

海と地球の情報誌

# Blue Earth

## 126

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

ISSN 1346-0811

2013年10月発行

隔月年6回発行

第25巻 第4号

(通巻126号)

### 小さな有孔虫が大きな地球を語る



熱水—海水燃料電池の  
発電試験成功

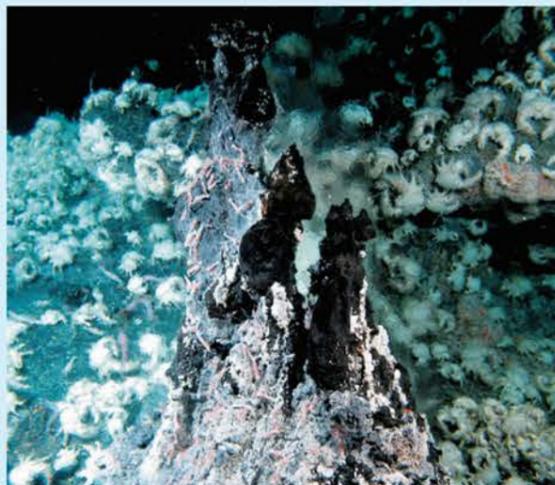
「ちきゅう」による  
東北地方太平洋沖地震調査掘削

可視化技術の最前線



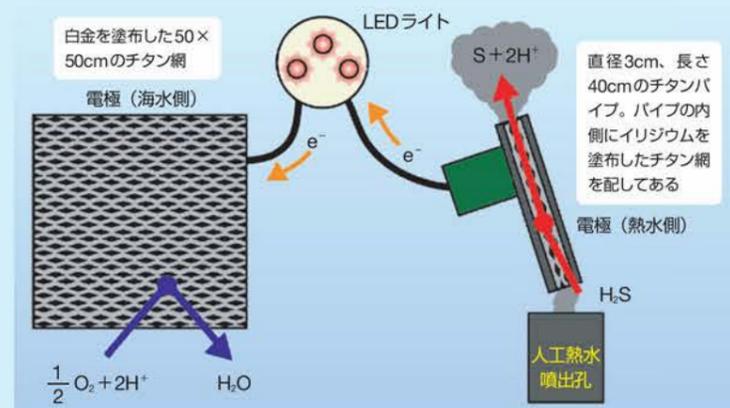
沖縄トラフ伊平屋  
北フィールドの深  
海熱水噴出孔

熱水が噴出しているため、背景が揺らいで見える。深海では水圧が高く水の沸点が上がるため、熱水は300°C以上に達することもある。熱水には硫化水素や水素が含まれている



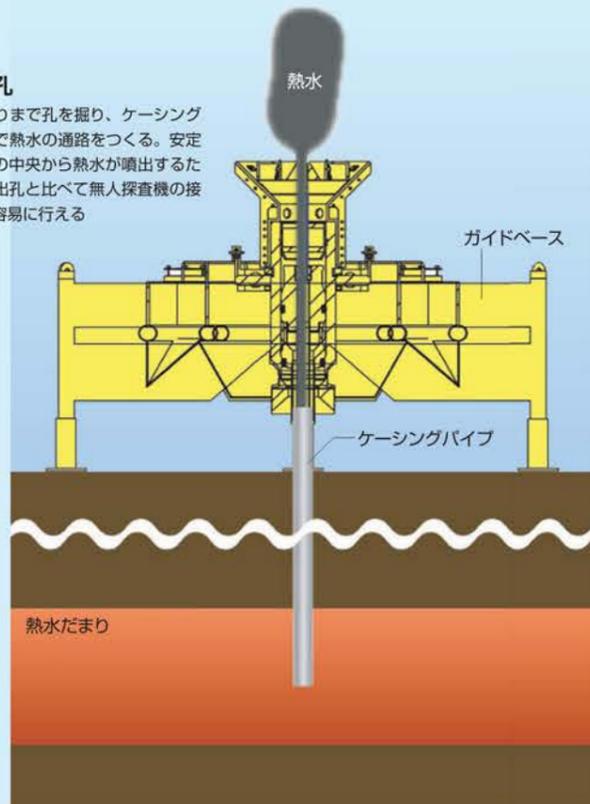
熱水—海水燃料電池の概念図

熱水側と海水側の電極を電線で連結し、その間に電動装置としてLEDライトを入れたシンプルな構造である。熱水側電極では、主に硫化水素 (H<sub>2</sub>S) が酸化され、電子 (e<sup>-</sup>) が電極に流れ込む反応が進行する。海水側電極では、主に酸素 (O<sub>2</sub>) が電極から電子を受け取り還元される反応が進行する



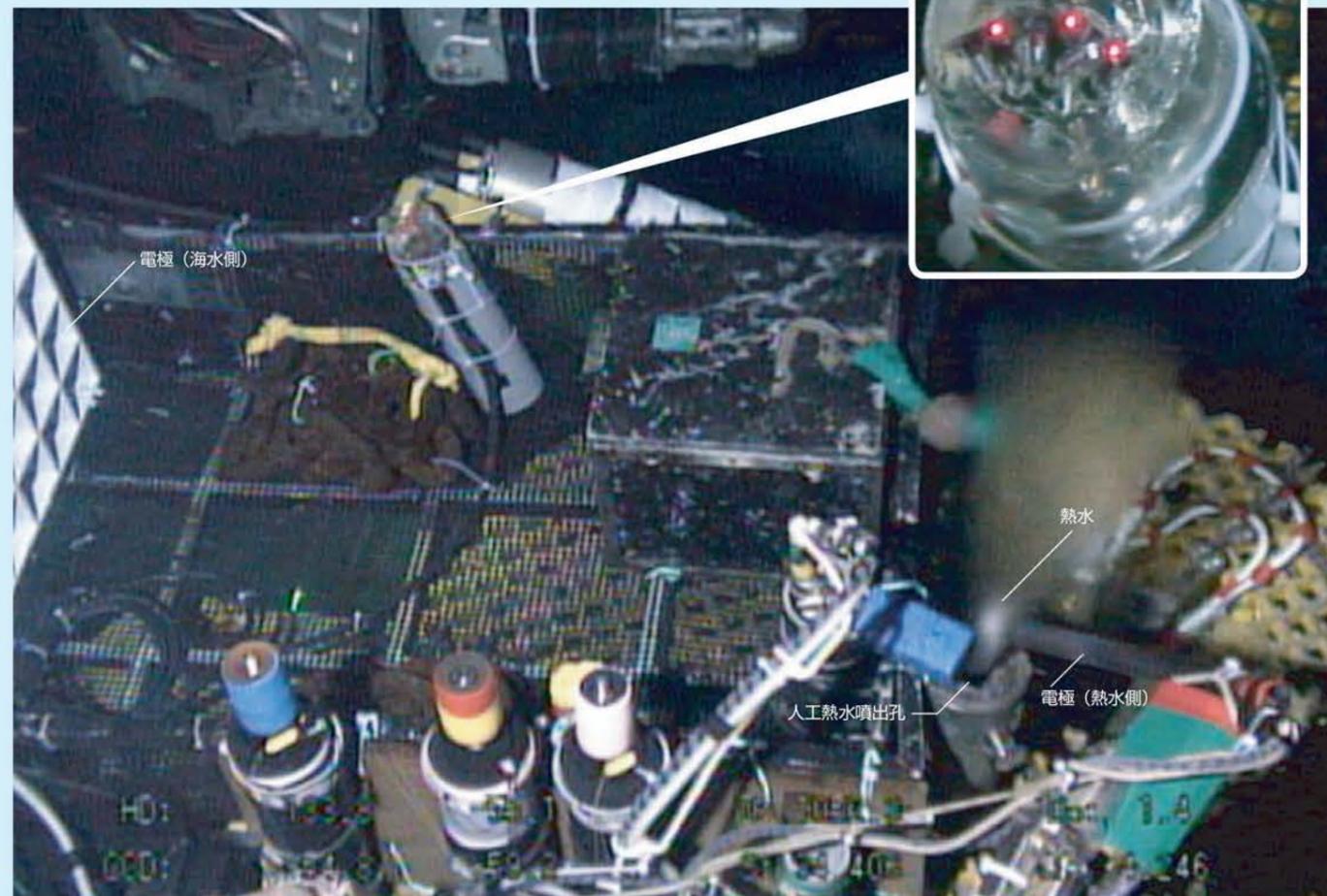
人工熱水噴出孔

海底下の熱水だまりまで孔を掘り、ケーシングパイプで海底面まで熱水の通路をつくる。安定したガイドベースの中央から熱水が噴出するため、天然の熱水噴出孔と比べて無人探査機の接近や観察・実験を容易に行える



LEDライト

3個の赤色のLEDが点灯していることが確認できる



熱水—海水燃料電池の全体写真  
海水側の電極は一部のみ見えている

Close Up

熱水—海水燃料電池の発電試験に成功

化石燃料や原子力に頼らない発電方法が求められているなか、海洋のさまざまなエネルギーを電力に変換する技術が研究されている。その1つが、熱水—海水燃料電池である。

海底から噴出している熱水には硫化水素のように電子を放出しやすい物質が、海水には酸素のように電子を受け取りやすい物質が、それぞれ豊富に含まれている。その性質を利用して熱水と海水の間の電子の移動を人工的に促進させれば、理論的には電力をつくり出すことが可能だ。海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 海底資源研究プロジェクトの山本正浩 研究員は、熱水と海水を燃料にできる発電装置「熱水—海水燃料電池」の実現を目指し、理化学研究所の環境資源科学センターの中村龍平チームリーダーらと共同で研究を進めてきた。

2010年、統合国際深海掘削プログラム (IODP) の「沖縄熱水海底生命圏掘削プロジェクト」において、沖縄トラフの伊平屋北フィールドで海底掘削が行われ、人工熱水噴出孔がつけられた。

山本研究員らは2012年、人工熱水噴出孔を使って熱水と海水が持つ電気的な特徴を、世界で初めて本格的に調査。発電が可能であることを確認し、熱水—海水燃料電池を設置して発電試験を行った。熱水—海水燃料電池は、熱水噴出孔側の電極と海水側の電極を電線でつないだだけのシンプルな構造である。そして、消費電力が21mWのLEDライトを点灯させることに成功。深海熱水孔で電気化学的な発電を行ったのは、世界で初めてである。

今回は電極が小さいため発電量は微小だが、電極の大きさや構造、素材などを工夫することで、もっと大きな電力を取り出すことができると考えられている。また、燃料となる熱水と海水は無尽蔵に供給されることから、長期間にわたって安定的に電力を供給することも可能だ。海底に電力供給システムをつくることができれば、深海熱水活動域での研究や開発に大きく貢献すると期待される。今後は、長期間運転を行い、耐久性を試験していく計画である。

取材協力：海底資源研究プロジェクト 山本正浩 研究員

1 **Close Up**  
熱水—海水燃料電池の  
発電試験に成功

2 **特集**  
小さな有孔虫が  
大きな地球を語る

18 **Aquarium Gallery**  
すさみ海立エビとカニの水族館  
白い宝石—オーストラリアスノークラブ

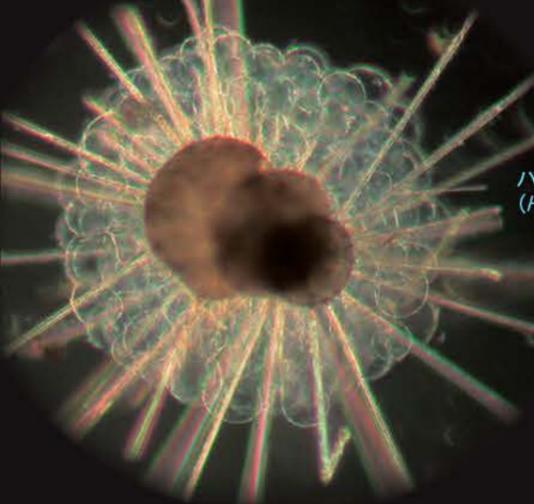
20 **私が海を目指す理由**  
深海底を覆う泥に息づく生態系を探る  
野牧秀隆  
海洋・極限環境生物圏領域  
海洋環境・生物圏変遷過程研究プログラム 主任研究員

24 **研究の現場から**  
コンピュータと人をつなぐ可視化技術の最前線  
荒木文明  
地球シミュレーションセンター シミュレーション高度化研究開発プログラム  
高度計算表現法計算グループ グループリーダー

28 **Marine Science Seminar**  
「ちきゅう」による  
東北地方太平洋沖地震調査掘削の概要  
斎藤実篤  
地球内部ダイナミクス領域 固体地球動的過程研究プログラム  
付加体力学研究室 チームリーダー

32 **BE Room**  
編集後記  
「Blue Earth」定期購読のご案内  
JAMSTECメールマガジンのご案内

裏表紙 **Blue Earthをめぐる**  
水深5,000m、400°Cの熱水噴出域へ  
カリブ海・中部ケイマン海膨



ハスティゲリナ・ペラジカ  
(*Hastigerina pelagica*)



グロビゲリノイデス・ルーバ  
(*Globigerinoides ruber*)



バキュロジプシナ・スファエルラータ\*  
(*Baculogypsina sphaerulata*)

有孔虫という生物を知っているだろうか？

世界中の海に生息する単細胞の原生生物で、多くの有孔虫は石灰質の殻を持ち、大きさは1mmほどだ。

これまで有孔虫は、過去の海洋環境を知ることができることから、その化石が注目され、研究が進められてきた。生きている有孔虫についての研究が進んだのは、最近だ。そして、研究が進むにつれて、

有孔虫はとても不思議な生物であることが、次第に明らかになってきた。

海洋研究開発機構（JAMSTEC）は、世界屈指の有孔虫の研究拠点である。

飼育実験など独自の研究から明らかになってきた、

有孔虫の魅力をたっぷり紹介しよう。



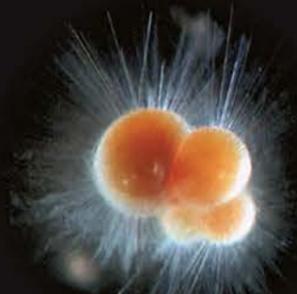
グロボロタリア・メナルディー  
(*Globorotalia menardii*)

生きている有孔虫の姿  
(\*は底生有孔虫。大きさの比率は実際とは異なる)

# 小さな有孔虫が大きな地球を語る



カルカリナ・ガウディチャウディ\*  
(*Calcarina gaudichaudii*)



グロビゲリネラ・アエキュラテラリス  
(*Globigerinella aequilateralis*)



エルフィディウム・クリスパム\*  
(*Elphidium crispum*)



アンモニア・ベッカリ\*  
(*Ammonia beccarii*)



ネオグロボコードリナ・デュテルトレイ  
(*Neogloboquadrina dutertrei*)



ストレプトキルス・トケラウアエ  
(*Streptochilus tokelauae*)

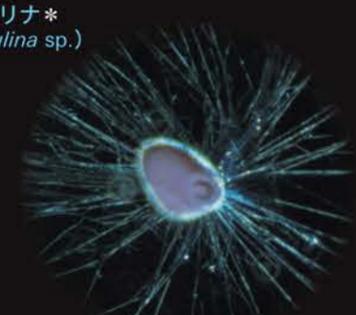
グロビゲリノイデス・サクキュリファー  
(*Globigerinoides sacculifer*)



オーブリナ・ユニバーサ  
(*Orbulina universa*)



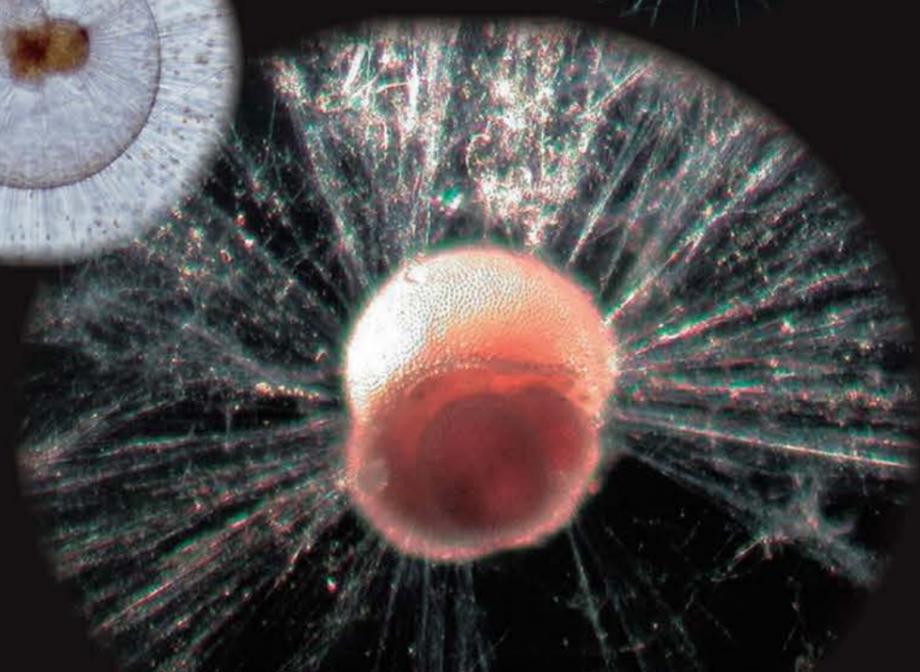
グロビゲリナ・ブロイデス  
(*Globigerina bulloides*)



キンキロキュリナ\*  
(*Quinqueloculina* sp.)

