に囲まれています。にもかかわらず、海洋科学に特化した情報を一般向けに紹介する施設はありませんでした。設立からしばらくは、GODACって何? JAMSTECって何? という反応だったと聞いています」

「来てもらえば、必ず楽しんでもらえる。そして、また来たいと思ってもらえる。その自信はあります。だからこそ、まずはGODACを知ってもらうことが必要だと考え、積極的に外へ出ていくという戦略を取りました」と比嘉さん。イベントにブースを出したり、ラジオに出演させてもらったり、学校で出前授業をしたり。「ようやく、その努力が実ってきたと実感しています」

澤野さんも、「GODACに来れば、楽しいのはもちろん、来るたびに海についての新しい発見があるはず」という。スタッフみんなアイデアを出し合い、試行錯誤しながら新しいことにも取り組んでいる。その1つが見学コースの設定だ。有人潜水調査船「しんかい6500」、地震、サンゴ礁と環境問題などのコースがあり、来館者の選んだコースに沿ってスタッフが解説する。以前は、「ご自由にどうぞ。スタッフに声を掛けていただければ説明します」と案内していた。「皆さん、遠慮して声を掛けてくれないのです。そこで、きっかけづくりのために、コースを設定しました。コースといっても実際は、お客さんと話しながら興味のある展示を案内するので、お客さんによってもスタッフによっても内容は変わってきます。展示物も随時更新しているので、何度でも楽しんでいただけたと思います」と澤野さん。

展示やイベントでは、常に「沖縄の海」を意識しているという。澤野さんは、「沖縄の人、沖縄を訪れた人に、沖縄の海をもっと身近に感じていただき、もっと知っていただく。それでこそ、GODACが沖縄にある意味があります」という。

## ●GODACに来た子どもたちから未来の科学者を

GODACではキャリア教育にも力を入れている。「GODACをきっかけに、海洋に関わる人材が沖縄からどんどん出てきてほしい」



GODAC外観



映像をシーンごとに切り出し、何が写っているかコメント付けをしているところ。入力はアイコンを選ぶだけでいい。

## J-EDIの使い方

### ●深海映像・画像アーカイブ(J-EDI) http://www.godac.jamstec.go.jp/jedi/



サムネイルをクリックすると映像や画像を見ることができ、関連した情報も確認できる。



キーワードやアイコン、潜水船名、海域などさまざまな条件で探すことができる。



深海にすむ生物や  
深海底の映像・画像  
を見たい

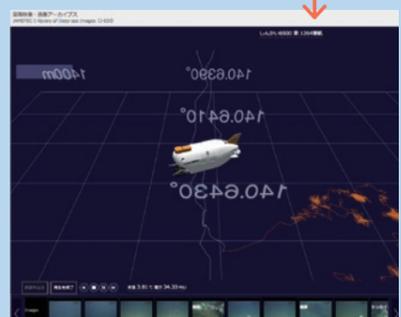
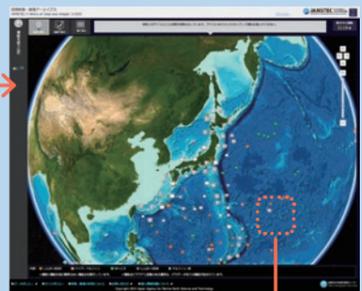
潜航調査ごとの  
情報や映像・画像  
を見たい

スタッフのお気に入り  
深海映像を見たい



珍しい深海環境や面白い生物の映像をピックアップして紹介文を付けて掲載している。

地図や一覧で見たい潜航調査をクリックすると、その潜航調査で撮影した映像・画像を見ることができる。見たい潜航調査をさまざまな条件で探すこともできる。



見たい潜航調査の画面で「3D航跡」と「航跡を辿る」を選ぶと、三次元で表示された航跡上を潜水船が自動でたどり、潜航調査を追体験できる。

### 萩堂さんの おすすめ



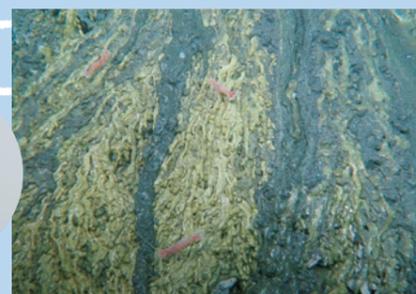
シダアンコウ科の一種。「頭から長さおのようなのを垂らして、海底にいる生き物をおびき寄せて捕らえます。よく見ると、腹を上に向けて上下逆さまになっているのが分かるでしょう。こんな不思議な生物は見たことがありません」

### 松田さんの おすすめ



オオグチボヤ。「まるで大きな口を開けて笑っているみたい。浅海に生息するホヤとはまったく違う姿に驚きました」

### 伊禮さんの おすすめ



「水深約450mの海底から湧き出た液体が海底に沿って流れる様子を捉えた映像です。まるで山の斜面を流れているようで、地上で撮影されているのではないかと錯覚してしまいます」

と内山さん。職場体験学習やインターンシップを積極的に受け入れている。

「私たちは“GODACに来た子どもたちから未来の科学者を”を合言葉にしてきました。GODACができたときまだ小さかった子が、そろそろ社会に出る年齢になります。進路が気になっていたのですが、とてもうれしい話を聞きました」と澤野さん。「“子どものときGODACに来て海洋に関わる仕事がしたいと思うようになり、国立沖縄工業高等専門学校に進みました”という生徒がいたのです。GODACの取り組みが実を結びつつある。こんなにうれしいことはありません」

GODACは「ALLやんばる まなびのまちプロジェクト」にも参画している。沖縄県北部に関連する行政・教育・研究機関などが協力して、県民に広く学びの場を届けていこうという活動だ。活動の中心を担っている比嘉さんは、「それぞれが得意分野を持ち寄って、単独ではできないことにも協力して取り組んでいます。地域のなかで横のつながりができてきたことも、この15年の成果です」という。

### ●JAMSTECの潜航調査で得られた映像・画像を公開

GODACのもう1つの使命が、JAMSTECの成果を世界に向けて発信することだ。萩堂盛誉さんは、『深海映像・画像アーカイブ J-EDI』では、有人潜水調査船『しんかい2000』の試験潜航が始まった1982年のものから、データを取った研究者が優先的に使用できる公開猶予期間を終えた2014年分まで、有人潜水調査船『しんかい6500』や無人探査機『ハイパードルフィン』『かいこう』などに

よる約5,000潜航で得られた映像・画像を原則すべて公開しています。映像は3万2000時間、画像は130万枚にも上ります。有人潜水船や無人探査機を持つ研究機関は世界にいくつもありますが、撮影日時や場所などの基本的な潜航情報だけでなく、撮影された被写体に応じたコメントをこれだけの膨大な量の映像・画像に付けて公開しているのはJ-EDIだけです」と説明する。