## ●取材協力

- 木元克典 技術研究副主幹 地球環境変動領域 古海洋環境研究チーム
- 土屋正史 チームリーダー 海洋環境・極限環境生物圏領域 同位体生態学研究チーム
- 豊福高志 チームリーダー 海洋環境・極限環境生物圏領域 地球生物学研究チーム/極限バイオリソース開拓研究チーム



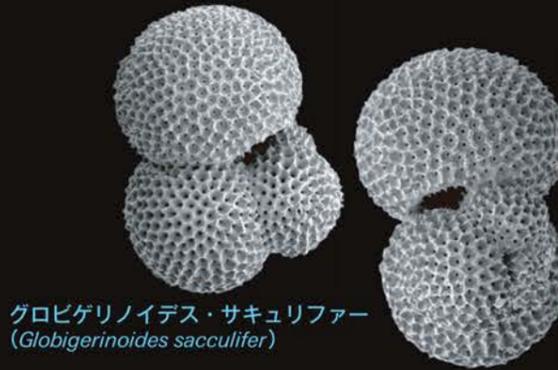
プレニアティナ・オブリキュロキュラータ  
(*Pulleniatina obliquiloculata*)

# 有孔虫の殻のかたち

有孔虫の殻の電子顕微鏡写真 (\*は底生有孔虫。浮遊性は2方向から、底生は1方向からの写真を掲載。大きさの比率は実際とは異なる)



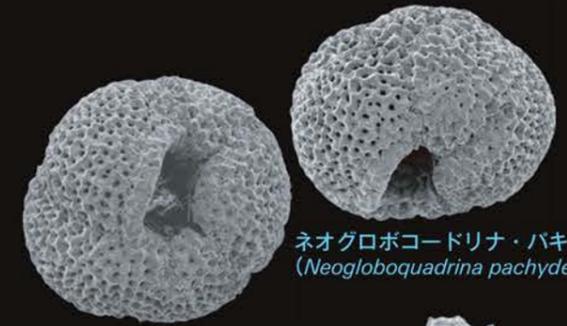
グロビゲリナ・キンクエローバ  
(*Globigerina quinqueloba*)



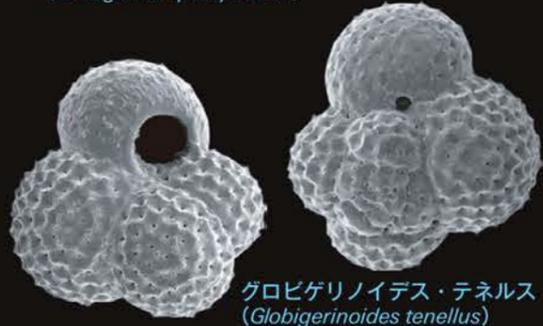
グロビゲリノイデス・サキュリファー  
(*Globigerinoides sacculifer*)



グロビゲリノイデス・ルーバ  
(*Globigerinoides ruber*)



ネオグロボコードリナ・パキデルマ  
(*Neogloboquadrina pachyderma*)



グロビゲリノイデス・テネルス  
(*Globigerinoides tenellus*)



グロビゲリナ・ファルコネンシス  
(*Globigerina falconensis*)

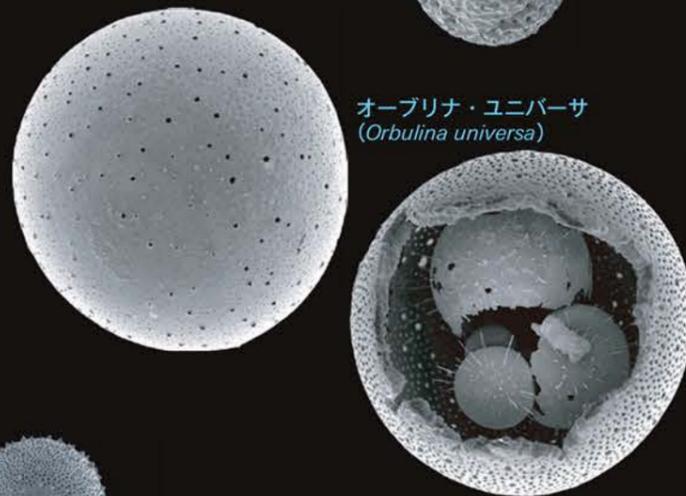


キャンデイナ・ニティダ  
(*Candeiina nitida*)

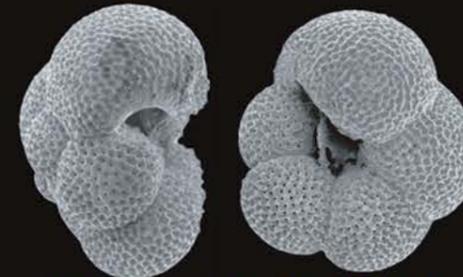


ベーエラ・ディジタータ  
(*Beella digitata*)

プレニアティナ・オブリキュロキュラータ  
(*Pulleniatina obliquiloculata*)



オープリナ・ユニバーサ  
(*Orbulina universa*)



ネオグロボコードリナ・デュートルトレイ  
(*Neogloboquadrina dutertrei*)



グロボロタリア・ツミダ  
(*Globorotalia tumida*)



グロボロタリア・トゥランカトリノイデス  
(*Globorotalia truncatulinoides*)



グロボロタリア・メナルディー  
(*Globorotalia menardii*)



グロビゲリネラ・キャリダ  
(*Globigerinella calida*)



ウビゲリナ・アキタエンシス\*  
(*Uvigerina akitaensis*)



ラエビデンタリナ・アフェリス\*  
(*Laevidentalina aphelis*)



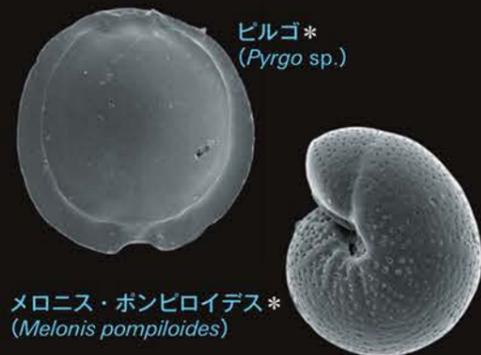
ガリッテリア・ヴィバンス  
(*Gallitellia vivans*)



グロボコードリナ・コングロメラータ  
(*Globoquadrina conglomerata*)



ボリビナ・ストリアチュラ\*  
(*Bolivina striatula*)



ピルゴ\*  
(*Pyrgo* sp.)

シビシデス・ロバチュルス\*  
(*Cibicides lobatulus*)



プレニア\*  
(*Pullenia* sp.)



フォントボティア・ウェレストロフィ\*  
(*Fontobotia wuellerstorfi*)

レンティキュリナ\*  
(*Lenticulina* sp.)

グロブプリミナ\*  
(*Globobulimina* sp.)

メロニス・ポンピロイデス\*  
(*Melonis pompiloides*)

ウビゲリナ・オーベリアーナ\*  
(*Uvigerina auberiana*)

# 有孔虫とは、どういう生物？

有孔虫は、1mmほどの大きさで、炭酸カルシウムの殻を持っている——そう紹介されることが多いが、炭酸カルシウムの殻と一言でいっても、ガラスのように透明なもの、陶器のように不透明のものがある。さらに、炭酸カルシウムではなく、海底の砂や鉱物の粒子などで殻をつくるもの、有機膜に覆われただけのものもある。大きさも、0.1mmととても小さいものや、10cmを超える大きなものもある。有孔虫は実に多様だ。

生活スタイルにも2つある。水中を漂って生活しているものと、海底で生活しているもので、前者を浮遊性、後者を底生と呼んでいる。そもそも有孔虫は、5億7000万年前の先カンブリア紀に出現した。それらは底生だったと考えられている。浮遊性有孔虫は、1億7000万年前のジュラ紀中期と1億4000万年前の白亜紀前期など数回、底生有孔虫の系統から種分化したことが、遺伝子解析から明らかになっている。

「有孔虫の魅力は何と云っても、そのユニークな殻のかたち！」と木元克典 技術研究副主幹はいう。有孔虫の殻は、チェンバー（殻室）と呼ばれる丸

い部屋が連なってできている。チェンバーのかたちや大きさ、つながり方は、種類によって異なる。そのため、ポップコーンのようなもの、花びらのようなもの、串だんごのようなものなど、殻のかたちはバリエーションに富む。沖縄など南の島の海岸で見られ、お土産としても有名な星のかたちをした星砂も、有孔虫の殻だ。

有孔虫は、成長とともにチェンバーを付加していく。チェンバーとチェンバーの間は隔壁で区切られているが、口孔という小さな孔が開いていて、すべてのチェンバーはつながっている。その空間に、アメーバのような有孔虫の本体が入っているのだ。有孔虫は、単細胞の原生動物である。

ところで、なぜ有孔虫という名前が付いたのだろうか。有孔虫の学術用語フォラミニフェラ(Foraminifera)は、「孔」と「持つ」という意味のラテン語から来ていて、口孔を持つことに由来する。

浮遊性有孔虫を観察していると、口孔や殻の表面全体に分布する壁孔などから糸状のものが出てることがある。これらは細胞質で、仮足と呼ばれている。また、浮遊性有孔虫のなかには、スパインと

呼ばれるとげのような突起を持つものがある。炭酸カルシウムできていて、ときには殻の長径の10倍以上になる。餌を捕獲するためなどスパインの用途には諸説あるが、浮力を調整しているというのが有力だ。

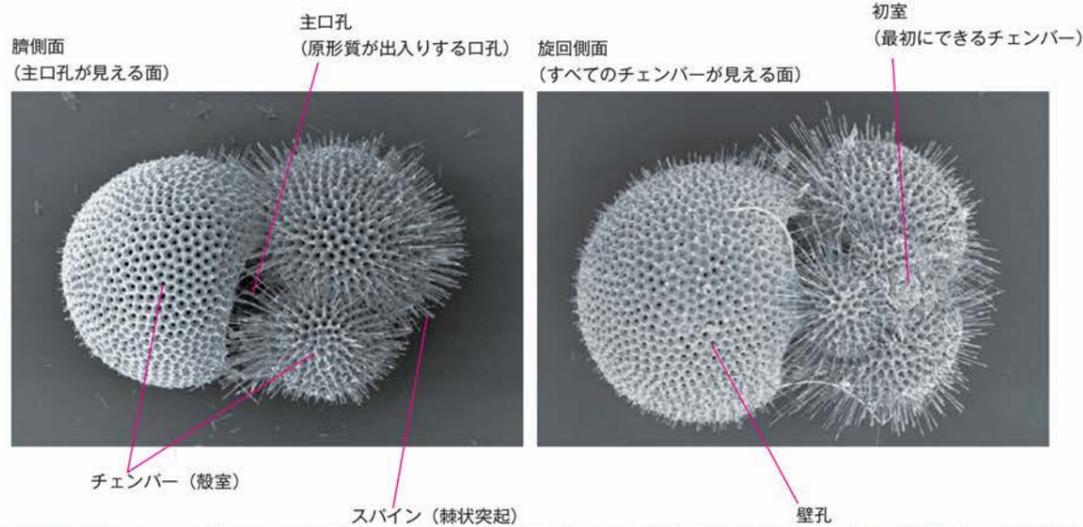
「有孔虫はとても面白いかたちをしています。でも、一般の方への認知度は低いですね」と木元技術研究副主幹。そこで木元技術研究副主幹は、「有孔虫、見える化プロジェクト」を開始。興味を持ってもらうためには、目で見たり、触ったりできることが重要だと考えた。まず、粘土模型や編みぐるみをつくってみた。さらに、マイクロフォーカスX線CTスキャナーで三次元構造を計測し、そのデータをもとに3Dプリンターで模型を作製。「最初の模型が完成したとき、感激しました。顕微鏡で見なければ見えない有孔虫を、手に取っているような方向から眺めることができる。しかも、内部の構造まで見えるのです。世界が変わりました」

日本各地の科学館の展示などで評判を呼び、少しずつ有孔虫の認知度が広がっていると、木元技術研究副主幹は手応えを感じている。見える化

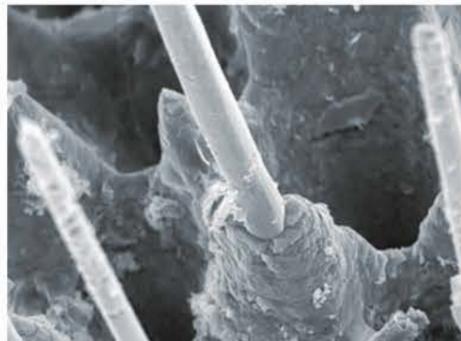
プロジェクトは、広報としてだけでなく、科学的にも大きな意味がある。「有孔虫には隠蔽種といって、形態からは同じ種とされているが遺伝子解析をすると異なる種に分けられるものがあります。マイクロフォーカスX線CTスキャナーは1マイクロメートルの精度で内部構造も分かるため、隠蔽種とされているものについても形態のわずかな違いを見分けることが可能になるでしょう」

木元技術研究副主幹は、マイクロフォーカスX線CTスキャナーの計測データからチェンバーとチェンバーの距離や角度を解析したり、数値モデルを用いて有孔虫の殻を再現して実在の種と比較したりもしている。「数値モデルからつくることができても実際には存在しないかたちもあります。有孔虫の殻のかたちは、長い進化のなかで最適化されたものなのでしょう。有孔虫の殻のかたちの意味を読み解くために、新しい技術や新しいアプローチを積極的に取り入れています」。新しもの好きを自認する木元技術研究副主幹。それこそが有孔虫研究の新しい潮流を生み出す原動力だ。

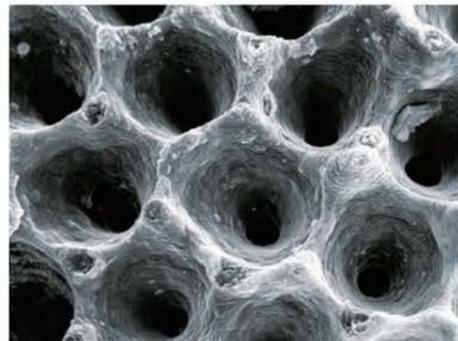
**有孔虫の各部の名称**  
(写真は浮遊性有孔虫のグロビゲリノイデス・サキュリファ)



生きている姿



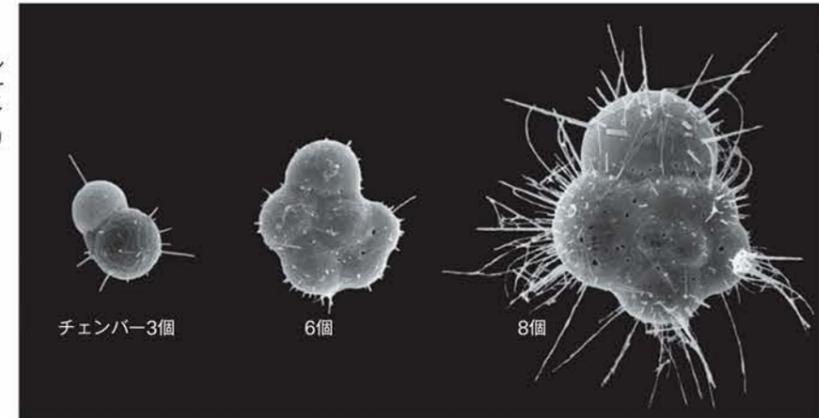
スパイン基部の拡大



表面構造の拡大

## 有孔虫の成長とチェンバーの付加

有孔虫は、成長に伴ってチェンバーと呼ばれる部屋を付加していく。成長するにつれてスパインもできる。写真はグロビゲリナ・キンキュエローバ



## 3Dプリンター模型

マイクロフォーカスX線CTスキャナーで殻の三次元構造を計測し、そのデータをもとに3Dプリンターで作製したABS樹脂製の模型。種名はグロボコードリナ・コングロメラータ。殻の内部が観察できるように2つに分割してある

## 有孔虫の本体

有孔虫の本体はアメーバのような単細胞で、各チェンバーを埋めるように入っている。茶色っぽく見えるものが有孔虫の本体である。殻の表面の糸状のものは仮足。写真はグロボロタリナ・メナルディー



# したたかに生きる有孔虫

浮遊性有孔虫はプランクトンや有機物の粒子などを、底生有孔虫はプランクトンや有機物の粒子に加えて海底の堆積物中のバクテリアなどを食べているのではないかと考えられている。

浮遊性有孔虫は、仮足を長く伸ばして餌がやってくるのを待つ。仮足はとても粘着性が強く、いったん仮足に触れたら、その獲物はもう逃れることはできない。もがけばもがくほど、仮足が絡み付き、身動きが取れなくなる。すると、有孔虫は仮足を獲物の体のなかに挿し込み、栄養分を吸収していく。

木元技術研究副主幹は、難しいといわれている浮遊性有孔虫の飼育実験を2001年から行っており、有孔虫が餌を食べる様子も詳細に観察している。「獲物のかたちは、みるみる変形していきます。そして、栄養を吸い尽くすと、死骸を静かに離します。

有孔虫はかわいいと思うのですが、食事シーンは何ともえげつない」と笑う。

「有孔虫は実にしたたかに生きている」というのは豊福高志チームリーダー（TL）だ。有孔虫には、細胞のなかに渦鞭毛藻などの藻類を共生させているものがある。黄金色に輝いて見えるのは、共生藻が持っている葉緑体の色である。有孔虫は、藻類にすみかを提供する代わりに、藻類が光合成で作り出した有機物をもらっているのだろう。

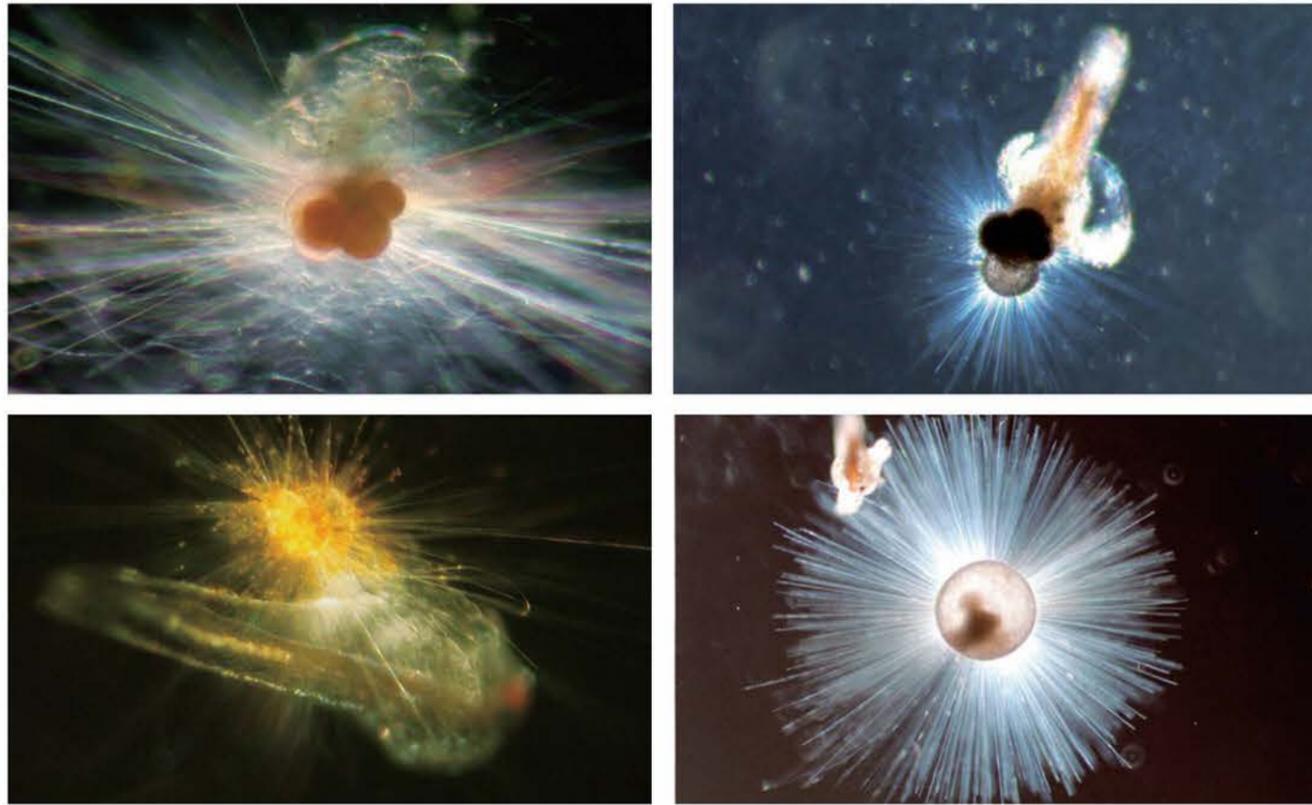
「一部の底生有孔虫は、藻類を共生させるのではなく、藻類の細胞質は消化してしまい葉緑体だけを盗み取って細胞内に蓄えています」と土屋正史TL。盗葉緑体と呼ばれる特殊な共生様式である。土屋TLがアミノ酸の窒素同位体比分析という手法を使って栄養段階を推定したところ、盗み取った葉緑

体を共生させている有孔虫の栄養段階は、藻類など1次生産者と同じだった。これは、葉緑体が光合成によって作り出した有機物を、有孔虫が利用していることを示唆している。盗葉緑体は酸素や光を有効利用する戦略なのかもしれない。

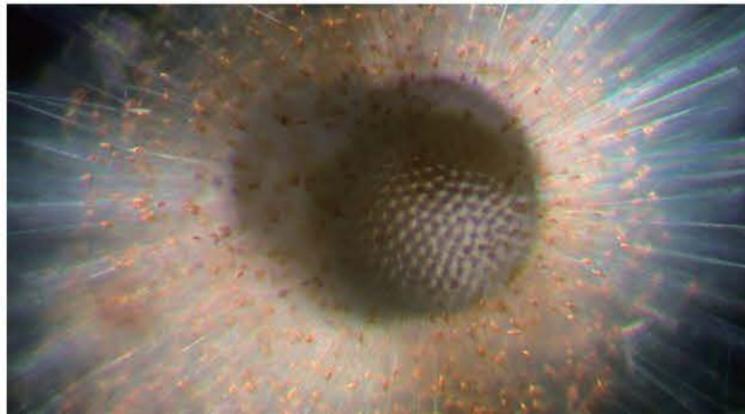
太陽の光が届かないために共生藻類に頼ることもできず、また到達する有機物の量が少ない深海底でも、有孔虫はしたたかに生きている。巨大化という戦略を取ったのが、ゼノフィオフォア（*Xenophyphora*）だ。その大きさは10cmを超える。ゼノフィオフォアは、炭酸カルシウムではなく、砂などの粒子を集めた殻をまとっている。その殻は、リボン状や扇状、網状、樹枝状など複雑なかたちをしている。海洋の表層から沈んでくるわずかな有機物の粒子などを受け止めるには、大きく複雑な

形状の方が効率的なのだろう。

ゼノフィオフォアの不思議なところは、大きさだけではない。有孔虫は単細胞生物であるにもかかわらず、ゼノフィオフォアには白と黒、2色の細胞がある。しかも、白い部分には水銀を、黒い部分には鉛やバリウム、ウランが濃集していた。「単細胞でありながら、役割分担があり、多細胞的に振舞っています。これも深海で生きる戦略の1つなのかもしれません」と土屋TL。「ゼノフィオフォアの遺伝子の解析も進めています。重金属類の濃集に関わる遺伝子が見つければ、汚泥の処理などに役立つ可能性があります」



**有孔虫の食事の様子**  
自分の殻より大きな獲物も粘着性の強い仮足で捕らえ、仮足を通して栄養分を吸収する



### 藻類との共生

浮遊性有孔虫のなかには、細胞内に渦鞭毛藻類などの植物プランクトンを共生させているものがある。仮足の表面に見える粒が共生藻類である。互いの生存に必要な物質の交換をしていると考えられている

### 巨大な有孔虫ゼノフィオフォア



鳥島東方沖の水深5,370mの海底では、ゼノフィオフォアがたくさん見られた（矢印）

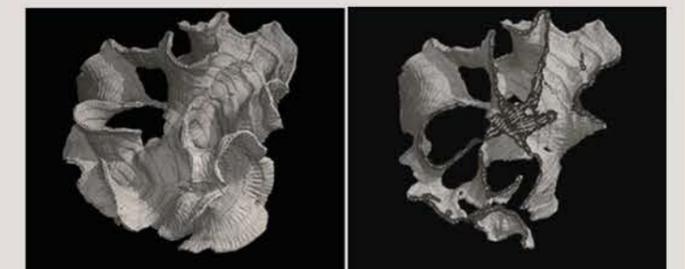


採取した個体。ゼノフィオフォアは砂の粒でできた殻を持つ。リボン状の形態は、栄養の少ない深海底で効率よく餌を受け止めるために都合がいいと考えられる



標本。10cmほどの大きさがある。大型の生物による捕食や物理的な破壊が少ない深海底だからこそ、この大きさにまで成長することができるだろう

撮影：藤牧徹也



マイクロフォーカスX線CT像。表面に見える筋は成長線だと考えられるが、成長速度や寿命など詳しいことは分かっていない。右は断面



### ゼノフィオフォアの細胞

三陸沖から採取したゼノフィオフォアの一つ、シンカイヤ・リンゼイアイ（*Shinkaiya lindsayi*）。白色の部位には細胞小器官を含む細胞質、黒色の部位には多くの堆積物粒子を含んでいる。また、白色の部位には水銀、黒色の部位には鉛、バリウム、ウランを濃集している

# 有孔虫の一生

有孔虫はどのように生まれ、成長し、増殖するのだろうか。有孔虫の一生は、まだ謎に包まれている。ここでは、飼育実験から分かってきた、有孔虫のライフサイクルの一端を紹介しよう。

浮遊性有孔虫の寿命はおそらく1~3カ月くらいで、主に有性生殖で子孫を増やす。たとえば、オーブリナ・ユニバーサという種類の場合、成体になると成長を止めて生殖の準備を始める。まずスパインを落とし、仮足が粘着性を失い縮退していく。仮足がないので餌は捕れなくなる。実は、生殖の準備に入った有孔虫は、細胞のなかに共生させている共生藻類を食べて命をつないでいるのだ。やがて、殻のなかに数千から数万個の生殖細胞、遊走子がつくられる。

遊走子は一斉に殻から放出され、2本の鞭毛を回転させながら水中を拡散していく。遊走子の大きさは0.002~0.005mmほどだ。遊走子は、同じ種類

の別の個体から放出された遊走子と出会うと、接合して新しい個体が生まれる。遊走子を放出した個体は、殻だけとなって海底に沈み、堆積していく。

「私たちは、飼育実験で遊走子を取り出すことに成功しています。しかし、その先は、まだ誰も確かめていません。私たちも何度もチャレンジしているのですが、うまくいかない。ぜひ遊走子を接合させて新しい個体をつくるまで、実験室で再現したい」と、木元技術研究副主幹は意気込む。

底生有孔虫の寿命は、浅海でくらすものは数週間、深海底でくらすものは長いものでは数年にも及ぶと考えられている。「底生有孔虫のなかでもグラブラテラ属 (*Glabratella*) のライフサイクルは少し変わっています」と土屋TL。この有孔虫の場合、遊走子を水中に放出しない。殻のなかに遊走子をつくっている2つの個体が結合し、そこで遊走子が接合するのだ。交配できる相手を識別して結合することで、遊

走子を水中に放出するより個体が生まれる確率が高くなる。こうして有性生殖で生まれた個体は、無性生殖で増殖する。無性生殖で生まれた個体は、有性生殖を行う。その繰り返しだ。有性生殖で生まれる個体の数は少ないが、大きく育つ。一方、無性生殖で生まれる個体の数は多いが、小さい。さらに、有性生殖で生まれた個体はチェンバーをつくっていく方向が左巻き、無性生殖で生まれた個体は右巻き、という違いもある。「左か右かは、どこでどのようにコントロールされているのでしょうか。今後明らかにしたいことの1つです」と土屋TL。

2008年、木元技術研究副主幹は、それまで有性生殖のみと考えられていた浮遊性有孔虫が無性生殖をすることを発見し、世界を驚かせた。浮遊性有孔虫の場合、チェンバーをつくっていく方向は水温で変わるとされていたが、無性生殖で生まれた個体は、もとの個体と逆の巻き方になることも明らかにした。

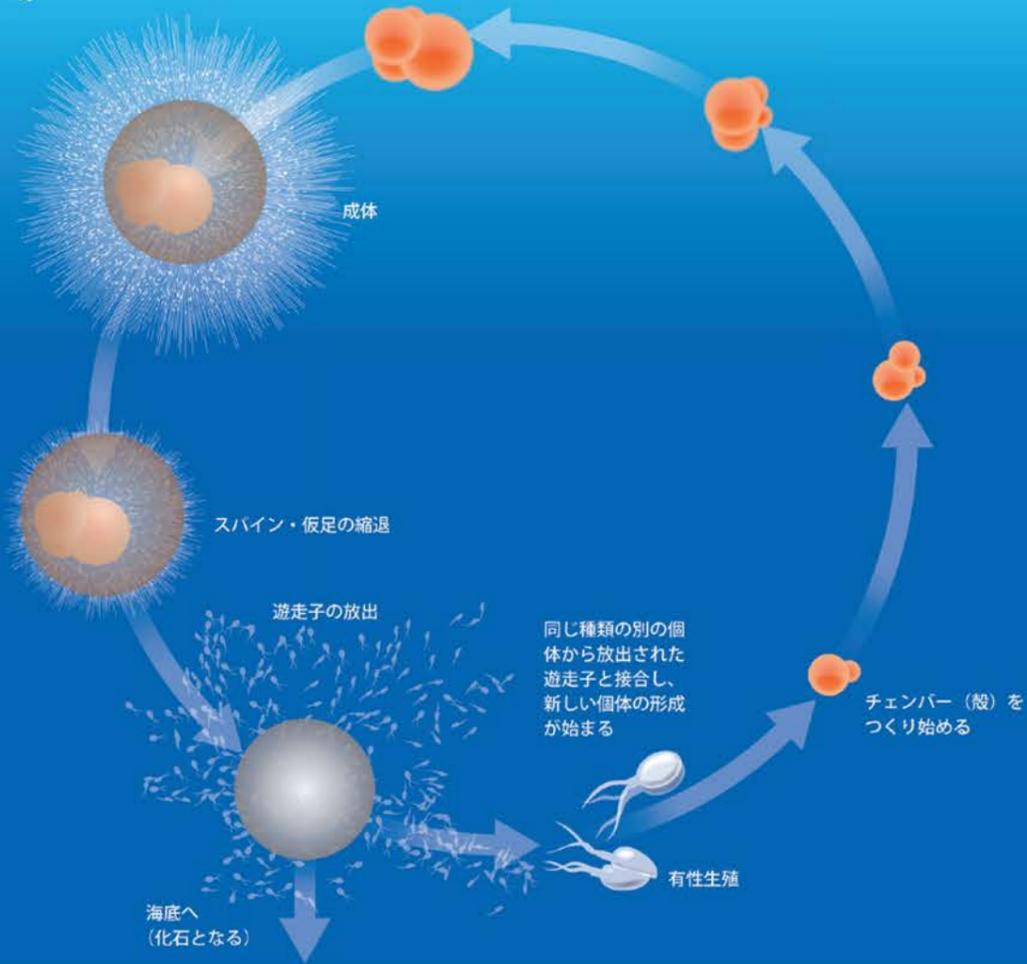
## オーブリナ・ユニバーサの遊走子の放出

放出された遊走子は、2本の鞭毛を回転させながら拡散していく。遊走子の寿命は数時間ほどである。球体の殻の直径は約0.5mm

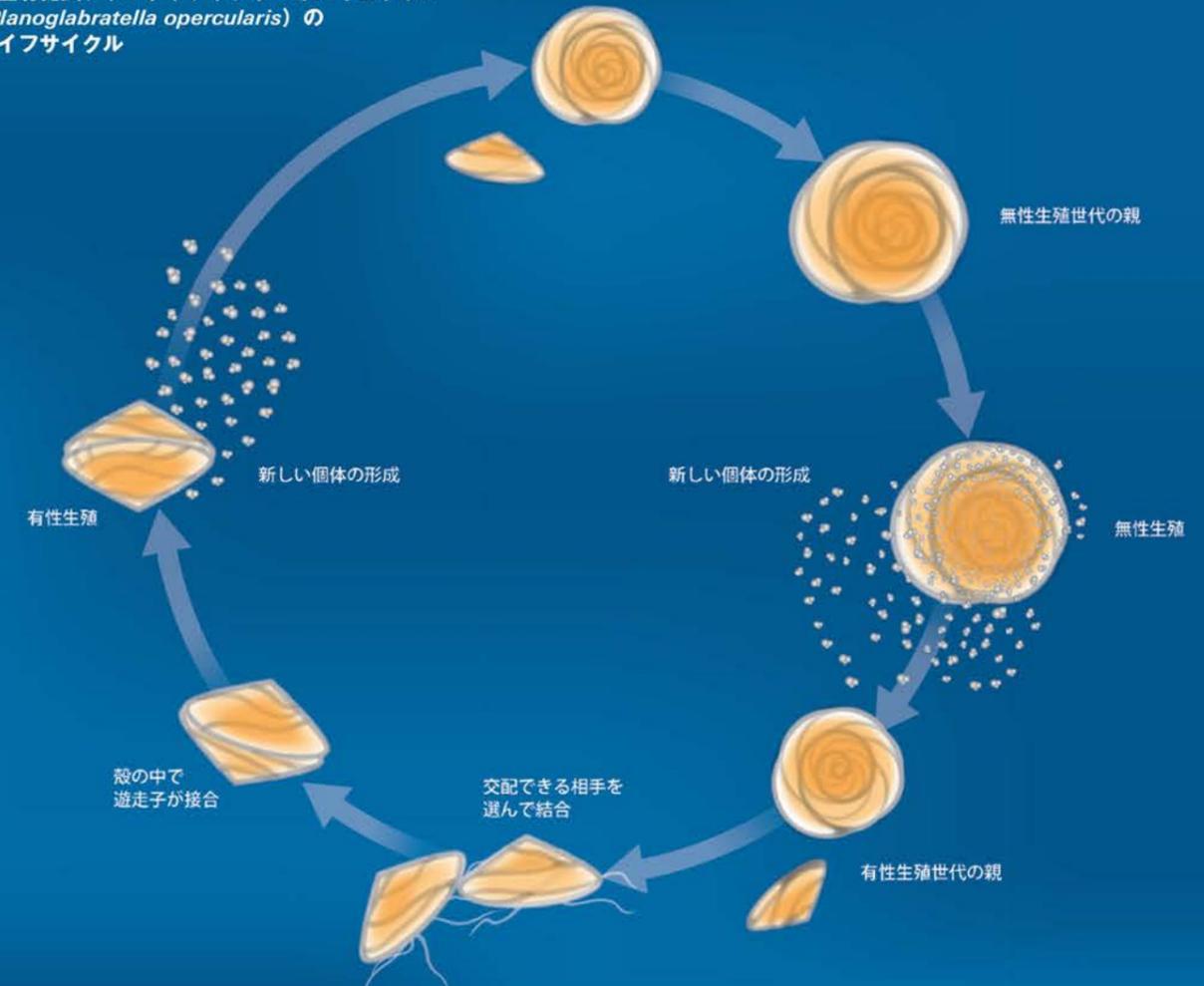


ここに紹介したライフサイクルは、知っているほんの一部で、まだ明らかになっていないことがたくさん残されている。

浮遊性有孔虫オーブリナ・ユニバーサ (*Orbulina universa*) のライフサイクル



底生有孔虫プランノグラブラテラ・オバキュラリス (*Planoglabratella opercularis*) のライフサイクル



# 有孔虫が炭酸カルシウムの殻をつくる様子を可視化

「私たちにとっては、殻こそが有孔虫の存在理由」と豊福TL。「有孔虫は、どのようにして炭酸カルシウムの殻をつくっていくのだろうか。それを知りたいのです」

有孔虫の炭酸カルシウム (CaCO<sub>3</sub>) の殻は、海水中のカルシウムイオン (Ca<sup>2+</sup>) と炭酸イオン (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) が結合して形成される。豊福TLは、まずpH (水素イオン指数) が蛍光の強さで分かる試薬を添加した海水で有孔虫を飼育して細胞内に取り込ませ、新しいチェンバーをまさにつくろうとしているときを狙い、蛍光顕微鏡で観察した。その結果、有孔虫の細胞内のpHの可視化に成功。殻をつくっている部位は、ほかの部位よりpHが高く、9以上になっていることが明らかになった。周りの海水はpH8.2程度だ。

pHと炭酸カルシウムの殻の形成は、どういう関係にあるのだろうか。pHが下がるということは、水素イオン濃度が増加することである。水素イオンは炭酸イオンと結合して重炭酸イオン (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) となる。つまり、pHが低くなると海水中の炭酸イオンは水素イオンと結合して減少し、炭酸カルシウムが形成されにくくなるのだ。逆に、pHが高くなると海水中の炭酸イオンが過剰になり、カルシウムイオンと結合して炭酸カルシウムが形成されやすくなる。チェンバーがつくられている場所は、まさに炭酸カルシウムが形成されやすい状態になっていることが確かめられた。

次に、カルシウムイオンと結合して蛍光を発する試薬を使い、pHと同様に観察。その結果、チェン

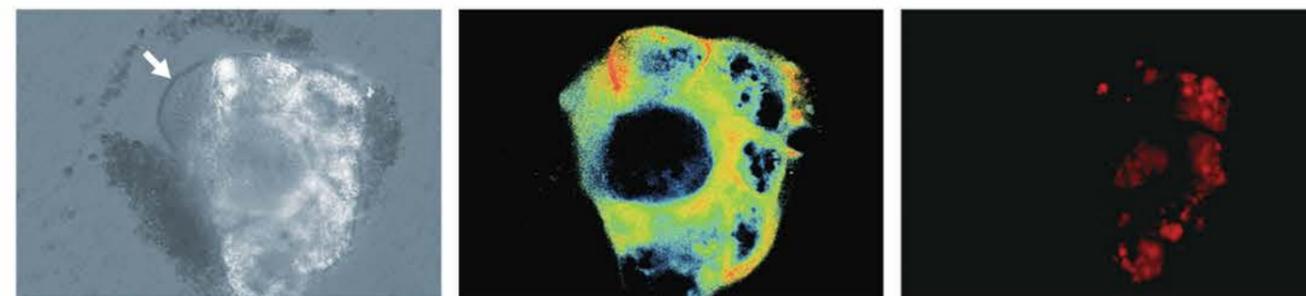
バーがつくられている場所、つまりpHが高くなっている場所で、カルシウムイオン濃度が高くなっていることが明らかになった。

有孔虫が殻をつくるときのpHとカルシウムイオン濃度を可視化した例はほとんどなく、殻の形成メカニズム解明に向けた大きな進展だ。「では、有孔虫はどのようにしてpHを高めているのか、カルシウムイオンをどのように集めてくるのかなど、まだ多くの謎があります。pHとカルシウムイオンを同時に可視化できるように努力を続けるとともに、ほかの化学成分を可視化できるさまざまな試薬を組み合わせていりながら、殻の形成メカニズムを明らかにしていきます」と豊福TLは意気込む。