### ●検索表とアイコンでコメント付けをスピードアップ

GODACが世界に誇るJ-EDIはどのようにして誕生したのだろうか。1990年代まで映像・画像はアナログ媒体に記録され、めぼしいシーンだけが研究や広報に使われ、大部分は倉庫に眠っていた。「せっかく得られた貴重な映像・画像なのに、もったいないですよ。アナログ媒体の劣化も問題になっていました。そこでGODACで、映像・画像をデジタル化して整理・保存し、インターネットを通じて公開することになったのです」と萩堂さん。「当初は『深海映像データベース』という名称で、画像も扱っていませんでした。最初から順調だったわけではなく、現在のかたちになるまでには長い道のりがありました」

潜航調査で得られた映像・画像は、まずJAMSTECの横浜研究所に届く。そのデータは、大容量のデータ転送が可能なネットワークを通じてGODACへと送られ、J-EDIで公開する形式に変換される。そして映像をシーンごとに切り出し、各シーンや画像にコメントを付けて公開される。特に大変なのは、コメント付けだ。「以前のシステムでは映像や画像を一つ一つ見て、たとえば生物が写って

たら、それが何かを図鑑で調べていました。しかし、私たちは生物の専門家ではないので確信が持てない上に、時間がかかります。また、スペルミスや作業員間でのコメントのばらつきなどの問題もありました。そうしている間にも、新しい潜航調査の映像・画像がたまっていくばかり。途方に暮れました」と伊禮一宏さん。

そこでコメント付け作業の見直しが行われた。「運用でGODAC独自の検索表を導入しました」と萩堂さん。生物の特徴をYesかNoかで選んでいくと大まかな分類ができるもので、専門家に相談しながらつくり上げた。また、管理システムの見直しも並行して行い、それまではキーボードで文字を打ち込んでいたが、アイコンを選択するだけで入力できるようにしたことで、スペルミスもなくなった。さらに、それまで通常再生しかできなかった映像が倍速で再生できるようになり、作業効率が大幅に上がった。同時に公開システムの見直しにも着手。検索機能を分かりやすく、そして充実させた。管理システムと共通のアイコンを使っているのが特徴だ。それが2011年。作業効率が大幅に上がり、2014年にはメインカメラで撮影された全潜航分の映像へのコメント付けが完了した。

### ●2016年4月、J-EDIをリニューアル

公開された映像・画像をさらに利用しやすくするために、さらなる公開システムの見直しに着手。レイアウトや操作性を一新した。ユーザー登録をすれば、オリジナルサイズの画像データをダウンロードできるようにもした。「たくさんの人に見て楽しんでいただけるだけでなく、学校の先生やマスコミの方が映像・画像を利用し

やすいことも意識しました」と松田尚子さん。

J-EDIの楽しみ方を紹介しよう。松田さんは「スタッフのお気に入り深海映像」をすすめる。月1回、各スタッフがいちおしの映像を持ち寄り、そのなかから選ばれたものがJ-EDIのトップページに掲載されている。

「深海映像・画像というと生物の印象が強いかもしれませんが、私のおすすめは地質です」。そう語るのは伊禮さんだ。「映像や画像だけから岩石の種類など専門的な情報を読み取るのは難しいことです。しかし、一般の方が見ても面白い、不思議な地形はたくさんあります。そこで、皆さんにも楽しんでもらえるように、斜面や亀裂、熱水などコメントを付けて公開しています」

萩堂さんのおすすめは「有人潜水調査船の2D航跡・3D航跡」だ。「有人潜水船は同じ姿勢のまま潜航していくというイメージがあるでしょう。実は、潮の流れなどによってクルクル回転しながら潜航していくのです。そうした様子も見ることができます。ほかにもJ-EDIの魅力はたくさんあります。ぜひJ-EDIを使って深海の世界を楽しんでください」

GODACは2016年11月、15周年を迎える。「GODACは40人ほどの小さな事業所ですが、一人一人が、JAMSTECの研究活動や海洋科学の魅力を皆さんに伝えたいという熱い想いを持っています。これからのGODACの活動も楽しみにしててください」と内山さん。—GODACは展示やイベントを通して沖縄の皆さんとつながり、J-EDIなどのデータアーカイブを通じて世界とつながっている。[E]

2016年8月20～27日、三重県で第10回国際地学オリンピック (IESO) が開催された。IESOは、世界の高校生たちが筆記と実技の試験で地学の知識や思考力を競い合い、また国際混合チームによる野外調査などを通して選手同士の交流を深めることを目的としたもので、2007年から毎年行われている。初めての日本開催となった今年は、26の国・地域から100人の選手が参加。日本代表選手は金メダル3個、銀メダル1個と、全員がメダルを獲得した。世界の地学好きの若者が集結したIESOの様子を紹介しよう。

## 国際地学オリンピック 三重県で開催 日本代表選手全員がメダル獲得！

取材協力 NPO法人地学オリンピック日本委員会



美里町柳谷での実技試験。地層に含まれる岩石や化石の種類などについて出題された。手前は笠見さん。

### ●初の日本開催

10回目となる2016年の国際地学オリンピック (IESO 2016) の開催地は、三重県。8月20日に世界26の国・地域から100人の選手と10人のゲスト生徒が到着し、21日に津市の三重大学で開会式が行われた。第5回のイタリア大会と並び、最多の参加国・地域数である。

IESO 2016組織委員会の平 朝彦 委員長 (海洋研究開発機構 理事長) の開会宣言に続き、選手団の入場。各国・地域の旗手は、三重県内の高等学校11校が参加する三重県生徒実行委員会の高校生たちが務めた。伝統的な衣装も見られるなか、日本選手団は法被姿で登場。日本代表選手である笠見京平さん (広島県・広島学院高等学校3年生)、神原祐樹さん (大阪府立北野高等学校3年生)、

坂部圭哉さん (愛知県・海陽中等教育学校5年生)、廣木颯太郎さん (東京都・海城高等学校3年生) の4人と、ゲスト生徒である大小田智暁さん (広島県・広島学院高等学校3年生)、小山雪乃丞さん (東京都・武蔵高等学校3年生)、山川隆良さん (東京都・開成高等学校3年生)、柵木裕さん (三重県立四日市高等学校3年生)、松山拳大さん (三重県立伊勢高等学校3年生) の5人の、計9人である。旗手は、三重県の高校に通う柵木さんが務めた。

### ●プレッシャーをはねのけて楽しむ

日本代表選手は、IESO選手選抜を兼ねた日本地学オリンピック予選・本選、IESO最終選抜を経て選ばれた。2015年12月に行われた日本地学オリンピック予選の応募者は2,146人。予選は全国78