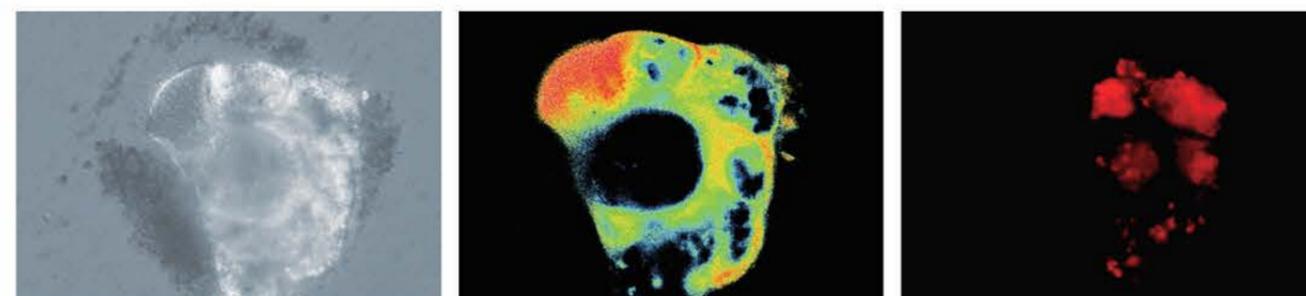
土屋TLは「殻の形成には共生藻類が関わっているかもしれません」と指摘する。「有孔虫自身がpHを調整する機能を持っているはずですが、共生藻類がいることでpHの変化を手助けしている可能性があります」。藻類が光合成によって二酸化炭素を吸収するとpHは上がる。共生藻類がいれば、有孔虫自身がpHを調整するエネルギーを節約することができる。また、豊福TLは「実は、仮足の動きが極めて重要であると考えているのですが、まだ詳しく見ることができていません」という。

有孔虫の殻の形成過程を詳細に観察するには、環境を精密に制御して飼育し、繁殖させる必要がある。可視化のための試薬の調整も不可欠だ。殻の形成メカニズムを研究しているグループは世界にいくつかあるが、その先頭を走っているのがJAMSTECである。

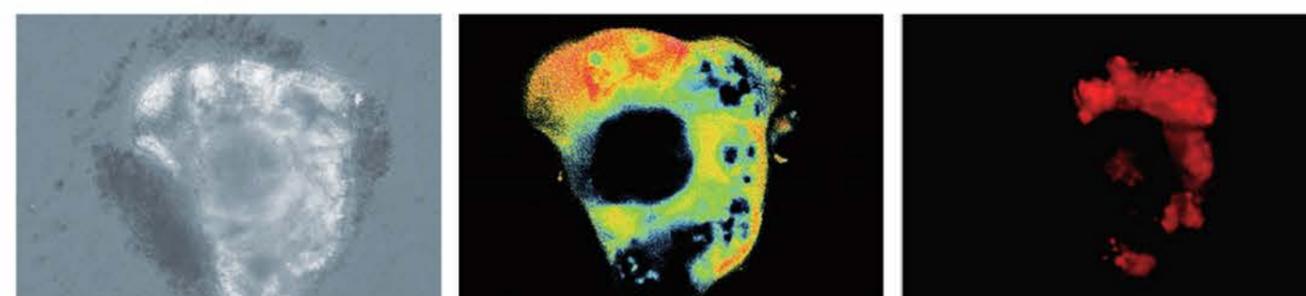
底生有孔虫アンモニア・ベッカリの殻の形成過程  
左は透過光で撮影したもの。中央はpHの値を疑似カラーで表し、赤いほど高く、青いほど低い。右はカルシウムイオンを赤で表している。480分 (8時間) までの変化を示す



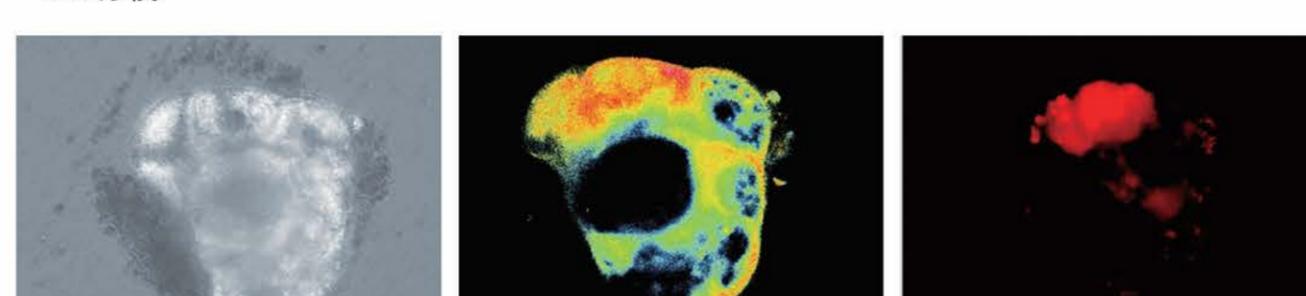
0分 透過光で観察すると、左上に新しいチェンバーの鑄型となる有機膜ができている (矢印)。pHは、まだそれほど高くない。カルシウムもあまり多くない。



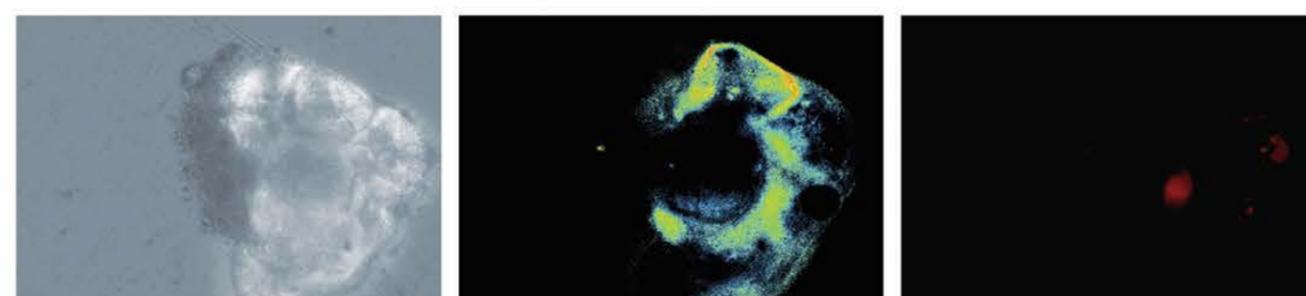
60分後 わずかながら石灰分 (白) が有機膜に沈着しているのが見える。新しいチェンバーの部分でpHが高まり、細胞内のカルシウムも増えている。



120分後 石灰分が厚みを増してきたことが分かる。pHは依然として高く保たれ、カルシウムはさらに増加している。



240分後 殻のかたちがしっかりしてきた。新しいチェンバー部分のpHは少し下がってきたが、その代わりカルシウムが多くpHが高い小胞がめまぐるしく動いている。殻の内側や殻全体の厚みを増すために使われていると考えられる。



480分後 殻形成を終え、移動を始めている。pHは通常に戻り、カルシウムが高い小胞は見られなくなった。

## 殻の形成を観察している様子

奥が豊福TL。「殻がつくられていく様子は、とても繊細で美しい。それが有孔虫の魅力の1つです」

撮影：藤牧徹也



# 有孔虫の殻が過去の海洋環境を雄弁に語る

有孔虫は、およそ5億7000万年前の先カンブリア紀に誕生したといわれ、絶滅したものも含めると約4万5000種が知られている。炭酸カルシウムの殻を持つ有孔虫は、海底に堆積して化石となり、何千万年、何億年の歳月を超えて残る。

有孔虫は生きている生物としてよりも、過去の海洋環境を知ることができる化石として研究が進んできた。有孔虫は環境が変わると生息する種の組み合わせが変わる。堆積物に含まれる有孔虫の種類を調べることで、その時代のその海域が暖かったのか冷たかったのか、浅かったのか深かったのか、栄養が豊富だったのか乏しかったのかなどを推測することができる。

さらに、殻をつくる元素は海水中から取り込まれるため、殻に含まれるマグネシウムやストロンチウムなどの微量元素や、酸素や炭素の同位体比を調べることで、その有孔虫が生きていた時代の海水の化学組成や水温、塩分、栄養分の濃度などを推測することができる。「浮遊性有孔虫の殻には

表層の情報が、底生有孔虫の殻には深層水の循環や海底の情報が記録されています。両方の情報を統合することで、過去の海洋環境の変遷を推測することができます」と豊福TL。

有孔虫の殻の解析から得られた最近の成果を1つ紹介しよう。地球環境変動領域 古海洋環境研究チームの岡崎裕典 招聘主任研究員らは、北太平洋のさまざまな海域から採取した海底堆積物に含まれる有孔虫の殻を解析。注目したのは、質量数14の炭素14である。炭素14は放射性同位体で、約5,730年の半減期で崩壊していく性質を持つことから、年代測定に利用されている。炭素14は宇宙線が大気と衝突することによってつくられ、海水に溶け込み、有孔虫の殻にも取り込まれる。岡崎招聘主任研究員らは、海底堆積物中の浮遊性有孔虫と底生有孔虫の殻の放射性炭素年代を測定。すると、最終氷期の初期にあたる約1万7500~1万5000年前の堆積層では、浮遊性有孔虫と底生有孔虫の放射性炭素年代の差が小さくなっていることが明

らかになった。

この結果は、その時期には北太平洋で海水の沈み込みが活発に起きていて、表層の海水が速やかに深層へ運ばれていたと解釈できる。活発な沈み込みがない場合、表層の海水が深層に届くまで長い時間がかかる。その海水に含まれる炭素14を取り込んだ底生有孔虫の殻の放射性炭素年代は古くなり、浮遊性有孔虫の放射性炭素年代との差が大きくなる。「有孔虫の殻から、過去どこで海水の沈み込みが起きていたか、ということまで分かるのです。海水の沈み込みが起きる場所や強さは、地球全体の気候に大きな影響を与えます。有孔虫の化石は、海洋環境の変動を知ることができるタイムカプセルなのです」と木元技術研究副主幹はいう。

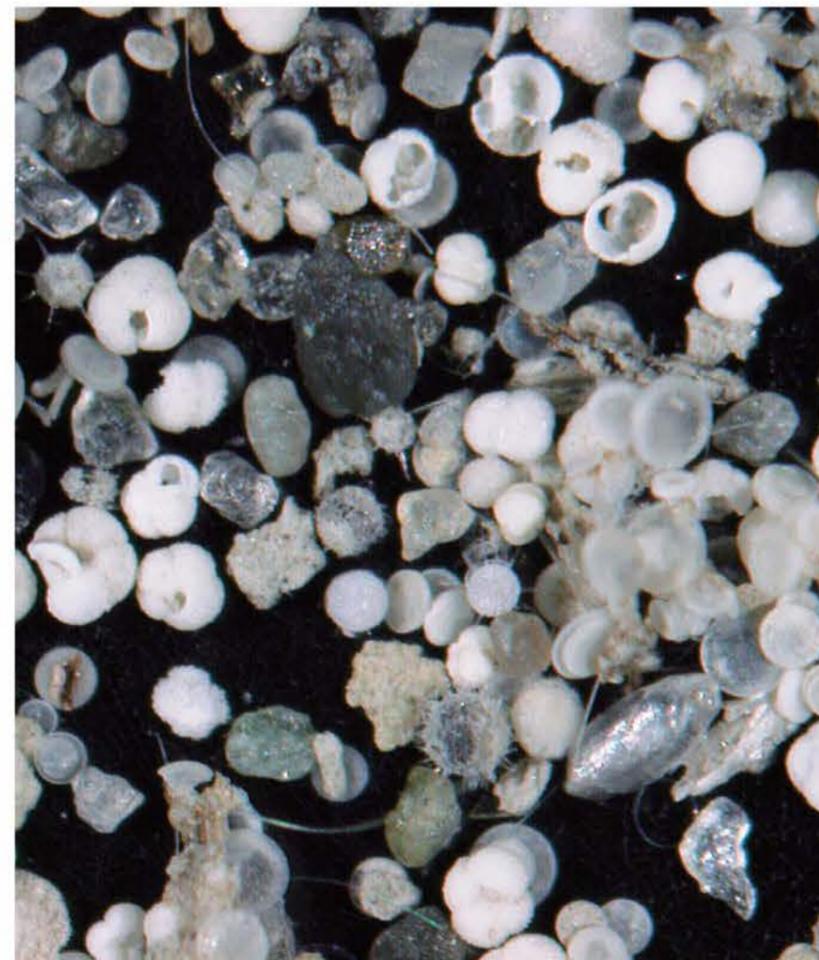
このように有孔虫の殻は過去の海洋環境の復元に使われているが、海洋環境によってなぜ同位体比や微量成分が変わるのか、実はよく分かっていない。「だからこそ、環境を精密に制御して飼育す

ることで、どのような条件のときに殻の化学組成や同位体組成がどのようになるのか、その対応を明らかにすることが不可欠です」と豊福TL。殻の形成メカニズムが分かれば、より高い精度で過去の海洋環境を復元できるようになる。

海洋環境の復元に用いる海底堆積物はピストンコアラで採取することが多い。重りを付けた長さ20mほどのパイプを海中に降ろし、海底面の直上数mから自由落下させて海底に突き刺し、堆積物の層を乱さずに採取する。その堆積物には数十万年分の海洋環境の歴史が刻まれている。木元技術研究副主幹は、「今後は、地球深部探査船『ちきゅう』などによる掘削調査も進めていきたい」と語る。「ピストンコアラでは届かない、より古い時代の海底堆積物を採取できるので、海洋環境の変動をもっと過去までさかのぼって知ることができます。有孔虫が海洋環境の変化とともにどのように適応、進化してきたのか、長い時間スケールで明らかにしていきたいですね」



**ピストンコアラで採取した海底の堆積物**  
過去に起こった海洋環境変化は、海底堆積物に色や化学組成などさまざまな情報として記録される



**ピストンコアラの投入の様子**  
長さ20mもあるパイプをゆっくり海中に降ろしていく。海底面の直上数mから自由落下させて海底にパイプを突き刺し、パイプのなかに海底堆積物を採取する。上部の太い部分は重り

**海底堆積物から取り出した有孔虫の殻の化石**  
有孔虫の細胞質は溶けてなくなってしまうが、炭酸カルシウムでできた殻は海底の堆積物のなかに残る。黒いものは岩片の粒子

# 小さな有孔虫が地球の未来も教えてくれる

有孔虫は過去の海洋環境の記録者として注目されているが、実は、有孔虫そのものが地球の環境形成に深く関わっている。

有孔虫は海水中の炭素を取り込んで炭酸カルシウムの殻をつくり、その殻は海底に堆積し、化石として残る。有孔虫は海洋の表面から海底に炭素を運び、また炭素を貯蔵するという役割を持っているのだ。大気中の二酸化炭素の増加は地球温暖化をもたらす。有孔虫がどのくらいの炭素を海底に運び、貯蔵しているかは、大気中の二酸化炭素の量にも影響を及ぼし、地球の環境を左右するのだ。

「有孔虫は小さいけれども、数がとても多い。炭素だけでなく、さまざまな物質循環に深く関わっています」と土屋TL。

JAMSTECでは物質循環における有孔虫の役割

を明らかにするため、独自に開発した現場培養装置などを使った研究を進めている。具体的には、炭素同位体の炭素13で目印を付けたグルコースや窒素15で目印を付けた珪藻を用意し、海底の生物がその餌をどのくらいの速度で、どのくらいの量を取り込むかを調べる。有孔虫は、体重あたりの珪藻の摂取量がほかの真核生物やバクテリアよりはるかに大きいことが明らかになってきた。

有孔虫に取り込まれた珪藻など植物プランクトンの有機物部分は、分解されて栄養塩や二酸化炭素となり、海洋表層に運ばれる。それを植物プランクトンが利用して有機物をつくり、成長する。それが繰り返されている。体重あたりの珪藻の摂取量が大きい有孔虫は、物質循環において中心的な役割を担っているといえるだろう。

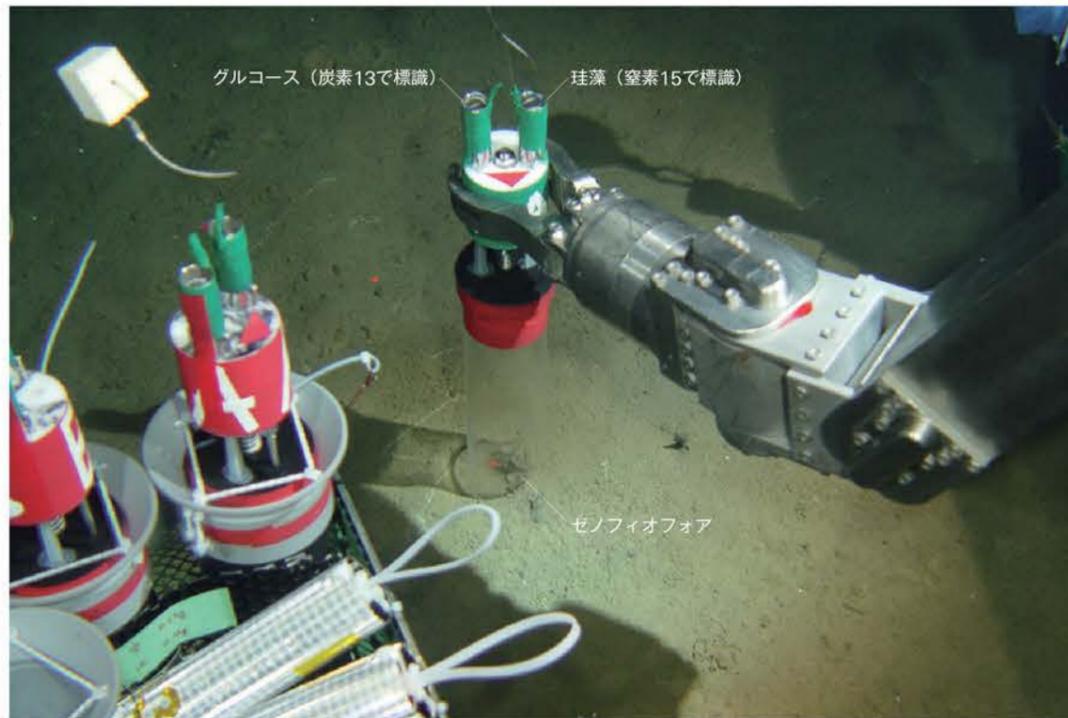
その有孔虫に危機が迫っている。海洋酸性化だ。海水が酸性になるわけではないが、大気中の二酸化炭素の増加に伴って海洋が大量の二酸化炭素を吸収し、海水のpHが下がることを海洋酸性化と呼ぶ。海水のpHが低くなると炭酸イオン濃度が低下し、有孔虫など炭酸カルシウムの殻をつくる生物は、殻をつくりにくくなったり、殻が溶けてしまったりすると考えられている。しかし木元技術研究副主幹は、「海洋酸性化によって生物にどのような影響が起きるのかは、実はよく分かっていません」と指摘する。そこで、木元技術研究副主幹は、二酸化炭素濃度が異なる海水で有孔虫を飼育し、海洋酸性化によってどのような影響が出るかを詳細に調べる研究を進めている。

しかし、殻の外観を観察したり質量を量ったり

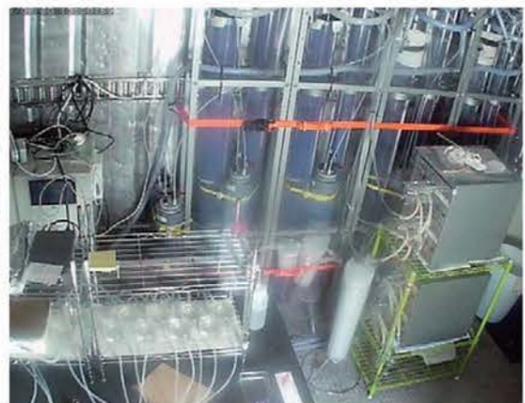
するだけでは、わずかな影響は分からない。そこで海洋酸性化の影響を評価する手法としてマイクロフォーカスX線CTスキャナーが有用だと期待されている。外観からは分からないわずかな密度変化も詳細に捉え、数値化することができるからだ。飼育実験と組み合わせるだけでなく、海洋から採集してきた有孔虫の殻を計測することで、海洋酸性化のわずかな影響も逃さずに監視していく計画だ。

木元技術研究副主幹はいう。「有孔虫は、過去の海洋環境の変遷を雄弁に語ってくれます。さらに、未来についても知らせてくれます。私たちは、この有孔虫という生物についてもっと知り、その声に耳を傾けなければいけないのではないのでしょうか」

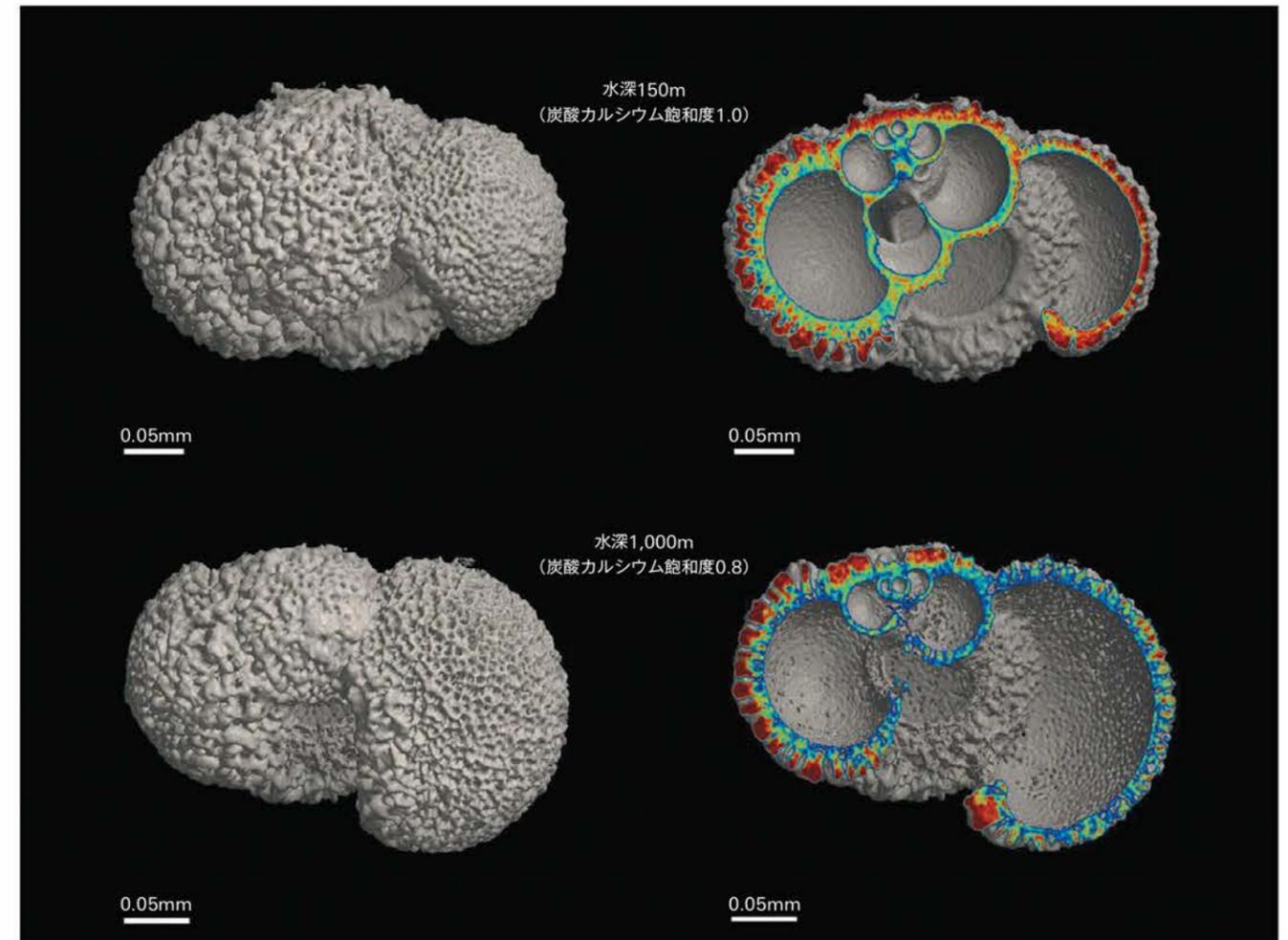
**底生有孔虫ゼノフィオフォアの現場培養実験**  
炭素13で標識したグルコースと窒素15で標識した珪藻を与え、ゼノフィオフォアがどのくらい取り込むかを調べる



**浮遊性有孔虫の飼育実験室**  
4つの異なる二酸化炭素濃度の海水で浮遊性有孔虫を飼育することができる。奥の円柱状のタワーが任意の二酸化炭素濃度の海水をつくる吸収棟。左の実験台上に載っている水槽のなかで有孔虫が飼育されている。飼育の様子は「浮遊性有孔虫データベース」のサイトでライブ映像を見ることができる



**浮遊性有孔虫データベース**  
現生の浮遊性有孔虫の生体の光学顕微鏡画像や、電子顕微鏡画像、動画を収録している。このような有孔虫のデータベースはほかにはない。新しい種類も随時追加している  
<http://ebcrpa.jamstec.go.jp/rigc/j/ebcrp/paleo/foraminifera/>



**マイクロフォーカスX線CTスキャナーによる有孔虫の殻の計測**  
上は水深150m、下は水深1,000mで採取した浮遊性有孔虫。左は表面形状、右は密度を示し、赤いほど密度が高く、青いほど密度が低い。海洋では水深が深くなるほど、炭酸カルシウムに対する飽和度(Ω)が小さくなり、1より小さくなると未飽和となって溶解が進む。飽和度が1である水深150mの有孔虫の殻は密度が高い。飽和度が0.8である水深1,000mの有孔虫の殻は密度が低く、炭酸カルシウムの溶解が進んでいることが分かる。海洋酸性化が進むと、水深150mでも水深1,000mと同じような状況になる可能性がある

JAMSTEC/東北大学総合学術博物館

# 白い宝石——オーストラリアン スノークラブ

■ Information: すさみ海立エビとカニの水族館  
〒649-3142 和歌山県西牟婁郡すさみ町江住 日本童謡の園公園内  
TEL 0739-58-8007  
URL <http://www.aikis.or.jp/~ebikani/>

世界初、日本初、そういう言葉が好きだ。エビやカニだけに注目した水族館は、日本にはもちろんない。その名も、すさみ海立エビとカニの水族館。紀伊半島の南端に位置する和歌山県すさみ町の基幹漁業の1つは、イセエビの刺し網漁。その刺し網には、イセエビ以外のエビやカニがたくさんかかる。市場に出せなかった商品価値のないエビやカニをJR見老津駅の待合室に展示してみた。すると、それまで1日50人ほど

か乗り降りしていなかった無人駅に、年間1万人が訪れるようになった。それが今の水族館へとつながるきっかけになった。さらに、水族館の目玉になるように、日本初の生きものを展示したい。そこで目を付けたのが、真っ白なカニだった。

十数年前、オーストラリアのシドニー水族館を訪れたとき、その白いカニに出会った。オオエンコウガニというカニの仲間で、水族館ではオーストラリアン スノークラブと呼んでいる。

カニは赤いのが常識だが、このカニはアスタキサンチンという赤色素を持たないために、白い。調べてみると、日本ではどこも展示していない。これはいい。つてをたどってシドニーの魚市場の人と知り合いになった。捕獲したら、連絡をくれるようにお願いした。

連絡が入ったのは、お願いしてから半年後の5月。このカニは水深800~1,000mの深海にすんでいるため、それほど簡

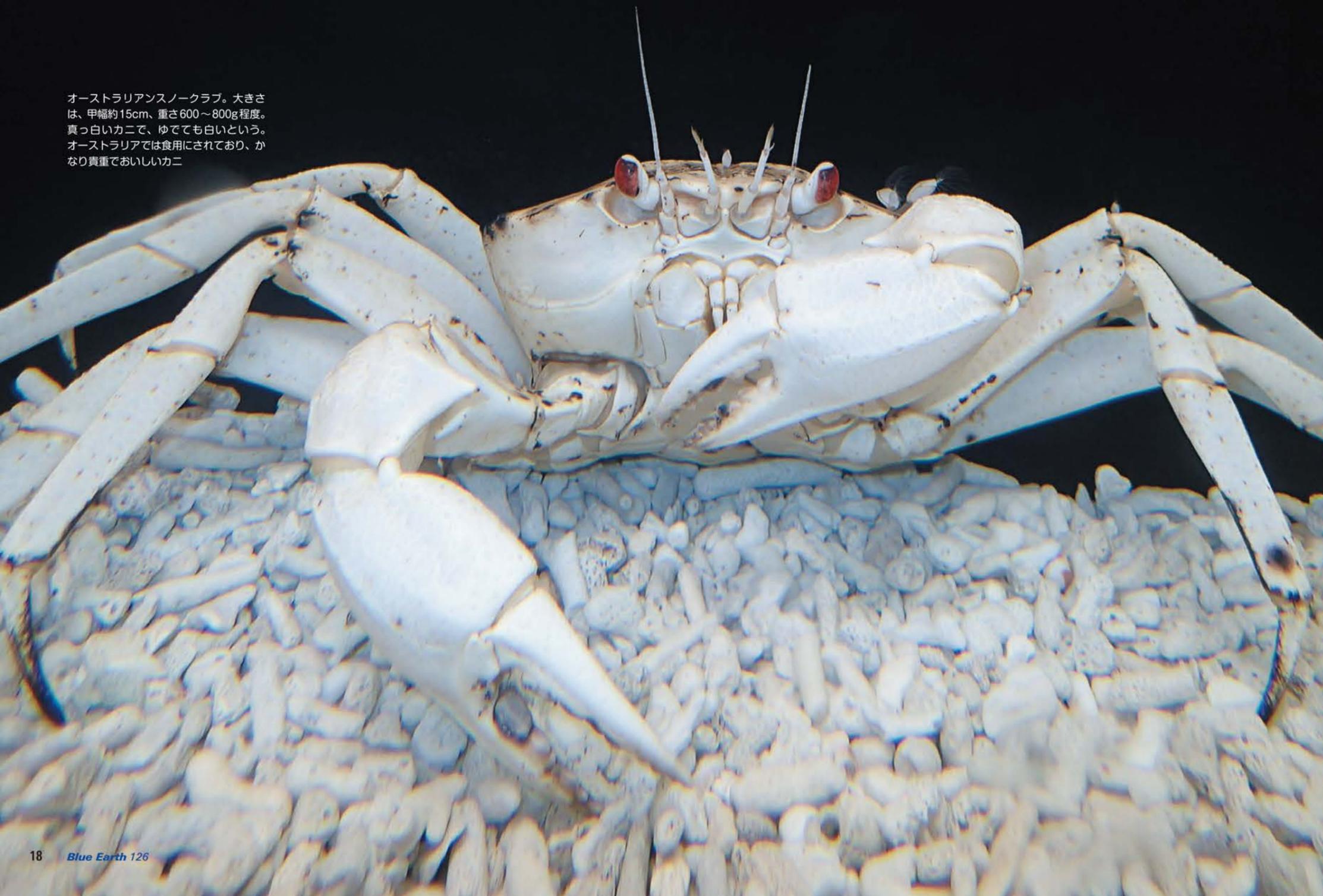
単には入手できない。まさに白い宝石だ。

初めて入手できたオーストラリアン スノークラブは、貴重なカニなのであまりいじらない方がよいと思い、甲羅などを洗わずにいた。すると、藻が生えてきて髪の毛のようにふさふさになってしまうという事態になった。現在展示されているオーストラリアン スノークラブは4代目。もう甲羅に藻を生やしてしまうこともない。真っ白な姿は水族館で1、2を争う人気者だ。

すさみ海立エビとカニの水族館は、バックヤードといわれる施設の裏側に展示しない生きものを飼っておくスペースを、ほとんど設けていない。展示数の公称は、80種400個体。そのうち、オーストラリアン スノークラブのような海外から来た生きものをはじめとする常設展示のレギュラーメンバーは、40種ほど。残りはすべて企画展示に合わせて、すさみの海から調達している。すさみの海から手に入れた生きものは、展示が終われば、すさみの海に戻す。バックヤードの予備水槽は必要ない。いわば、すさみの海が天然の予備水槽。だから、この水族館は「すさみ海立」だ。

取材協力：森 拓也 / すさみ海立エビとカニの水族館・館長

オーストラリアン スノークラブ。大きさは、甲幅約15cm、重さ600~800g程度。真っ白いカニで、ゆでても白いという。オーストラリアでは食用にされており、かなり貴重でおいしいカニ



初代のオーストラリアン スノークラブ。貴重なカニなのであまりいじらない方がよいと思い、甲羅などを洗わずにいた。すると、藻が生えてきて髪の毛のようにふさふさになってしまった。あまり動かないカニで、餌はえり好みせず、何でも食べる



# 深海底を覆う泥に息づく生態系を探る



深海底に堆積した泥の  
わずか10cmほどの厚さに、有孔虫やバクテリアなど、  
さまざまな生物が生息し、生態系をつくっている。  
それは地球上で最も広い面積を持つ生態系だ。  
野牧秀隆 主任研究員は、そこにおける生命活動と  
物質循環を調べることで、地球環境の  
過去・現在・未来を探る研究に  
貢献しようとしている。

海洋・極限環境生物圏領域  
海洋環境・生物圏変遷過程研究プログラム  
主任研究員

野牧秀隆

培養実験に使う植物プランクトンを手に  
撮影：藤牧徹也

野牧秀隆 (のまき・ひでたか)  
1978年、長野県生まれ。博士(理学)。  
2000年、静岡大学理学部生物地球  
環境科学科卒業。2005年、東京大  
学大学院理学系研究科地球惑星科  
学専攻博士課程修了。同年、日本学  
術振興会特別研究員。2006年より  
海洋研究開発機構(JAMSTEC)ポ  
ストドクトラル研究員、2009年より  
研究員を経て、2013年より現職

## 虫と化石好きの少年

—子どものころなりたかった職業は？

野牧：小学校1年生くらいのとき、「虫の研究者になる」といっていたそうです。長野県に生まれ育ち、祖母の家がある上村下栗によく遊びに行きました。そこは山の斜面に家がへばりついているような自然豊かなところで、さまざまな種類の虫がたくさんいました。それで自然に虫が好きになったのでしょうか。

小学校低学年のとき、父が家から車で30分ほどの道路沿いの崖へ、化石採りに連れていってくれました。崖から落ちた石を割ると、貝などの海の生き物の化石がたくさん見つかりました。生き物が石になっているという事実をとっても面白く感じました。それ以来、化石が大好きになり、将来は化石の研究者になりたい、と思うようになりました。山に泊まり込んで、天体観測や野鳥の観察をするのも楽しかったですが、それでも化石が一番好きなことには変わりなかったですね。

—星よりも化石に興味があったのですか。

野牧：星は手に取れないので、愛着が湧きにくかったんでしょうね。化石は自分で手に取って感触を楽しみ、観察できるのがいいんです。石の冷たさや質感が大好きでした。

## 深海底の泥と有孔虫に出会う

—大学はどのように選んだのですか。

野牧：生物と化石が好きだったので、生物学と地球科学の両方を学ぶことができ静岡大学理学部の生物地球環境科学科に進みました。そして学部3年生のとき、北里洋教授(現 JAMSTEC 海洋・極限環境生物圏領域 領域長)の研究室に入りました。

そこでは、主に有孔虫の研究をしていました。有孔虫は海中や海底にすむ単細胞の真核生物です。殻をつくるので化石に残りやすく、地層の年代決定や古い時代の海洋環境を探る研究など、地球科学でよく使われています。

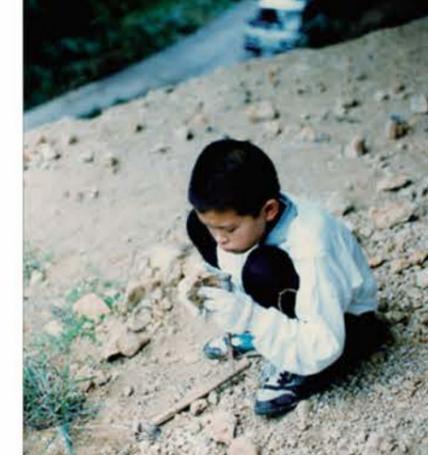
しかし有孔虫は培養が難しいことなどから、生物学ではあまりメジャーな研究対象ではありません。北里研究室では、その難しい培養を行い、有孔虫の生態を探る研究を行っていました。私も学部から船に乗り、深海底の泥を採取して有孔虫の生態を調べる研究を続けてきました。有孔虫という研究対象も、辛うじてですが肉眼で観察できることが、自分に合っているのかもしれない。

## 地球上で最大の面積を持つ生態系

—現在の研究テーマは？

野牧：JAMSTECには、深海底の熱水噴出域や冷湧水域の生物、生態系を調べている研究者が多くいます。ただし、それらは海洋全体で見ると特殊な領域で、深海底の大部分は泥がたまっているだけの場所です。私は、そのような普通の、世界で一番広い面積を持つ深海底の泥の生態系を調べています。ただし主に研究しているのは、せいぜい厚さ10cm。海底面から深度約10cmまでの泥のなかに、有孔虫やバクテリア、線虫、カイアシ類、ゴカイなどさまざまな種類の生物がたくさん生息しています。

その生態系を支える有機物源=餌のほとんどは、海底から数km上にある海洋表層から落ちてくる植物プランクトンの死骸や、動物プランクトンのふんなどです。深海底の生態系にも多様な生物が生息し、生物が複雑に相互作用をしま



小学生のころ、化石採りに夢中になる野牧主任研究員

すが、大本の有機物源がシンプルで、研究がしやすいという特徴があります。

私は特に生物活動と物質循環に注目しています。植物プランクトン由来の有機物を、泥のなかの生物が取り込んでエネルギーを取り出したり自分の体にしたりします。その生物自体や排せつ物を、ほかの生物が餌として利用します。このように植物プランクトン由来の有機物がさまざまな物質に変換されながら次々と生物に利用されていきます。その食物網における物質の流れを、生物ごとに定量的に調べています。

—どのような方法で調べるのですか。

野牧：深海底の現場や船上で培養装置を使って、普通の炭素12 ( $^{12}\text{C}$ ) よりも重い同位体である炭素13 ( $^{13}\text{C}$ ) で標識した植物プランクトンやバクテリアを餌として海底にまきます。何日かたった後にその泥を回収して、たとえば、直上水に含まれる二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の $^{12}\text{C}$ と $^{13}\text{C}$ の同位体比を測定することで、まいた餌がどれくらい分解されて二酸化炭素となったのかが分かります。さらにそれぞれの生物ごとに拾い出して分析したり、特定の生物だけが持つ物質を取り出して同位体比を測定することで、生物ごとに餌をどれくらい取り込んだのかを知ることができます。どの物質に注目して、生態系における何を明らかにするかはアイデア次第。研究者の腕の見せどころです。