会場でマークシート方式の試験が行われ、本選に進むことができるのは約60人だ。本選は記述式と岩石・鉱物・化石鑑定試験で、上位10人がIESO最終選抜へ。そして英語による筆記試験・面接などによって4人が選抜された。ゲスト生徒は最終選抜に選ばれた生徒のうち参加を希望した3人と三重県教育委員会推薦の2人で、代表選手と同じ試験などを受けるがメダルの対象外である。

日本代表選手とゲスト生徒は、3月に決定して以降、IESOに向けて通信研修を受けてきた。また代表選手は2回の合宿研修に参加。1回目は5月27～29日、埼玉県秩父地方で地質調査などの実習が行われた。その様子は『Blue Earth』143号で紹介している。

2回目の合宿研修は、8月5～7日に茨城県つくば市で実施。主に講義形式で、古生物、地形、地質、岩石・鉱物、海洋、環境、地震、



写真提供: JESOC

日本選手団入場。日本代表選手4人とゲスト生徒5人で結成。



写真提供: JESOC

スリランカ選手団は伝統的な衣装で入場。



写真提供: JESOC

名物の伊勢うどんを食べる選手たち。



写真提供: JESOC

筆記試験は午前と午後の合計3時間30分。

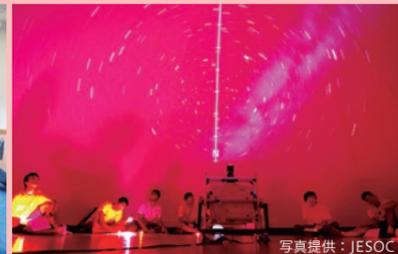


美里町桂畑での実技試験。地層の走向・傾斜を計測。



写真提供: JESOC

簡易プラネタリウムを使用した天文の実技試験。



写真提供: JESOC

簡易プラネタリウムの内部。

天文、気象の各分野を学んだ。IESOまで2週間となった気持ちを聞くと、「これから本番に向けて準備に力を入れます。日本開催という特別な大会なので、すべてが楽しみ」と笠見さん。廣木さんは、「今年は物理学や生物学、化学などの国際科学オリンピックで日本代表選手が続々とメダルを取っているので、プレッシャーも大きい」という。すると神原さんは、「陸上部で8種競技をやっていたので、プレッシャーのかかる大会への出場には慣れている。僕は、プレッシャーが大きいほど頑張れるタイプなんです」とほほ笑む。

「日本代表」と書いてあるとプレッシャーを感じてしまう」と、ネームカードを見ながらいうのは坂部さんだ。坂部さんは、7月に黒海沿岸の国ジョージアで開催された国際化学オリンピックで金メダルを獲得。「科学はどの分野も好きなんです。そのなかでも地学



ITFI。熊野市の鬼ヶ城にて。岩が侵食された風洞を観察し、千畳敷の広さや洞窟の高さを計測。



国際混合チームで調査。 鬼ヶ城で調査を行う神原さん。 七里御浜で磯海岸の長さを測る笠見さん。



ITFIの発表準備の様子。中央奥は廣木さん。



ITFIの調査結果を発表する笠見さん。



ポスター発表会場の様子。



世界26の国・地域から100人の選手と10人のゲスト生徒が参加。



さよならパーティーにてIESO 2016組織委員会の平委員長（中央）と日本からの参加者。

日本代表選手は全員メダルを獲得。 左から笠見さん、神原さん、坂部さん、廣木さん。

は身近な世界なので、一番好き。だからIESOでも、できればメダルは欲しいですね」

プレッシャーを感じている4人に、講師たちは「みんなが地学の高い知識を持っていることは間違いないのだから、IESOはお祭り気分楽しんできて」とエールを送った。

### ●交流を深めつつ試験に挑む

そして8月21日、いよいよIESOが幕を開けた。開会式後は伊賀市へ移動して伊賀流忍者博物館を見学。三重県生徒実行委員の高校生が展示物や日本独特の文化を英語で紹介し、一緒に忍術ショーを楽しんだ。22日は、伊勢神宮の内宮、その周辺のおはらい町、おかげ横丁を訪問。宇治山田商業高等学校国際科の生徒と散策し、昼食を共にして交流した。

23日は、三重大学で筆記試験。筆記試験の問題は、IESO問題作成委員会が英語で作成し、各国・地域のメンター（指導者）による議論の後、必要な国は母国語に翻訳される。

緊張の筆記試験の後には、三重県総合博物館を訪問。三重県生徒実行委員の高校生が合流し、展示を英語で案内した。

夕食後は、ESP (The Earth System Project) に取り組んだ。ESPは、出題されたテーマについてインターネットなどを活用して調べ、その結果をポスターにまとめて発表するというもので、成績には関係しない。今回のテーマは「Living on the edge of a tectonic plate」(プレート境界に生きる)。16の国際混合チームに分かれ、遅い時間まで調査やポスター作成に取り組んだ。ESPのポスター発表は26日だ。

24日は実技試験。会場は、三重大学と津市の美里町である。三重大学では、再生可能エネルギー、気象、天文に関する実技試験

を実施。気象では、機器を使ってアスファルト舗装された道路と芝生で太陽光の反射率の違いを調べる問題が出された。天文は、簡易プラネタリウムを用いて、自分が宇宙飛行士となって太陽系のある天体から星空を見ようという設定で出題された。

美里町内では、柳谷と桂畑の2つのサイトで地質に関する実技試験を行った。選手たちは、露頭の岩石や地層、化石を真剣な表情でつぶさに観察し、問題に答えていく。

選手たちの待機所となった桂畑文化センターには、「Welcome to Katsurahata!」(ようこそ桂畑へ!)の横断幕が掲げられていた。桂畑で実技試験を見守っていた地学オリンピック日本委員会 (JESOC) の久田健一郎 理事長 (筑波大学 教授) は「実技試験ができるのは、地元の方のご協力があってこそ。感謝しています。地元の伊勢新聞が開会式の様子を1面に掲載してくれたのも、とてもうれしかった」と話す。「選手たちも日本の文化に触れることを楽しんでいるようです。箸が使えるようになったとか、納豆を食べてみたとか、そんな会話が聞こえてきます。日本特有の地形や地質を知ってもらうことも大切ですが、選手たちが国や地域を超えて交流を深めてくれるこそがIESOの真の目的なんです」

### ●最高のITFIに

25日は、国際混合チームによるITFI (国際協力野外調査) が行われた。津市から車で2時間ほどかけて熊野市の鬼ヶ城、七里御浜へ。16の国際混合チームに分かれ、それぞれ指定された課題について調査・研究を行った。地元の木本高等学校の生徒も各チームに加わり、調査地の地理的な特徴を英語で説明し、調査をサポートした。参加生徒の1人は「英語力が違い過ぎて難しい話ではできませんでしたが、楽しかったです。もっと英語を勉強しようという目標