## 海洋や大気、海底下生命圏との接点

—なぜ、深海底の物質循環に注目しているのですか。

野牧：海底の生態系は、大気や海洋全体の物質循環において大切な役割を担っているからです。ここまでは炭素の話をし

ましたが、炭素とともに窒素 (N) の循環も重要です。海洋表層の植物プランクトンは、二酸化炭素とともに窒素化合物 (アンモニアや硝酸) などを取り込み、糖類やアミノ酸などの有機物をつくり出します。その有機物によって、深海を含む海洋全体の生態系が支えられています。

その有機物を分解・無機化して、再び植物プランクトンが利用できる栄養塩になっているのが、海中や海底の生態系です。栄養塩の量で植物プランクトンがどれだけ繁殖できるかが決まります。

——海底で分解・無機化された栄養塩は、どのようにして植物プランクトンが生息する表層へ運ばれるのですか。

野牧：海底で分解・無機化された栄養塩は、海洋の循環に取り込まれ、やがて表層へと湧き上がります。長い時間スケールで見ると、海底の生態系は、海洋全体の物質循環や生態系に大きな影響を及ぼしているのです。

海底で有機物が分解・無機化される量が増えれば、やがて海洋表層や大気へ運ばれる二酸化炭素が増えて、気候にも影響を与える可能性があります。逆に海底で分解・無機化される量が減れば、有機物は海底にどんどん堆積して、そこに含まれる炭素や窒素は何万年にもわたり海洋や大気から隔離されます。数万～数百万年という地質学的な時間スケールで見ると、海底面での有機物の分解が少し

増減するだけで、炭素や窒素の収支に大きな影響を与えるでしょう。

——海底下の深部にも、たくさんの微生物が生息し、大きな生命圏をつくっていることが分かり始めてきたそうですね。

野牧：その海底下生命圏の主な栄養源は、海底に堆積した有機物です。表層からどれくらいの有機物が降り注ぎ、それが海底の生態系で分解されずにどれだけ埋没するかによって、海底下生命圏の生物量が決まると考えられています。

### 海底生態系を理解するための鍵

——現場培養装置などを使った研究により、どのようなことが分かってきたのですか。

野牧：体重あたりの沈降有機物の摂取量は、有孔虫では海底に生息するほかの生物に比べて10～100倍近くも多いことが分かりました。生態系のなかで有孔虫が占める割合が変わることで、物質循環は大きく変わるはずなんです。

その有孔虫にも、さまざまな種類がいて、泥の深度数mmごとにすみ分けていることも分かりました。降り積もったばかりの有機物を主に食べるものや、堆積物中の有機物やバクテリアを食べているものなど、餌にも違いがあります。

食べる有機物の種類と量が違えば、炭素循環も変わります。また、酸素の乏しい環境にいる有孔虫には、呼吸に酸素を使うものだけでなく、硝酸を使うものも

います。すると、有孔虫の呼吸が、窒素循環にも大きな影響を与えることになります。このように、生物がどのような環境でどのような生活をしているかを知ることが、海底の物質循環を知る鍵になります。

私がこれまで重点的に調査してきたのは相模湾の深海底です。そこにすむ有孔虫やバクテリアがどれくらい有機物を摂取し、二酸化炭素や栄養塩として無機化するのか、具体的な数値を明らかにすることができました。

では、ほかの海域の海底ではどうなのか。相模湾で得られた知見は、ほかの海域ではどれくらい一般性があるのか。世界中の広大な海底をくまなく、相模湾のように詳しく調べることは、事実上不可能です。たとえば、沈降する有機物の量や、そこにすむ有孔虫の割合を調べれば、その海域の海底生態系の物質循環を推定できるかもしれません。さまざまな環境の海域で調査を行い、海底の生態系を規定する要因を探っていきたいと思っています。

### 環境変動で

#### 生態系と物質循環はどう変わるのか

——今年9月と11月には、有人潜水調査船「しんかい6500」でグアム島東方や赤道域の海底を調査するそうですね。

野牧：相模湾はたくさんの有機物が沈降する海底です。一方、グアム島の東方は北太平洋環流という流れがある海域で、

表層の植物プランクトンが少なく、沈降する有機物量が乏しい海底です。

これまでの現場培養装置を使った実験では、その場所の現状の量に合わせて<sup>13</sup>Cで標識した餌をまいて調べていました。今回の航海では、それに加えて、有機物に乏しい海底に相模湾で降っているようなたくさんの餌をまいたときに、生態系の物質循環がどう変化するのかを調べる予定です。

また、太平洋の北の方の植物プランクトン群集は珪藻のような大型プランクトンが多いのに対して、グアム島東方沖のような貧栄養の海域では、シアノバクテリアのような小型プランクトンが多く見られます。沈降する植物プランクトンの種類が変わると海底の物質循環にどのような影響が出るのかなども、今後、探っていきたいと考えています。

——JAMSTECの原田尚美チームリーダーたちは、世界有数の豊かな生態系であるベーリング海において植物プランクトンの優占種が珪藻から円石藻へ変化しつつあることを発表しました (2012年6月19日プレスリリース、本誌120号「特集」参照)。

野牧：その原因として、地球温暖化や海洋酸性化が指摘されています。深海底に沈降する有機物が、珪藻由来の物質から円石藻由来の物質に変化するとどうなるのかなど、今後起き得る環境変動を実験的に起こして、海底生態系に与える影響を探りたいと思います。

——JAMSTECの額織慎也主任研究員たちは、観測データとコンピュータ・シミュレーションによる解析により、南極周辺の深層の水温が上昇していることを突き止めました。深層の水温上昇はほかの大洋にも広がっているそうですね (2011年3月5日プレスリリース、本誌118号「私が海を目指す理由」参照)。こうした変化も、海底の生物や物質循環に影響を与えるのでしょうか？

野牧：深層の水温上昇により、海底の泥にすむ生物の活動が活発化して分解・無機化が促進され、栄養塩などの量が増える可能性があります。ただしそのとき、栄養塩を取り込んで増殖する化学合成細菌の活動も活発化すれば、増えた分の栄養塩が海底の泥のなかで消費されるかもしれません。すると深層循環に取り込まれる栄養塩の量は変わらないことになります。水温上昇により海底の複雑な生態



現場培養装置。炭素13で標識した餌をまいて、物質循環を調べる



「海底から引き上げられてきた泥の試料を手にすると、わくわくします」と語る野牧主任研究員

系が実際にはどう反応するのか、培養実験などにより確かめることができます。また、地中海のような水温の高い深海底を調べることで、何かヒントが得られるかもしれません。

——そのような環境変動により有孔虫の種類や殻のかたちがどのように変わるのが分かれば、有孔虫の化石から過去の海洋環境を復元する研究にも貢献できますね。

野牧：“この種類はこういう生態を持つそうなので、この時期の深海底の環境はこうだったのだろう”というように、私たちが明らかにした有孔虫の生態に関する論文を古環境の専門家たちが引用してくれています。

数千万年前には、実際に深海の水温が高かった時代もあります。そういう時代に生きていた有孔虫と、現在暖かい深海に生きている有孔虫を比較すれば、地層中に見られる有孔虫の群集変化が何によって起きていたのかも探ることができます。

私自身は、現在の海底生態系を理解することを一番の目的にしていますが、自分の研究成果が、過去や未来の地球を探

る分野にも貢献できればうれしいですね。

### 海へ行かなければ分らない面白さがある

——研究の面白さを感じる時は？

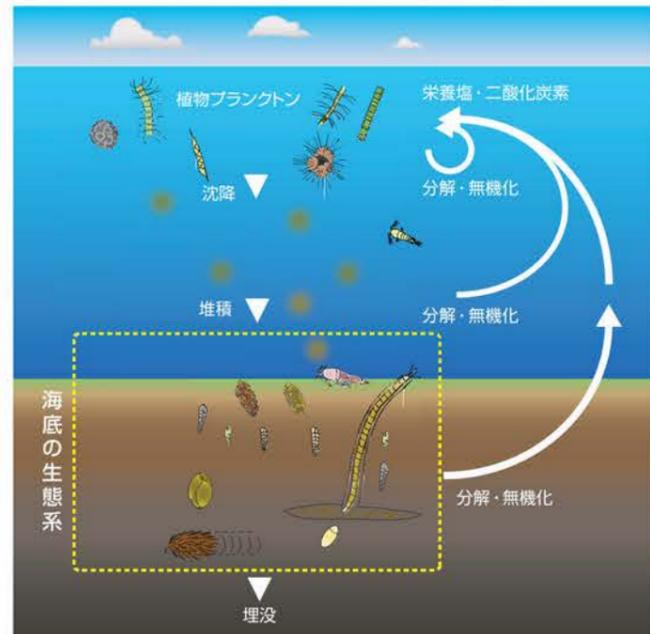
野牧：面白い実験結果が出たときもうれしいのですが、実際に海に行き、泥や生物を手にした時、「しんかい6500」などに乗り込んで海底を直接見たりすることが、楽しいですね。普通の海底も、よく見ると巣穴や生物が食べ残した餌があり、変化に富んでいます。どこで調査すべきか、そこで何を調べるべきか、海底の泥の状態を見て初めて気付くこともたくさんあります。

研究航海には異なる分野の専門家が乗り込み、互いの長所を生かして1つの目標に向かって調査を進めます。それも海洋研究の大きな魅力です。

実は、私は船にとっても酔いやすいのですが、毎日薬を飲んでしのいでいます。船酔いしてでも行きたくなる面白さが、海にはあります。

BE

海洋から海底下生命圏への移行ゾーン——海底の生態系と物質循環



相模湾水深1,430mの海底の泥に生息する生物



植物プランクトン由来の有機物が海中や海底で分解・無機化され、栄養塩や二酸化炭素となる。それらの物質は深層循環などによって海洋表層へ運ばれ、植物プランクトンに利用される。海底で分解・無機化されなかった有機物は埋没して長期間地層中に隔離されるとともに、海底下生命圏の栄養源となる



# コンピュータと人をつなぐ 可視化技術の最前線

コンピュータ・シミュレーションと聞いて、  
きれいな画像や動画を思い浮かべる人も多いだろう。  
しかし、シミュレーションの結果は膨大な数字の羅列  
として出てくる。そのままでは、専門の研究者でも  
理解することは難しい。膨大な数字から情報を引き出して  
画像をつくる、つまり可視化することで、理解し、  
解析できるようになる。コンピュータと人をつなぐ  
可視化の最前線を紹介しよう。

## ■ 仮想世界に入り込むBRAVE

「最近では3D映画や3Dテレビが一般的になり始め、皆さんも立体画像を見た経験があるかもしれません。しかし、それらとBRAVEはまったく違います」と荒木文明グループリーダー (GL)。

BRAVEは、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 地球シミュレータセンターにある没入型バーチャルリアリティ装置の愛称だ。正面と左右の壁、床の合計4面のスクリーンで囲まれた空間になっている。BRAVEは、3D映画とどう違うのだろうか。「3D映画は画像が飛び出して見えるだけですが、BRAVEでは、立体画像の横や後ろに回り込んで見たり、下に潜って見たり、なかに入ってしまうこともできます。仮想世界のなかに完全に没入できるので、臨場感は3D映画とは比べものになりません」

BRAVEは、4面のスクリーンに画像を表示し、立体視眼鏡を使って画像を見る。天井付近に設置されたモーションキャプチャー用カメラが立体視眼鏡に付いているマーカーを捉え、頭の位置と視線の方向を計測して、その位置から見えるべき仮想世界の景色をリアルタイムに映し出す。さらに、スクリーンの境界で画像が連続的につながっているため、空間全体が1つの仮想世界となる。だから、装置のなかをどう動いても自然な立体画像を見ることができるのだ。コントローラーを使って立体画像を操作することもできる。

2012年のJAMSTEC横浜研究所の一般公開で、初めて一般の人に公開したところ、大人気を博した。「立体画像の迫力に歓声が上がリ、予想以上の反響でした」と荒木GL。「この装置は、とても高い没入感を得られるので、科学だけでなく、産業や芸術、教育などさまざまな分野で使われています。私たちは、台風の発達や地球内部のダイナモ現象など、スーパーコンピュータ『地球シミュレータ』を用いてシミュレーション

したデータを可視化するためにBRAVEを使っています。BRAVEを使えば、台風の目のなかに入ったり、地球内部で物質の流れを見たりと、現実には見ることができない視点から観察することができます。それは、シミュレーションデータを解析、理解するための大きな助けとなります」

## ■ 膨大な数値から情報を引き出し、画像をつくる

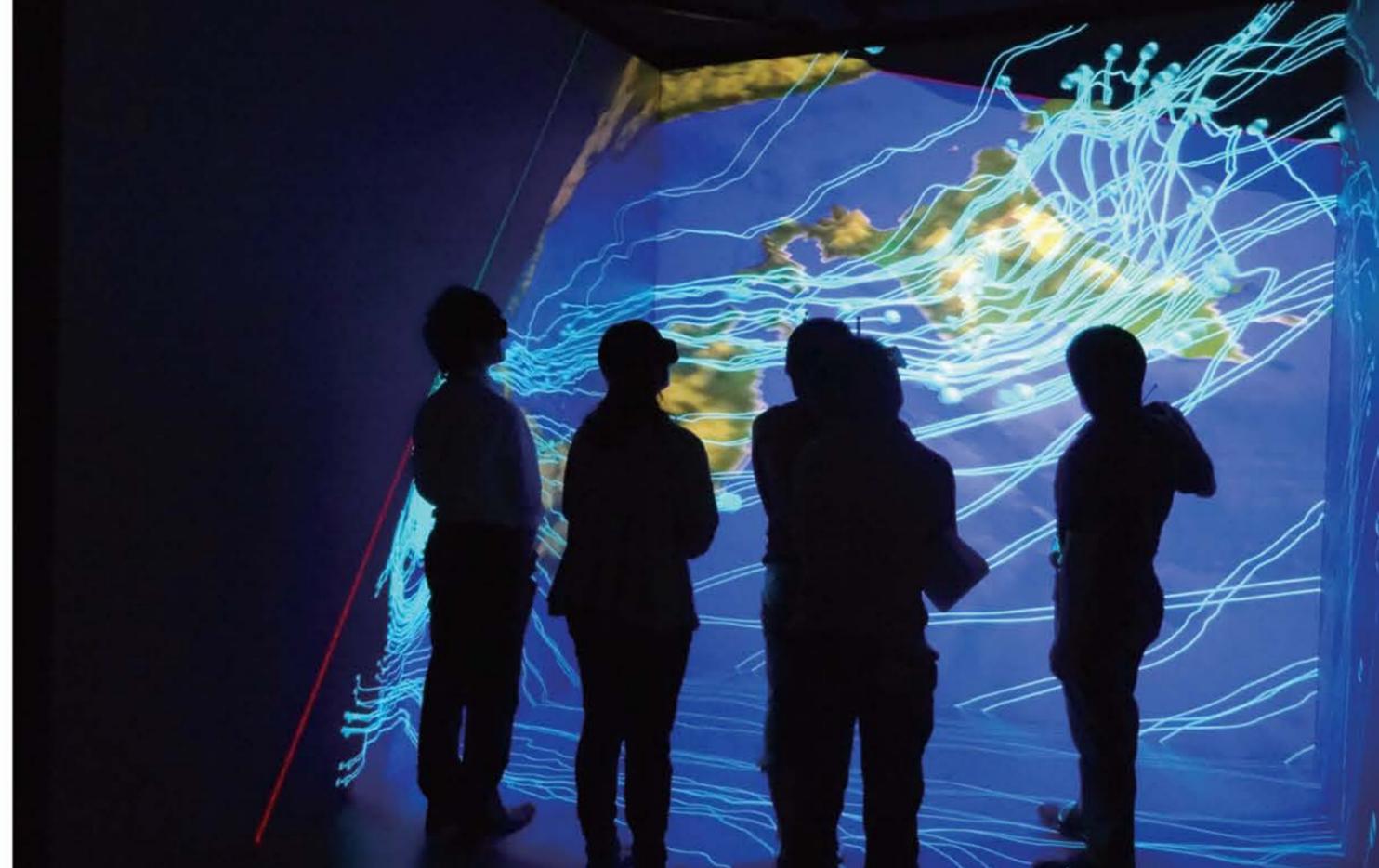
「私たち地球シミュレータセンターシミュレーション高度化研究開発プログラム高度計算表現法計算グループでは、シミュレーションによって得られる膨大なデータから情報を引き出して効率的、効果的に解析するための新しい表現手法を研究しています」

現在の科学ではコンピュータ・シミュレーションが欠かせない。コンピュータ・シミュレーションとは、複雑な現象をコンピュータのなかに再現することである。微小な素粒子も巨大な宇宙も、過去も未来も、再現することができる。

「シミュレーションの結果は画像で出てくると思っている人が多いのですが、そうではありません」と荒木GL。「シミュレーションの結果として出てくるのは膨大な数値の羅列です。それを見ているだけでは何も分かりません。膨大な数値から人が理解できる情報を引き出してくる必要があります。そのための手法の1つが可視化です。可視化、つまり数値を画像にすることで、私たちはシミュレーション結果を視覚的に理解できるようになるのです。可視化はコンピュータと私たちをつなぐ、なくてはならない重要な手段といえます」

BRAVEで表示する立体画像もシミュレーションのデータそのままではない。高度計算表現法計算グループは、シミュレーションデータを可視化する「VFIVE」というBRAVE用のプログラムを開発。それによって初めてBRAVEで表示できる立体画像ができて、あの臨場感、没入感が得られるのだ。

「VFIVEなどこれまでに開発したプログラムを改良していくことも重要ですが、私たちは、次世代の可視化手法の研究にも力を入れています。その1つがビジュアルデータマイニングです。マイニングとは、発掘という意味である。可視化によってシミュレーションデータに隠れた構造や現象を見つけようというのだ。「たとえば、海洋のシミュレーションのデータを見ても、どのような特徴を持った海流が流れているかは分かりにくいです。そこで私たちは、どのようにしたら特徴



没入型バーチャルリアリティ装置「BRAVE」。正面と左右の壁と床、合計4面のスクリーンに立体画像が表示される。各スクリーンの一辺の長さはそれぞれ3m。常時モーションキャプチャー装置で観察者の頭の位置と視線の方向を計測して画像をつくり直しているため、どこを向いても正しく立体画像を見ることができる。写真は、台風による日本列島上空の風の流れ。コントローラーのボタンを押すとテスト粒子が放出され、風の流れを観察することができる

の異なる海流を可視化できるのか、その手法を研究しています。海流を可視化するには、どこが海流で、どこが海流でないかを事前に判別する必要がありますが、問題は何かをもって海流であると特定するかです」

海流とは、同じ向きを持つ海水の流れの集まりである。しかし、流れの速さは場所によって異なるので、流れているというだけでは海流を特定できない。そこで、海流による海面水温の変化に注目。海面水温に色を、流れの速さに色の明るさを与え、海面水温と流れの速さを重ねて同時に表した。隣接する領域より暖かいと赤、冷たいと青、流れが速いと明るく、流れが遅いと暗く、といった具合だ。その結果、海流の特徴的な構造を可視化することに成功した。

「また、クラスタリングという手法でも海流の可視化に挑んでいます」と荒木GL。クラスタリングとは、類似性などに基いて分類をすることだ。「クラスタリングによって、親潮や黒潮といったそれぞれの海流や、それらから分離した渦も抽出することができます」

## ■ いかにも可視化するか

荒木GLは、「可視化するだけでは何も分からない場合もあります」ともいう。可視化によって得られる情報が多過ぎたり複雑過ぎたりする場合、情報の整理も必要である。「何でも可視化すればいいのではなく、ある一部を見えないようにすることで、見たいものが見えてくることもあります。その

さじ加減は簡単ではないかもしれません。研究者のセンスと経験がものをいいます」

そして、荒木GLは可視化には注意をしなければいけないことがあると指摘する。「データ解析のための可視化は、シミュレーションデータから情報を忠実に引き出せるものでなければなりません。見た目をきれいにしたいと思ってしまいがちですが、やり過ぎると科学的に意味のない、人間が勝手に作り出したものになってしまいます。可視化の第一の目的は、見た目の美しさや、それらしく見えることではなく、データのなかから効果的に物理的な性質や原理を引き出すことにあります」

## ■ 考えるときは歩く

可視化の手法を研究するというと、ずっとパソコンのモニターの前に座り、キーボードを操作している姿を思い浮かべるかもしれない。「研究スタイルは人それぞれです。モニター画面をじっと見ているとアイデアが浮かぶ人、キーボードを操作しながら考える人……。私は、歩きながら考えることが多いですね。研究室のなかをウロウロ、廊下をウロウロ。ふと気が付くと、いまだどこにいるのだろうかと思うようなこともあります」

歩き回っているときほど、いろいろなアイデアが浮かんでくるという。これだ!とひらめくと、その全体のイメージをラフスケッチしたり、手順を書いたりして、その後プログラミン

グをする。「これも人によりますが、私はプログラミングにはあまり時間をかけません。時間をかけるのは、アイデアをかたちにするための方策を一からとことん考え抜くところです。いつも研究室を離れてウロウロしているかもしれませんね」

### ■ シミュレーションデータの世界を縦横無尽に探検しよう

『地球シミュレータ』などで得られた成果を一般の人に伝えていくことも、私たちの重要な仕事です。その1つの試みとしてEXTRAWINGというプロジェクトを進め、コンテンツをWebで公開しています」と荒木GL。

EXTRAWINGでは現在、「真夏の都心」と「上陸前の大型台風」の2種類のコンテンツを公開している。いずれも、Google Earthをベースにして、「地球シミュレータ」によって得られた3次元のシミュレーションデータを可視化したものだ。Google Earthをベースにしたのは、バーチャル地球儀としてさまざまな場面で使われ、一般の人にもなじみがあるからだ。しかし、3次元の広がりを持つ数値データをGoogle Earth上で直接表示できる方法がなかった。そこで、研究グループでは「VDVGE」というプログラムを開発。それによって、3次元のシミュレーションデータをGoogle Earthで表示することが可能になった。

EXTRAWINGは、静止画や動画のギャラリーとはまったく違う。マウスまたは画面上のボタンを操作して近づいたり離れたりと、あらゆる角度から見る事ができる。「芸術の楽しみ方は人それぞれですね。EXTRAWINGも自由に楽しんでください。操作は簡単ですから、シミュレーションデータの世界を縦横無尽に飛び回りながら楽しんでほしいです」

### ■ ARとクラウドコンピューティングとシミュレーションの融合

今後、どのようなことに取り組んでいこうと考えているのだろうか。「この5年くらいでインターネットの使い方が大きく変わったと思いませんか」と荒木GL。以前は、インターネッ

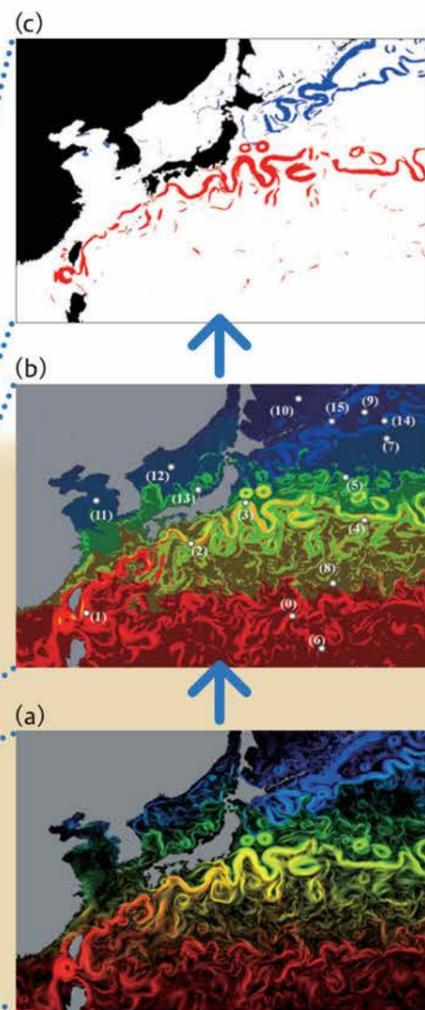
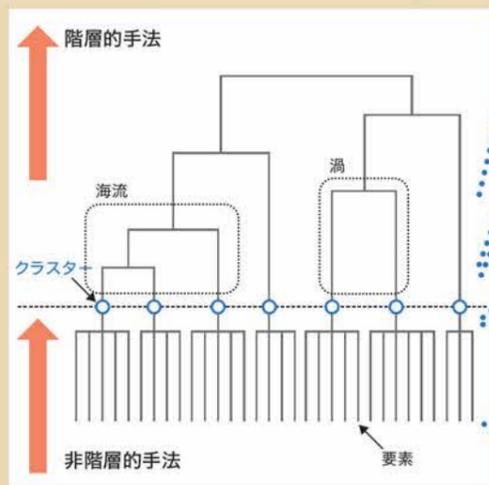
トはパソコンでやるものだった。それがスマートフォンやタブレット端末が普及し、それらを使ってやるのが普通になった。「これからの5年でもさらに大きく変わるでしょう。今後の社会の動向を見据えつつ、研究として意義があることをやらなければいけません。その上で、人の役に立つことであるといいですね。キーワードは、AR (Augmented Reality : 拡張現実感) とクラウドコンピューティングとシミュレーションの融合だと考えています」

スマートフォンやタブレットにはカメラとGPSの機能が付いている。カメラで映し出されている現実の風景に、文字や画像などの情報を重ねて表示することが、すでに可能になっている。これがARと呼ばれる技術である。「文字や画像だけではなく、クラウドコンピューティングでシミュレーションした結果を乗せることができれば、役に立ちそうだと思いますか」。クラウドコンピューティングとは、インターネットなどのネットワークでつながれたコンピュータを利用したり操作したりすることをいう。

たとえば、庭に木を植えたいのだが、日当たりが悪くならないか心配だというとき、そのシステムが役に立つかもしれない。利用者は、スマートフォンのカメラで実際の庭を撮影し、インターネットを経由してネットワーク上のコンピュータに情報を送る。クラウドコンピューティングを利用して、木を植えた場合の日の当たり方についてリアルタイムにシミュレー

### ■ 海流の抽出の例

(a) は、海面水温を色 (赤は暖かい、青は冷たい) で、流れの速さを色の明るさ (明るいほど速い、暗いほど遅い) で表したものだ。さらに類似性などに基づいて分類していくクラスタリングによって、親潮や黒潮といったそれぞれの海流や、それらから分離した渦も抽出することができる (b, c)

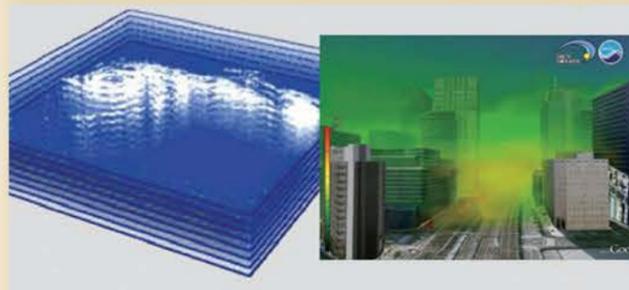


### ■ EXTRAWINGプロジェクト

「地球シミュレータ」によって得られたシミュレーションデータを、Google Earthと組み合わせることで、効果的で分かりやすい3次元での表現を目指している

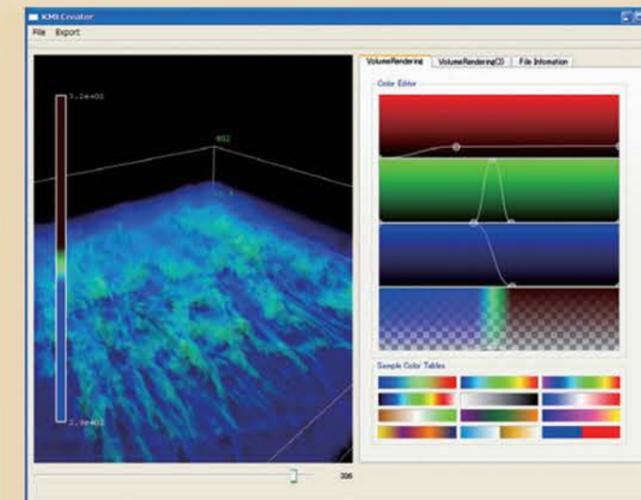
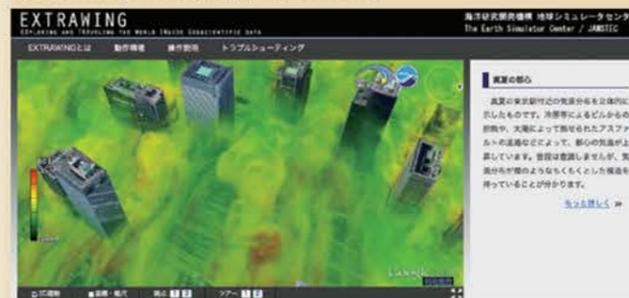
#### (1) 可視化表現

シミュレーションデータからスライス画像をつくり、それを何枚も積層させて3次元を表現。上空からだけでなく、いろいろな方向から観察できる



#### (3) コンテンツ制作とWeb公開

「真夏の都心」と「上陸前の大型台風」の2種類のコンテンツを作成し、Webで公開している。拡大・縮小、回転などをして観察することができる <http://www.jamstec.go.jp/esc/extrawing/>



#### (2) 可視化プログラム「VDVGE」

各数値データに対応した配色と不透明度を適切に与えることで、3次元の広がりを持つ数値データを可視化する



ションを行い、結果を利用者に返す。スマートフォンの画面には木を植えた庭の画像が映し出され、日当たりを確認することができる、というものだ。本数や場所を変えてシミュレーションを行い、結果を比較することもできる。

「既存のシミュレーション結果のなかから最適な画像が表示されるだけでは、最初は物珍しさで使われるけれども、すぐに飽きられてしまうでしょう。利用者が知りたいことを自由にリクエストして、その場でシミュレーションを行い、結果をすぐに受け取れることが重要です」

都市部の気温上昇が問題になっている。街路樹を植えると気温を何℃下げる効果があるか、気温上昇を抑えるにはどこにどのくらいの広さの緑地をつくると効果的か。そういったことをシミュレーションして、都市計画に役立てることもできるだろう。社会に役立つ技術となる可能性が大いにある。

その実現には、どのような課題があるのだろうか。「クラウドコンピューティングで、いかにリアルタイムで高速にシミュレーションを行うかが大きな課題です。『地球シミュレータ』のような大規模なコンピュータもクラウドコンピューティングに利用して、地球や日本全体をシミュレーションしながら、同時に街中や家の周りのような狭い領域でもシミュレーションする、ということが必要になるかもしれません。そのためには、さまざまな時空間スケールのシミュレーションを超高

速で大量に処理できるような情報技術が不可欠であり、正直、できるかどうか分かりません。でも難しいからこそ、JAMSTECで研究する意義があるのです」

### ■ 異分野の可視化画像を重ねて見ることで発見を

「可視化を通じて、新しいことが見えたり分かったりしたらいいなと、期待しています」と語る荒木GLは、さまざまな分野の研究者が参加する可視化のためのワークショップを開催している。たとえば海洋のシミュレーションを研究している研究者はシミュレーションデータだけを可視化して解析し、海洋観測の研究者は観測データだけを可視化して解析する傾向がある。そのワークショップでは、いままでも別々に解析していた複数の画像を重ねて表示することを提案。Google Earthを使うとそれが簡単にできる。「初めて見る画像に思わぬ気づきがあるようで、次はその画像を重ねてみたいなど、皆さんとても興味を持ってきています」

「新しいことが何もなかったところから生まれるのは、まれです。しかし、すでにある物事同士をくっつけたときに生まれることはよくあります。異分野の研究者が可視化画像を持ち寄って統合し議論することで、新しい発見につながるかもしれない。可視化には、そういう力もあります」。可視化は科学の進展を支えている、といっても過言ではない。 BE



図1 日本海溝のプレート境界断層から採取したコア17R

海底下820mから採取。遠洋性粘土層が変形したうこのような破片が密集している。この破片の約90%がスメクタイトという摩擦係数がとても低い粘土鉱物である。東北地方太平洋沖地震ですべった断層であるかどうかは、現在解析を進めている

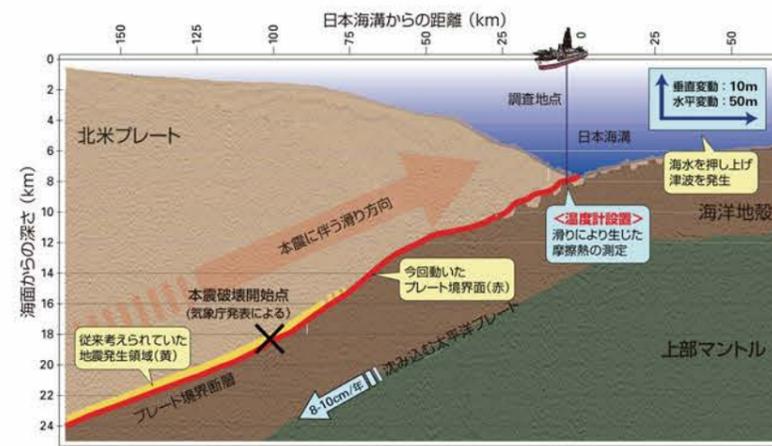


図2 掘削地点の海底下構造の概念図

地震が起きる、つまりプレート境界が壊れてすべるのは海底下10~20kmくらいの領域だと考えられていた(黄)。東北地方太平洋沖地震では、海溝周辺の浅い領域まですべった(赤)。「ちきゅう」は水深6,889.5mの海域で海底下850.5mまで掘削し、プレート境界断層の岩石を採取するとともに、温度計を設置した

# 「ちきゅう」による東北地方太平洋沖地震調査掘削の概要

2013年2月16日 第160回地球情報館公開セミナーより



地球内部ダイナミクス領域  
固体地球動的過程研究プログラム  
付加体力学研究チーム  
チームリーダー

齋藤実篤

さいとう・さねあつ。1965年、秋田県生まれ。博士(理学)。東北大学大学院理学研究科博士課程修了。2001年、海洋科学技術センター(現・海洋研究開発機構)入所。2013年より現職。専門は海洋地質学。「東北地方太平洋沖地震調査掘削」にはロギングスタッフサイエンティストとして乗船。2010年より統合国際深海掘削計画(IODP)の科学技術パネル議長を務める

## JFASTの2つの目的

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震は、東北地方を載せた北米プレートとその下に沈み込む太平洋プレートの境界が一気に破壊され、すべったことで発生しました。すべった領域が南北500km、東西200kmととても広範囲であったため、マグニチュード(M)9.0という超巨大地震になったのです。地震後のさまざまな観測によって、海底の水平方向の移動量は海溝軸に近づくほど大きく、最大50mであることが明らかになりました。海溝周辺の浅い領域が大きくすべったことで巨大な津波が発生したと考えられています。

プレートとプレートの境界には、がちりかみ合っていて普段はまったく動かない部分と、普段からずるずる動いている部分があります。がちりかみ合っている部分は、ある日突然壊れてすべることがあります。それが地震です。突然壊

れてすべる部分を「アスペリティ」と呼びます。アスペリティが広いほど、地震のマグニチュードが大きくなります。これまで、海溝周辺の浅い領域は普段からずるずる動いているため、そこで地震は起きないと考えられていました。ところが東北地方太平洋沖地震では、プレート境界断層のすべりが海溝軸まで突き抜けたのです(図2)。

なぜ断層が海溝軸まですべったのでしょうか。それを理解するために、地球深部探査船「ちきゅう」による「東北地方太平洋沖地震調査掘削」を実施しました。「東北地方太平洋沖地震調査掘削」は、統合国際深海掘削計画(IODP)の第343次研究航海として実施され、英語名のJapan Trench Fast Drilling Projectを略して「JFAST」と呼ばれています。

JFASTには2つの目的がありました。プレート境界断層まで掘削して温度計を設置して温度を計測することと、プレート

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震では、太平洋プレートと北米プレートの境界の浅い領域で50mにも及ぶ大規模な断層すべりが発生し、その結果、巨大な津波が引き起こされました。なぜそのような大規模なすべりが起こり得たのかを理解するため、地球深部探査船「ちきゅう」による「東北地方太平洋沖地震調査掘削(JFAST)」が、2012年4~5月と7月に実施されました。海底下約820mからのプレート境界断層試料の採取や孔内温度観測システムの設置など、この掘削航海で得られた成果を紹介します。

境界断層の岩石を取得することです。断層がすべると摩擦熱が発生します。摩擦熱はどんどん冷めていきますが、余熱を検出することで、地震時に発生した摩擦熱を推定できます。また、断層の岩石を手にする事で、岩石の種類や構造、摩擦特性などを直接調べることができます。発生した摩擦熱や岩石の物性が分かれば、断層にどのくらいの力がかかり、どのようにすべったかを理解できるのです。

どんどん冷めていく摩擦熱の余熱を捉えるには、地震発生後2年以内のなるべく早い時期に温度計を設置する必要があります。私たちは2011年3月の地震発生直後に検討を始め、8月にIODPに提案書を提出し、2012年4~5月に掘削を行い、7月に温度計を設置することができました。提案書の提出から掘削まで3~5年かかるのが普通ですから、異例の早さです。

## 困難を極めた温度計設置

「ちきゅう」は、JFASTの共同首席研究者である京都大学のジェームズ・モリ教授とアメリカ・テキサスA&M大学のフレドリック・チェスター教授をはじめとする10カ国34人の研究者を乗せ、2012年4月1日に静岡県清水港を出港しました。私は、掘削同時検層の専門家として乗船しました。JFASTは5月24日までの54日間の計画でした。

3日目には宮城県牡鹿半島東方沖220kmの掘削地点に到着しましたが、天候が悪く、いきなり待機となりました。5日目から掘削準備に入ったもののトラブル修復に時間がかかり、掘削作業が始まったのは12日目です。