ができました」と話す。

ITFI終了後、熊野市民会館で交流会が行われた。木本高校の吹奏楽部による演奏に会場は一体となり、アンコールも。久田理事長は、「ITFIでは、木本高校の皆さんが本当によくやってくれました。各国のメンターやオブザーバーから、いままで一番素晴らしいITFIだったというお褒めの言葉を頂きました」と話す。

26日の午前中は、ESPとITFIの発表の準備を行った。神原さんは、「海外の選手たちは、同意でも反論でも強く自己主張します。日本人同士ではあまりない議論の雰囲気を経験できたのもよかった」という。午後からは、ESPのポスター発表と、ITFIについての口頭プレゼンテーション形式での発表が行われた。

夜に行われたさよならパーティーでは、各国・地域の選手たちが伝統芸能などを披露するなど、交流を深めた。「あえてこの言葉を使わせていただくのですが、“ヤバかった”。これが世界なのか!と思いました」と神原さん。

### ●日本代表選手は全員メダル獲得

そして27日、三重大学で閉会式が行われた。来賓あいさつでは、今回生まれた国際的な交流を育て、選手たちが将来、地球規模の問題解決に協力して取り組むことへの期待が、繰り返し語られた。そして、メダル表彰。筆記試験と実技試験の総合得点の上位約10%に金メダル、続く約20%に銀メダル、さらに次の約30%に銅メダルが授与される。日本代表選手は、笠見さん、坂部さん、廣木さんが金メダル、神原さんが銀メダルと、全員がメダルを獲得した。ゲスト生徒はメダルの対象とはならないが、後日発表された成績によると、小山さんが金メダル相当であったのをはじめ、銀メダル相当2人、銅メダル相当2人と、全員メダル相当であった。

大会出場者と三重県生徒実行委員会による「三重県宣言」(地球温暖化防止のために私たちができること)の後、平委員長の閉会宣言で、8日間にわたったIESO 2016が幕を閉じた。

過去最高の成績となったが、日本代表選手全員が口をそろえて語ったのが「英語力の不足」だ。「英語が話せなくても試験はどうにかなるが、外国の人との交流を楽しめない。もっと英語力を付けたい」と坂部さんという。

廣木さんは、地学オリンピックの魅力をこう語る。「地学は理科のなかで一番マイナーな教科ですし、学校では地学の話ができる相手はほとんどいません。日本地学オリンピックの試験や研修、そしてIESOは、地学好きと出会い、刺激を受けることができる貴重な機会でした。地学好きがもっと増えてほしいですね」

久田理事長も、こう述べている。「今回、日本の地学のレベルが高いことを実証したと思います。彼らの活躍に触発され、もっと多くの生徒が地学に関心を持ってくれることを期待します」

2017年のIESOは、フランスのコートダジュールで開催される。その代表選手選考を兼ねた日本地学オリンピック大会の参加申し込みを受け付け中だ。『Blue Earth』の読者の中・高校生の皆さん、ぜひ世界に挑戦してください。

BE

日本地学オリンピック大会 参加申し込み受け付け中 (2016年11月15日締め切り)

詳しくはNPO法人地学オリンピック日本委員会 ホームページへ <http://jeso.jp/>



# 史上初の海洋観測開発レース 「Wendy Schmidt Ocean Health XPRIZE」への挑戦

地球情報館公開セミナー 第193回 (2015年9月19日開催)

中野善之 海洋工学センター  
海洋技術開発部 先進計測技術グループ 技術研究員

## 海は大量の二酸化炭素を吸収

Wendy Schmidt Ocean Health XPRIZE—この賞は、海洋観測に関して史上初めて行われた賞金レースでした。名称から分かるように「Ocean Health」、つまり「海の健康」が関係しています。そのなかでも、海洋酸性化がテーマです。海洋酸性化とは、弱アルカリ性である海水のpH(水素イオン濃度指数)が少しずつ下がっていくことです。

酸性かアルカリ性かの程度は、pHで示されます。pHは簡単にいえば水素イオン濃度の対数で、7が中性です。水素イオン濃度が高いほどpHの値が小さくなり、より強い酸性になります。

海洋酸性化には、大気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)濃度の上昇が関係しています。

図1は、過去1万年における大気中の二酸化炭素濃度の推移です。9,000年以上にわたって大きく変化してこなかった

二酸化炭素濃度が、最近200年間ほどで急激に上昇しています。これは18世紀から19世紀にかけての産業革命以降、人為的に大量の二酸化炭素が排出されたことが主な原因です。大気中の二酸化炭素濃度の上昇は、当然のことながら日本でも観測されています。

大気中に放出された人為起源の二酸化炭素のうち、半分近くは海洋に吸収され、海水に溶け込んだと考えられています。

## 海洋酸性化で貝殻ができにくくなる

では、二酸化炭素が溶けた海では何が起きるのでしょうか。二酸化炭素が水と反応すると、重炭酸イオン(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)と炭酸イオン(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)、そして水素イオン(H<sup>+</sup>)が生じます。海水に溶ける二酸化炭素の量が増えると、海水中の水素イオンが増加します。つまり海水のpHが下がり、中性に近づいていくので

す。これが海洋酸性化です(年間のpHの下がり方は0.01pHよりも小さいため、現在のpHが約8である弱アルカリ性の海水が、pH7以下の酸性になることはありません)。

北海道の東の海域、北緯47度・東経160度にある「K2」と呼ばれる観測点で、JAMSTECは継続して海水成分を測定しています。図2はK2における二酸化炭素濃度とpHを示したグラフです。1996年以降、二酸化炭素濃度が上がる一方で、pHが下がっていることがわかります。

海洋酸性化が進むと、いったい何が起きるのか。これはいま、一生懸命研究が進められているところですが、たとえば一部の貝やサンゴなどのような、炭酸カルシウム(CaCO<sub>3</sub>)の殻や骨格をつくる生物が生育できなくなるのではないかとされています。

炭酸カルシウムは、炭酸イオンとカルシ

大気中の二酸化炭素濃度の上昇に伴って、海洋の酸性化が心配されています。海洋の酸性化が進行すると生物が炭酸カルシウムの殻や骨格をつくりにくくなるなど、海の生態系にも大きな影響を及ぼすと懸念されているのです。海洋酸性化の実態をきちんと把握するには、海水のpH(水素イオン濃度指数)を測定しなければなりません。しかしpHを測定するセンサーは複雑で高価なものが多いのが現状です。そこで安定して正確な、また扱いやすく安価なpHセンサーの開発を競う賞金レースが2013から15年にかけて開催され、海洋研究開発機構(JAMSTEC)と企業の合同チームが参加しました。



なかの・よしゆき。1973年、北海道生まれ。北海道大学大学院地球環境科学研究科修了。博士(地球環境科学)。水産総合研究センターを経て、2005年よりJAMSTECむつ研究所研究員。2009年より現職。専門は化学海洋学、分析化学。海水の化学成分センサーの研究開発に携わる。

ウムイオン(Ca<sup>2+</sup>)が結合して生成されます。海洋が酸性化して水素イオンが増えると、海のなかの炭酸イオンが中和されて減り、殻や骨格の材料となる炭酸カルシウムができにくくなってしまいます。

貝やサンゴ、ウニなどの幼生や、炭酸カルシウムをつくるプランクトンは、海洋が酸性化すると殻をつくりたくてもつくれなくなり、生きていくのが大変になるだろうといわれています。プランクトンは海食物連鎖の下の方にいますから、彼らが生きていけなくなると生態系全体に影響が及ぶのではないかと危惧されています。

海洋酸性化がどの程度進行しているのか、モニタリングを継続することが重要です。しかし、十分な観測が行われていないのが現状です。

## pHセンサーの技術革新などを 目指す賞金レース

賞金付き開発レースを行うことで科学技術が進むことを期待して、1995年にアメリカでXPRIZE財団が立ち上げられました。XPRIZEで最初に行われたのは、民間による宇宙船の開発レース「Ansari XPRIZE」です。現在最も大規模なレースとしては「Google Lunar XPRIZE」という民間による月面探査機の開発レースも行われていて、日本からも「HAKUTO」というチームが参加しています。

それぞれの賞には、冠として賞金のスポンサーの名前が付いています。これは今回も同じです。「Wendy Schmidt」はスポンサーの名前で、Google会長のエリック・シュミット氏の夫人の名です。

Wendy Schmidt Ocean Health XPRIZEは、海洋酸性化の研究促進を

目的としたpHセンサーの開発レースで、賞金総額は200万ドルでした。日本円では、1ドル100円で換算すると2億円になります。

今回のXPRIZEの目標は、まずpHセンサーの技術革新でした。海洋での正確なpHの測定は非常に難しいため、センサーも複雑で高価なものばかりです。安定した正確なpHセンサーや、扱いやすく安価なpHセンサーを開発して、海洋のpHデータを増やしていくことが目標の1つです。また海洋酸性化は、一般にはまだそれほど認知されていないので、広く周知したいということも目標の1つになっていました。海洋センサーやデータサービスのマーケットを開拓し、

新規参入メーカーやユーザーを発掘することも目標になっています。

## 「いいとこ取り」のセンサーで参加

私たちはJAMSTECと紀本電子工業(株)の合同チームでハイブリッドpHセンサー(HpHS)を開発してXPRIZEに参加しました(図3)。HpHSの大きさは19.8cm四方で高さ96cm、空中重量は10kgです。pH3.5から9までの範囲を0.001pHの分解能で測定できて、水深3,000mまでの圧力に耐えられます。

HpHSでは、pHを測定するのに「電極法」と「比色法」という2つの方法を組み合わせていることから、「ハイブリッド」と呼んでいます。電極法は電極間の

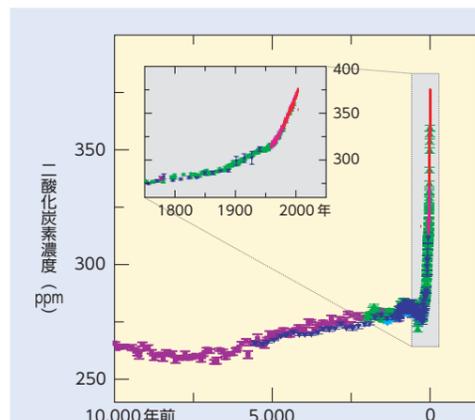


図1：過去1万年間の二酸化炭素濃度

最近250年ほどで、大気中の二酸化炭素濃度が急激に上昇している。横軸は2005年から何年前かを示しており、0が2005年、横軸の左端が1万年前である。左上は1750年以降を拡大したグラフ。出典：IPCC第4次評価報告書

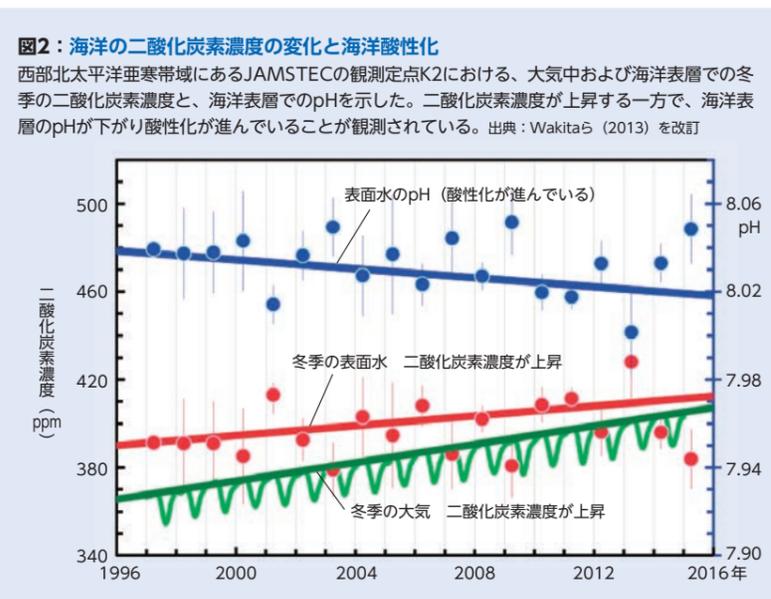


図2：海洋の二酸化炭素濃度の変化と海洋酸性化

西部北太平洋亜寒帯域にあるJAMSTECの観測点K2における、大気中および海洋表層での冬季の二酸化炭素濃度と、海洋表層でのpHを示した。二酸化炭素濃度が上昇する一方で、海洋表層のpHが下がり酸性化が進んでいることが観測されている。出典：Wakita S (2013) を改訂



図3：センサー開発チーム 前列左がチームリーダーである中野善之さんで、その隣がJAMSTEC海洋工学センター 海洋技術開発部 先進計測技術グループ グループリーダーの三輪哲也さん。後列左から、紀本電子工業の岡田靖彦さん、西尾康三郎さん、木下勝元さん、江頭 毅さん。手前に置かれているのがHpHSである。下はHpHSチームのロゴマーク(左)と今回のXPRIZEのロゴマーク(右)。チームHpHSの紹介動画 [https://youtu.be/\\_GlaTsm5QJ0](https://youtu.be/_GlaTsm5QJ0)



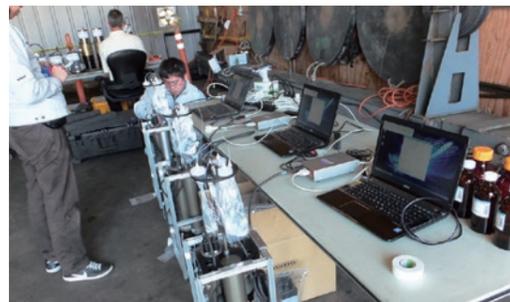
**図4: ハイブリッドpHセンサー (HpHS)**  
電極法と比色法とで測定できるハイブリッド型のセンサーである。比色法ではポンプとバルブで海水試料やpH指示薬を流してpHを測定する。必要に応じて現場でpH標準液を測定したり、純水で流路を洗い流したりすることもできる。

起電力からpHを測定する方法、比色法はリトマス試験紙のように色の変化を見てpHを測定する方法です。2つの方法には、それぞれ利点と欠点があります。

電極法の利点としては、pHの測定範囲が広く、消費電力が低いことなどが挙げられます。欠点としては、pHの値がpH標準液に依存すること、また長期間にわたり測定を行うと測定値そのものがずれていくという問題があります。電極にトラブルが多いことも欠点です。

一方の比色法は、電極法に比べると分解能が非常に高く、正確で安定しています。しかしポンプやバルブを使う関係上、消費電力が大きくなってしまふ欠点があります。pHの測定範囲が狭く、試薬が必要なため煩雑になるところも欠点です。

そのような電極法と比色法の“いいところ取り”をしようというセンサーがHpHSなのです(図4)。普段は消費電力の少ない電極法で頻りに測定します。しかし電極法での測定は、時間の経過とともに値がずれていきます。比色法のセンサーは消費電力が大きいのでたまにしか動かさず、より正確で安定しているため、比色法で測定した値を使って電極法の値をときどき補正してやります。こうすることで、消費電力を抑えながら、長い間、安定した測定ができるようにしました。



**図5: モントレー湾水族館研究所で行われたフェーズ2a, 2b**  
モントレー湾水族館研究所で行われた、フェーズ2aでのHpHSのセットアップの様子(左)。フェーズ2aのセットアップは倉庫のような建物内で行われた。下はフェーズ2bとなった研究所内のプールでの測定中の様子で、各チームのセンサーが取り付けられている。左下にHpHSが見えている。



図6: シアトル水族館で行われたフェーズ3の様子。実際の海水を測定することでセンサーの安定性などが審査されました(図6)。フェーズ3には14チーム17センサーが参加しました。このフェーズ3では、HpHSでの測定は非常にうまくいきました。

図7: ハワイ沖で行われたフェーズ4の様子。フェーズ4は、ハワイ沖で7日間の航海をしつつ行われた。フェーズ4まで進んだ5チームのpHセンサーを採水器に搭載し、水深3,000mまで下ろしながら測定を行った(上)。下は航海終了後の集合写真で、ウェンディ・シュミットさんを中心に、決勝参加者とXPRIZEのスタッフが写っている。

### 【フェーズ1から4までの経過】

フェーズ1の書類審査は、2014年7月に提出締め切りでした。書類は、センサーの技術情報や仕様、取扱説明書やデータの仕様、電源仕様など、本気で参加する気持ちがなければ書けないような内容でした。そのため、エントリー自体は77チームと非常に多かったのですが、フェーズ1を通過したのは23チーム、27センサーにとどまりました。そのうち実際にフェーズ2aに参加したのは18チーム21センサーでした。

フェーズ2aは、アメリカ西海岸、サンフランシスコの南にあるモントレー湾水族館研究所で、2014年9月に始まりました(図5)。フェーズ2aでは、温度が一定の部屋で2種類のpH標準液を測定して、センサーの正確さが審査されました。pH標準

液はpHの値がほぼ一定なので、それを測定することで正確さを見たわけです。

このフェーズ2bで、私たちは致命的なミスをしてしまいました。ソフトウェアの不具合のため電力を消費し過ぎてしまい、1ヵ月弱しかHpHSが動作しなかったのです。ただ、競技全体としてもトラブルがあり、もともと3ヵ月間の予定だった測定が、2ヵ月間で終了することになりました。競技そのものが1ヵ月間短くなったことで、HpHSの評価に対するダメージが緩和されることになったのは幸運でした。

フェーズ3は2015年2月から3月にかけてシアトル水族館で1ヵ月間行われ、実際の海水を測定することでセンサーの安定性などが審査されました(図6)。フェーズ3には14チーム17センサーが参加しました。このフェーズ3では、HpHSでの測定は非常にうまくいきました。

決勝であるフェーズ4は2015年5月に、ステーションアロハという、ハワイ沖にあるハワイ大学の観測地点で行われました(図7)。水深0mから3,000mまでのpHを観測するもので、pH値の正確さ、繰り返し精度、扱いやすさなどが審査されました。決勝まで進んだのは5チーム5センサーです。

### 【惜しくも「値の正確さ」部門で3位】

2015年7月に、ニューヨークで表彰式が行われました。私たちは「値の正確さ」部門の3位で、残念ながら賞金を獲得することはできませんでした。

「値の正確さ」部門の1位は、サンバーストセンサーズです。このチームは「扱いやすさ」部門でも別のセンサーで1位でした。アメリカのモンタナ州ミズーラにある、社員9人の会社だそうです。モンタナ大学と協力関係があり、二酸化炭素センサーでは昔から実績のある会社です。「値の正確さ」部門も「扱いやすさ」部門も、どちらも比色法のセンサーでした。

「値の正確さ」部門の第2位は、チーム

デュラフェットです。世界屈指の海洋研究所とセンサーメーカー、そしてアメリカの巨大企業の合同チームで、下馬評では優勝の最有力候補でした。私たちはそのチームに次ぐ順位で、その差も小さかったため、頑張れば追い付けるのではないかと考えています。

「扱いやすさ」部門の第2位はANBセンサーズでした。このチームは化学センサーのメーカーで、実は海に関することはほとんどしていません。XPRIZEが望んでいた、新規参入型のメーカーです。センサーの製造に3Dプリンターを利用し、製作期間はわずか4週間、価格も1,000ドルとのことでした。価格がずば抜けて安いこともあって、2位になったのではないかと考えています。

今回のXPRIZEで上位に入ったチームを見ても、さまざまな測定法が採用されていました。そのことから、pHセンサーの開発には、まだ研究の余地があるだろうと考えています。

### 【1年間の係留観測に成功】

XPRIZE終了後は、観測地点K2の水深200mにHpHSを係留し、約1年間の観測に成功しました。外洋において、4時間間隔という高頻度で1年間もpHを測定した例はなく、長期で安定した測定ができるHpHSの性能を実際の観測でも発揮できることが証明されました。 **BE**



**図6: シアトル水族館で行われたフェーズ3**  
フェーズ3が行われたシアトル水族館は海に面しており(上)、実際の海水をくみ上げてpHの測定が行われた。観測は上の写真中央の白いテント内で行われた。各チームのセンサーを海水掛け流しのプールにつるして1ヵ月間にわたり測定を続けた(下)。



**図7: ハワイ沖で行われたフェーズ4**  
フェーズ4は、ハワイ沖で7日間の航海をしつつ行われた。フェーズ4まで進んだ5チームのpHセンサーを採水器に搭載し、水深3,000mまで下ろしながら測定を行った(上)。下は航海終了後の集合写真で、ウェンディ・シュミットさんを中心に、決勝参加者とXPRIZEのスタッフが写っている。

特集「掘削情報科学が教科書を書き換える」はいかがでしたか。2014年に発足した海洋掘削科学研究開発センター（ODS）が目指す掘削情報科学の確立という壮大なビジョンをご理解いただけたでしょうか。地球深部探査船「ちきゅう」の建造計画が持ち上がったころ、JAMSTECのようなさほど予算規模が大きい機関が中心となることに多くの批判がありました。当時、国の内外から「ゴジラ・プロジェクト」などと揶揄されたことを覚えています。完成後の運用においても、多くの技術的な困難を乗り越えてきました。その結果、「ちきゅう」だけでなくJAMSTECの多くの船舶などによる総合的な調査により、まさに教科書を書き換えるような事実が続々と分かっています。16～17ページで稲垣史生さんが語っているように、半世紀の間それぞれの分野の研究者が記載してきた海底下の情報の関連性（リンク）を見いだすことが重要である、とされています。『Blue Earth』は、今後の研究の進展により掘削情報科学が地学などの教科書を書き換えていく過程をしっかりと見守っていきたくと考えています。

さて私事ですが、長らく編集後記を担当してまいりましたT.T.は9月でJAMSTECを卒業しますので、これが最後の編集後記となります。私は『Blue Earth』を立ち上げた初代編集長として、少しの中断はありましたが2000年からほぼ毎号編集後記を書き続けることができました。拙い文章を読み続けていただいた読者の皆さまに心から感謝致します。『Blue Earth』は当初から、学問的な専門誌ではなく、何となくなじみの薄かった海洋科学や地球科学分野の情報をできるだけ多くの方々に理解していただけるよう誌面づくりに尽力してまいりました。今後とも末永く、読者の皆さまの応援をお願い致します。本当に長い間ありがとうございました。（T.T. 土屋利雄）

## 『Blue Earth』定期購読のご案内

URL <http://www.jamstec.go.jp/j/pr/publication/index.html>

1年度あたり6号発行の『Blue Earth』を定期的にお届けします。

### ■ 申し込み方法

Eメールまたは電話でお申し込みください。  
Eメールの場合は、①～⑤を明記の上、下記までお申し込みください。  
① 郵便番号・住所 ② 氏名(フリガナ) ③ 所属機関名(学生の方は学年) ④ TEL・Eメールアドレス ⑤ Blue Earthの定期購読申し込み  
\*購読には、1冊本体286円+税+送料が必要となります。

### ■ 支払い方法

お申し込み後、振込案内をお送り致しますので、案内に従って当機構指定の銀行口座に振り込みをお願いします（振込手数料をご負担いただけます）。ご入金を確認次第、商品をお送り致します。  
平日10時～17時に限り、横浜研究所地球情報館受付にて、直接お支払いいただくこともできます。なお、年末年始などの休館日は受け付けておりません。詳細は下記までお問い合わせください。

### ■ お問い合わせ・申込先

〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25  
海洋研究開発機構 横浜研究所 広報部 広報課  
TEL.045-778-5378 FAX.045-778-5498  
Eメール [info@jamstec.go.jp](mailto:info@jamstec.go.jp)  
ホームページにも定期購読のご案内があります。上記URLをご覧ください。  
\*定期購読は申込日以降に発行される号から年度最終号（148号）までとさせていただきます。  
バックナンバーの購読をご希望の方も上記までお問い合わせください。

## ■ バックナンバーのご紹介

URL <http://www.jamstec.go.jp/j/pr/publication/index.html>



\*お預かりした個人情報は、『Blue Earth』の発送や確認のご連絡などに利用し、国立研究開発法人海洋研究開発機構 個人情報保護管理規程に基づき安全かつ適正に取り扱います。

## JAMSTEC メールマガジンのご案内

URL <http://www.jamstec.go.jp/j/pr/mailmagazine/>

JAMSTECでは、ご登録いただいた方を対象に「JAMSTECメールマガジン」を配信しております。イベント情報や最新情報などを毎月10日と25日（休日の場合はその次の平日）にお届けします。登録は無料です。登録方法など詳細については上記URLをご覧ください。

## 海と地球の情報誌 Blue Earth

第28巻 第5号（通巻145号）2016年10月発行

発行人 田代省三 国立研究開発法人海洋研究開発機構 広報部

編集人 松井宏泰 国立研究開発法人海洋研究開発機構 広報部 広報課

Blue Earth 編集委員会

制作・編集協力 有限会社フォトンクリエイト

取材・執筆・編集 立山 晃 (p1-17)、鈴木志乃 (p20-27、裏表紙)  
岡本典明/ブックブライツ (p28-31)、坂元志歩 (p18-19)

デザイン 株式会社デザインコンビビア  
(飛鳥井羊右、山田純一、岡野祐三)

撮影 藤牧徹也 (p20～21中段左2点・下段左4点、p22左2点、p26右列3点、p27)  
鈴木志乃 (p24-25、p25左列下・右列中、p26下段左・下段左から3つ目)

ホームページ <http://www.jamstec.go.jp/>

Eメールアドレス [info@jamstec.go.jp](mailto:info@jamstec.go.jp)

\*本誌掲載の文章・写真・イラストを無断で転載、複製することを禁じます。

## 賛助会（寄付）会員名簿 2016年9月30日現在

国立研究開発法人海洋研究開発機構の研究開発につきましては、次の賛助会員の皆さまから会費、寄付を頂き、支援していただいております。(アイウエオ順)

株式会社IHI	海洋エンジニアリング株式会社
あいおいニッセイ同和損害保険株式会社	海洋電子株式会社
株式会社アイケイエス	株式会社化学分析コンサルタント
株式会社アイワエンタープライズ	鹿島建設株式会社
株式会社アクト	川崎汽船株式会社
朝日航洋株式会社	川崎近海汽船株式会社
アジア海洋株式会社	川崎重工業株式会社
株式会社天野回漕店	川崎地質株式会社
株式会社アルファ水工コンサルタント	株式会社環境総合テクノス
株式会社安藤・間	株式会社キュービック・アイ
泉産業株式会社	共立インシュアランス・ブローカーズ
株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所	株式会社
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社	共立管財株式会社
株式会社エス・イー・エイ	極東貿易株式会社
株式会社エスイーシー	株式会社きんでん
株式会社SGKシステム技研	株式会社熊谷組
株式会社エヌエルシー	クローバテック株式会社
株式会社NTTデータ	株式会社グローバルオーシャン
株式会社NTTデータCCS	ティベロップメント
株式会社NTTファシリティーズ	株式会社KSP
株式会社江ノ島マリンコーポレーション	KDDI株式会社
株式会社MTS雪氷研究所	京浜急行電鉄株式会社
株式会社OCC	鉱研工業株式会社
株式会社オキシーテック	株式会社構造計画研究所
沖電気工業株式会社	神戸ペイント株式会社
オフショアエンジニアリング株式会社	広和株式会社

国際石油開発帝石株式会社	損害保険ジャパン日本興亜株式会社
国際ビルサービス株式会社	第一設備工業株式会社
コスモス商事株式会社	大成建設株式会社
株式会社コノエ	大日本土木株式会社
株式会社コベルコ科研	ダイハツディーゼル株式会社
五洋建設株式会社	太陽日酸株式会社
株式会社コンボン研究所	有限会社田浦中央食品
相模運輸倉庫株式会社	高砂熱学工業株式会社
佐世保重工業株式会社	株式会社竹中工務店
三建設備工業株式会社	株式会社地球科学総合研究所
三洋テクノマリン株式会社	中国塗料株式会社
JFEアドバンテック株式会社	中部電力株式会社
株式会社JVCケンウッド	千代田化工建設株式会社
株式会社ジーエス・ユアサテクノロジ	株式会社鶴見精機
シチズン時計株式会社	株式会社デザック
シナネン株式会社	寺崎電気産業株式会社
株式会社シーフロアーコントロール	電気事業連合会
清水建設株式会社	東亜建設工業株式会社
シモダフランチ株式会社	東海交通株式会社
ジャパンマリンユナイテッド株式会社	洞海マリンシステムズ株式会社
シュルンベルジェ株式会社	東京海上日動火災保険株式会社
株式会社昌新	東京製綱繊維ロープ株式会社
株式会社商船三井	株式会社東京チタニウム
新日鉄住金エンジニアリング株式会社	東北環境科学サービス株式会社
須賀工業株式会社	東洋建設株式会社
鈴与株式会社	株式会社東陽テクニカ
セイコーウオッチ株式会社	トビー工業株式会社
石油資源開発株式会社	新潟原動機株式会社
セコム株式会社	西芝電機株式会社
セナーアンドバーンズ株式会社	株式会社ニシヤマ
株式会社ソリッド・ソリューションズ・インク	日油技研工業株式会社

株式会社日産電機製作所	古野電気株式会社
ニッスイマリン工業株式会社	株式会社ベッツ
株式会社日放電子	株式会社マックスラジアン
日本アキュムレータ株式会社	松本徽章株式会社
日本SGI株式会社	マリメックス・ジャパン株式会社
日本エヌ・ユー・エス株式会社	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
日本海工株式会社	株式会社丸川建築設計事務所
日本海洋株式会社	株式会社マルトー
日本海洋掘削株式会社	三鈴マシナリー株式会社
日本海洋計画株式会社	三井住友海上火災保険株式会社
日本海洋事業株式会社	三井造船株式会社
一般社団法人日本ガス協会	三菱重工業株式会社
日本サルヴェージ株式会社	三菱スペース・ソフトウェア株式会社
日本水産株式会社	三菱電機株式会社
株式会社日本製鋼所	三菱電機特機システム株式会社
日本電気株式会社	株式会社森京建築事務所
日本マントル・クレスト株式会社	株式会社モンベル
日本無線株式会社	八洲電機株式会社
日本郵船株式会社	ヤンマー株式会社
株式会社ハイドロシステム開発	郵船商事株式会社
濱中製鎖工業株式会社	郵船ナブテック株式会社
東日本タグボート株式会社	株式会社ユー・エス・イー
日立造船株式会社	ヨコハマゴム・マリン&
深田サルベージ建設株式会社	エアロスベース株式会社
株式会社フクロジャパン	株式会社落雷抑制システムズ
株式会社フジクラ	
富士ソフト株式会社	
富士通株式会社	
富士電機株式会社	
古河機械金属株式会社	
古河電気工業株式会社	

左は、採取したコアを載せ「ちきゅう」から飛び立つヘリコプター。高知空港までは1時間ほど。右上は、高知コアセンターに到着し、冷蔵庫に保存されたコア。右下は、スーパークリーンルームの嫌気性グローブボックスでコアを分析している様子。

Pick Up  
JAMSTEC



## 生命圏の温度限界を探る「T-リミット」が始まった

2016年9月22日、高知県室戸岬の沖合120kmで掘削中の地球深部探査船「ちきゅう」から1機のヘリコプターが飛び立った。目的地は高知空港。ヘリコプターには、海底下から掘削されたばかりの試料（コア）が搭載されている。

今回の「ちきゅう」の任務は「室戸沖限界生命圏掘削調査：T-リミット」である。国際深海科学掘削計画（IODP）第370次研究航海として9月10日から11月10日まで実施される予定だ。海底下には海水中の生物の量に匹敵する微生物が生息する生命圏が広がっていることが、「ちきゅう」による掘削調査などで明らかになっている。では生命の生息限界はどこか。その解明がT-リミットの目的である。

室戸沖の水深約4,760mの海底において海底堆積物を基盤岩に達するまで約1,200m掘削してコアを採取し、温度を計測する。ここはプレートが沈み込む南海トラフの先端部で、堆積物と基盤岩の境界付近は130℃以上になると予測されている。現在知られている微生物の最高生育温度は約120℃。生命は何℃まで生息できるのか、その限界を知るには最適の場所だ。しかしそのためにはコアに地上の微生物が混入しないように、速やかに汚染のない環境で分析する必要がある。そこで、コアの一部をすぐにヘリコプターで高知コアセンターへ運ぶことにしたのだ。「ちきゅう」初の試みである。

高知空港に到着したヘリコプターからコアを受け取り、車で5分ほどの高知コアセンターへ。スーパークリーンルームで最先端の機器を用いて細胞の数を調べDNA解析などを行う。コアの輸送は複数回を予定している。T-リミットの「T」は温度（Temperature）だ。生命が生息できる限界温度が、間もなく明らかになる。