まず、温度計を設置するための掘削に着手しました。温度計を掘削孔に設置するには、最初に、直径50cm、長さ30mの鉄管(ケーシング)を船から降ろし、パイプをつなぎながら海底まで到達させ

ます。ケーシングは孔の壁の崩れを防ぐためのもので、上端には漏斗のようなかたちをした孔口装置(ウェルヘッド)が付いています。ケーシングを海底に埋め込み、パイプを切り離して回収します。次にドリルビットを先端に付けたパイプを海底まで降ろし、孔口装置からリエントリー(再入孔)して掘削を開始。目的の深度まで掘削したら、パイプを回収します。そして、パイプの先端に温度計を付け、孔口装置から掘削孔に挿入します。目的の深度まで温度計を降ろさせた後、パイプを切り離して回収し、孔内温度計の設置が完了します。

リエントリーはとても難しい作業です。例えるなら、3階建てのビルの屋上からシャープペンの芯をつなげて地面に開けた直径5mmの孔に入れるようなものです。水中カメラの映像を見ながら、巨大な「ちきゅう」を南に1m、西に50cmと精密に操縦してリエントリーします。まさに神業です。しかも今回の掘削海域は水深7,000mもあり、さらに海底下を1,000m近く掘削しなければなりません。成功する確率は五分五分といわれたほど、チャレンジングな掘削でした。そして、懸念通り、作業は困難を極めました。

最初に温度計設置のための掘削を行っ



図3 掘削同時検層 (LWD)

掘削同時検層の装置は物理計測部、圧力計測部、発電・データ伝送部から成り、ドリルビットのすぐ上に取り付けられる。掘削しながら、自然ガンマ線、電気比抵抗、孔壁画像などを取得する



図4 LWDのデータの読み方

粘土層には放射性同位体カリウム40が多く含まれるため、自然ガンマ線が高くなる。割れ目が発達していると、その割れ目に水が入り込むため、電気を通しやすくなり比抵抗が低くなる。また、割れ目の分だけ粘土成分が少なくなるので自然ガンマ線が低くなる。かたいチャート層は自然ガンマ線が低く、比抵抗が高くなる

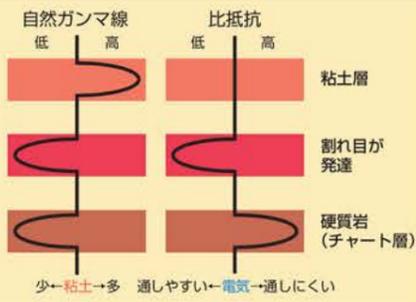


図5 海底下720m付近のLWDデータと採取されたコア

泥岩層中に厚さ1mの比抵抗が低い領域があり、割れ目が発達していることが分かる。断層である可能性が高い



JFAST-8R-1 61~77cm

5cm

### 断層の位置を特定せよ!

C0019Aの孔口装置とパイプの切り離しに失敗した後、トラブル修復の合間を縫って、4月24日からC0019Bで掘削同時検層 (Logging While Drilling: LWD) を実施しました。LWDは、各種計測センサー、バッテリー、発電機などが内蔵された細長い装置をドリルビットの直上に連結し、掘削しながら孔の壁の自然ガンマ線と電気比抵抗を測り、画像を取得します (図3、図4)。

JFASTを成功させるために、LWDは絶対に失敗してはならない作業でした。

海底下に断層があることは分かっていますが、その断層が、どれくらいの深度にあって、どのくらいの厚さなのかは、分かっていません。それが分からなければ、どの深さの岩石を注意深く採取すればよいのか、温度計をどの深さに入ればよいのかを決めることができないのです。

LWDは順調に進み、目的の海底下850.5mに到達しました。水深は6,889.5mであり、総ドリルパイプ長は7,740mとなり、科学掘削における海面下ドリルパイプ長の世界記録を更新しました。

孔壁の画像からは、地層がどの方向に、どのくらい傾いているのかが分かります。解析の結果、海底下720mから地層の傾斜が急になり、820mあたりで水平に戻ることが明らかになりました。海底下720mと820mが怪しい。そこに断層があるのではないかと推定されました。

海底下720m付近のLWDデータを見ると、厚さ1mほどの領域で比抵抗と自然ガンマ線が低くなっています (図5)。比抵抗が低いのは、割れ目がたくさんある場合です (図4)。割れ目に水が入り込み、電気が通りやすくなるためです。また自然ガンマ線は、放射性同位体のカリウム40を含む粘土層で高くなります。自然ガンマ線が低いのは、割れ目が発達している粘土成分が欠損しているか、かたいチャート層の場合です。かたいチャート層では比抵抗が高くなるので、海底下720m付近は泥岩層中に割れ目が発達していると推定されます。断層の容疑者1です。

海底下820m付近のLWDデータも見てみましょう (図6)。海底下820~835mの領域で自然ガンマ線が高くなっていることから、ここに粘土層があることが分かります。海底下835mより下では自然ガンマ線が低く、比抵抗が高いことから、かたいチャート層があると分かります。掘削トルクと回転軸にかかる力の大きさの変化を見ると、粘土層の上部はスムーズです。一方、粘土層の上下では暴れていることから、掘りにくいかたい石があることが分かります。断層はすべりやすいところを選んで突き抜けていくと考えられますから、粘土層の上部が特に怪しい。海底下820m付近が容疑者2です。

### 奇跡のコアを採取

いよいよプレート境界断層の岩石の採

取です。ドリルビットを回転させながら海底下を掘り進み、コアと呼ばれる円柱状の岩石試料を採取します。海底下720mと820mの岩石を確実に採り、チャート層まで掘り進めることが目標でした。

本当は海底下0mから連続して試料を採りたいのですが、時間がありませんでした。岩石採取の掘削に取り掛かったのは5月13日。残された時間は2週間を切っていました。そこで試料採取は648mからにしました。それでも時間がなかったため、途中を飛ばして、重要なところだけ試料を採取するという戦略を取りました。

採取した試料は1R、2Rと順番に番号を振っていきます。普通は9m掘ってコアを船に上げるのですが、今回は9m掘っても上がってくる試料は1~2mでした。石がもろいので、掘っているそばから崩れて詰まってしまうのでしょうか。そのままでは重要な断層を取りこぼしてしまう可能性があります。そこで、海底下720m付近では5mくらいずつ慎重に掘削を行いました。その結果、8Rでは、逆断層の割れ目がたくさん入り、角礫化してばらばらになった泥岩が採取できました (図5)。その上と下のコアは、きれいな泥岩でした。

海底下820m付近ではさらに慎重に2.5mという異例の細かさで掘削しました。そして、17Rで、ぐさぐさで非常にもろい岩石が採取されました (図1)。こんなもろい石がよく採れたものだと、とても驚きました。この17Rは奇跡のコアです。遠洋性粘土岩が変形し、魚のうろこのようなかたちをした破片が積み重なっています。17Rは、まさにプレート境界断層の試料ですが、東北地方太平洋沖地震ですべった断層かどうかは詳しく分析中です。

回収できた17Rの長さは97cmでした。上と下のコアには17Rのような構造が見られないことから、プレート境界の断層帯は最大に見積もって4~5mと考えられます。これまで掘削されたプレート境界断層の例では断層帯の厚さは20~30mですから、東北沖のプレート境界断層は驚くほど薄いことが分かりました。

X線回析分析装置で解析すると、粘土の種類が分かります。17Rのうろこ状の破片を調べると、およそ80%がスメクタイトで構成されていることが分かりました。スメクタイトは水分を取り込みやす

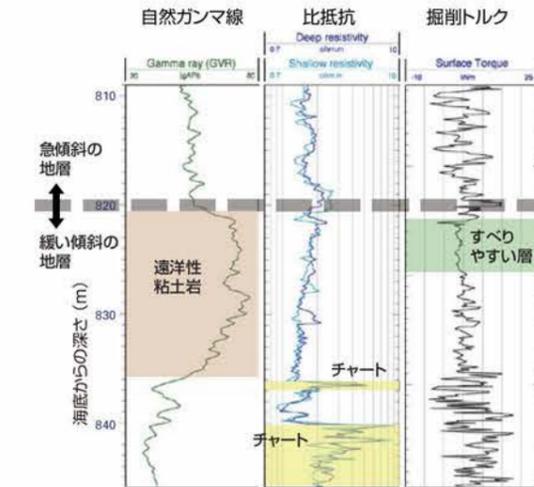


図6 海底下820m付近のLWDデータと掘削トルク

海底下820~835mは自然ガンマ線が高いことから粘土層であり、また掘削トルクから粘土層上部はすべりやすい層であることが分かる。さらに、地層の傾斜が急傾斜から緩い傾斜に変わっていることから、粘土層上部に断層がある可能性が高い

く、保湿性が高く、摩擦係数がとても低いという性質があります。プレート境界断層にこのようなすべりやすい物質があったことが、海溝に近い領域が50mもすべった原因の1つではないかと、私たちは考えています。現在、この断層の岩石試料を用いた摩擦実験などを行っています。

5月22日、日本の広い地域で金環日食が観測されました。15Rを掘削中の「ちきゅう」でも観測会が行われ、とても美しい金環日食を見ることができました。こんなに素晴らしい金環日食を見ることができたのだから、きっといいことがあるに違いない。そう思っていたら、その日に奇跡のコア17Rが採れたのです。

とにかく時間との勝負でした。15Rを掘り終え、海底下820m付近の断層を取りこぼさないようにコアをさらに小刻みにするという決断をした時点で、掘削終了のデッドラインまで30時間。コアを1回採取するには、海底までの7,000mに加えて海底下800mまでパイプを往復させなければいけないので、6時間はかかります。コアを短くすればするほど回数が増えて時間がかかります。間に合うかとヒヤヒヤしましたが、デッドラインぎりぎりに、海底下844.5mのチャート層のコアを採取することができました。最後の21Rのコアが上がってきたときには、研究者は全員デッキに集まり、拍手で迎えました。

### リベンジ。孔内温度計の設置

「ちきゅう」の航海は5月24日に終了しました。しかし、孔内温度計の設置を成功させなければJFASTを達成したことにはなりません。そこで、7月5日から19日

までの日程で、JFAST-IIとして孔内温度計の設置を行いました。リベンジです。

温度計はC0019Dに設置しました。この孔は、水中カメラの通信系統に不具合が出て作業を中止していましたが、孔口装置も孔も健全でした。孔内温度計は全長約820mで、55個の温度計で構成されています。1個が長さ25cm、直径4cmほどの柱状で、それぞれにデータが記録されます。海底下720mと820mの断層周辺に密に温度計を配置しました。

JFAST-Iでは3度トライして3度とも失敗し苦労しましたが、JFAST-IIですんなりと設置することができました。成功するときには、スツとくものですね。

温度計は2013年4月26日に、無人探査機「かいこう」によって回収されました。地震発生から16ヵ月後に温度計を設置し、25ヵ月後までの断層の温度変化を計測することに成功しました。この温度計の回収をもってJFASTが完結しました。現在、温度計のデータを解析しており、その結果から東北地方太平洋沖地震によってすべった断層も確定できると期待されています。また、推定された摩擦熱や地層の物性データなどを解析し、巨大津波を発生させたプレート境界断層のすべりのメカニズムの解明に取り組んでいます。

船長をはじめとする「ちきゅう」の乗組員、地球深部探査センターの技術者・事務方の皆さまの高度な技術と英知があったからこそ、この非常に困難な航海を成功させることができました。皆さまにお礼を申し上げるとともに、東日本大震災からの復興を祈念して、報告を結びます。

## 編集後記

特集「小さな有孔虫が大きな地球を語る」はいかがだったでしょうか？ たった1mmほどの小さな有孔虫の化石の種類や殻に含まれる微量元素などを調べることによって、地球の過去の環境が分かるだけでなく、この存在が将来の地球の環境すらも左右し得るという内容には、とても驚きを覚えました。

このような小さな生物の話題とは反対に、信じられないほど大きな？話題が2013年9月8日付の『Nature Geoscience』に掲載されました。それは、日米の合同チームの調査により、太陽系最大の火星のオリンポス山にも匹敵する大きさの火山が発見されたというものです。場所は、何と日本から東へわずか1,600km、太平洋の海底にあるシャツキー海台の「タム山塊」という巨大な領域です。これまで水深6,000mの海底に約1億4500万年前の噴火で噴き出した溶岩があることは分かっていたのですが、今回、詳細な音波探査を行い、海底を掘って岩石を分析した結果、1つの巨大な火山であると確認できたということです。面積は約31万km<sup>2</sup>で、海底から頂上までの高さは約3,500mもありました。太陽系最大級！というのもすごい話ですが、まだまだ地球の海洋に未知の場所があるのだということを示す好例だと思います。

『Blue Earth』編集部は、地球や海洋に関する新しい知見を読者に分かりやすくお伝えできるようにこれからも努力を続けていきます。そのためにも、読者の皆さまにはぜひ、ご意見ご希望をいただければ幸いです。(T.T.)

## 『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メールかFAX、はがきに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 ③ 所属機関名(学生の方は学年)  
④ TEL・FAX・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300円+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  
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(130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、独立行政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25巻 第4号(通巻126号) 2013年10月発行

発行人 鷲尾幸久 独立行政法人海洋研究開発機構 広報部  
編集人 満澤巨彦 独立行政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(p20-23)/鈴木志乃(p1-17, p24-31, 裏表紙)/坂元志歩(p18-19)  
デザイン 株式会社デザインコンピビア  
(AD 堀木一男/岡野祐三/飛鳥井羊右/山田純一)

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 平成25年9月30日現在

独立行政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	株式会社カイショー
あいおいニッセイ同和損害保険株式会社	株式会社海洋総合研究所
株式会社アイケイエス	海洋電子株式会社
株式会社アイワエンタープライズ	株式会社化学分析コンサルタント
株式会社アクト	鹿島建設株式会社
株式会社アサツディ・ケイ	川崎汽船株式会社
朝日航洋株式会社	川崎重工業株式会社
アジア海洋株式会社	株式会社環境総合テクノス
株式会社アルファ水工コンサルタンツ	株式会社関電工
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
株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所	共立管財株式会社
株式会社エス・イー・エイ	極東製薬工業株式会社
株式会社エスイーシー	極東貿易株式会社
株式会社SGKシステム技研	株式会社きんでん
株式会社NTTデータ	株式会社熊谷組
株式会社NTTデータCCS	クローバテック株式会社
株式会社NTTファシリティーズ	株式会社グローバルオーシャンディベロップメント
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
有限会社エルシャンテ追浜	鉱研工業株式会社
株式会社OCC	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

国際気象海洋株式会社	住友電気工業株式会社
国際警備株式会社	清進電設株式会社
国際石油開発帝石株式会社	石油資源開発株式会社
国際ビルサービス株式会社	セコム株式会社
株式会社コベルコ科研	セナーアンドバーンス株式会社
五洋建設株式会社	株式会社損害保険ジャパン
株式会社コンボン研究所	第一設備工業株式会社
相模運輸倉庫株式会社	大成建設株式会社
株式会社化学分析コンサルタント	大日本土木株式会社
佐世保重工業株式会社	ダイハツディーゼル株式会社
サノヤス造船株式会社	大陽日酸株式会社
三建設備工業株式会社	有限会社田浦中央食品
三洋テクノマリン株式会社	高砂熱学工業株式会社
株式会社ジーエス・ユアサテクノロジ	株式会社竹中工務店
JFEアドバンテック株式会社	株式会社竹中土木
株式会社JVCケンウッド	株式会社地球科学総合研究所
財団法人塩事業センター	中国塗料株式会社
シチズン時計株式会社	中部電力株式会社
シナネン株式会社	株式会社鶴見精機
シーフロアーコントロール	株式会社テザック
清水建設株式会社	寺崎電気産業株式会社
ジャパンマリンユナイテッド株式会社	電気事業連合会
シュルンベルジェ株式会社	東亜建設工業株式会社
株式会社昌新	東海交通株式会社
株式会社商船三井	洞海マリンシステムズ株式会社
一般社団法人信託協会	東京海上日動火災保険株式会社
新日鉄住金エンジニアリング株式会社	須賀工業株式会社
須賀工業株式会社	鈴鹿建設株式会社
鈴鹿建設株式会社	スプリングエイトサービス株式会社

東洋建設株式会社	深田サルベージ建設株式会社
株式会社東陽テクニカ	株式会社フジクラ
トビー工業株式会社	富士ゼロックス株式会社
新潟原動機株式会社	株式会社フジタ
西芝電機株式会社	富士通株式会社
西松建設株式会社	富士電機株式会社
株式会社ニシヤマ	古河電気工業株式会社
日油技研工業株式会社	古野電気株式会社
株式会社日産クリエイティブサービス	株式会社マックスラジアン
株式会社日産電機製作所	松本徽章株式会社
ニッサイマリン工業株式会社	マリメックス・ジャパン株式会社
日本SGI株式会社	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
日本海洋株式会社	株式会社丸川建築設計事務所
日本海洋掘削株式会社	株式会社マルトー
日本海洋計画株式会社	三鈴マシナリー株式会社
日本海洋事業株式会社	三井住友海上火災保険株式会社
一般社団法人日本ガス協会	三井造船株式会社
日本興亜損害保険株式会社	三菱重工業株式会社
日本サルヴェージ株式会社	株式会社三菱総合研究所
日本水産株式会社	株式会社森京介建築事務所
日本電気株式会社	八洲電機株式会社
日本ヒューレット・パカード株式会社	郵船商事株式会社
日本マントル・クレスト株式会社	郵船ナブテック株式会社
日本無線株式会社	ヨコハマゴム・マリン&エアロスペース株式会社
日本郵船株式会社	
済中製鎖工業株式会社	
東日本タグボート株式会社	
株式会社日立製作所	
日立造船株式会社	

## 独立行政法人海洋研究開発機構の事業所

<b>横須賀本部</b>	〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2番地15 TEL. 046-866-3811(代表)
<b>横浜研究所</b>	〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173番25 TEL. 045-778-3811(代表)
<b>むつ研究所</b>	〒035-0022 青森県むつ市大字関根字北関根690番地 TEL. 0175-25-3811(代表)
<b>高知コア研究所</b>	〒783-8502 高知県南国市物部乙200 TEL. 088-864-6705(代表)
<b>東京事務所</b>	〒100-0011 東京都千代田区内幸町2丁目2番2号 富国生命ビル23階 TEL. 03-5157-3900(代表)
<b>国際海洋環境情報センター</b>	〒905-2172 沖縄県名護市宇豊原224番地3 TEL. 0980-50-0111(代表)

## 水深5,000m、400°Cの熱水噴出域へ——カリブ海・中部ケイマン海膨

2013年6月17日～7月3日、有人潜水調査船「しんかい6500」と支援母船「よこすか」は、カリブ海英領ケイマン諸島沖の中部ケイマン海膨における調査を実施。これは、2013年1月から行っている世界一周航海「QUELLE 2013」の一環である。

中部ケイマン海膨には、水深5,000mを超える世界最深の深海熱水域がある。噴出する熱水の温度は400°C近い。この熱水域での有人潜水船による調査は世界初である。6月22日には、ビービ熱水域における「しんかい6500」の潜航調査の様子を動画配信サイトを通じてリアルタイムで中継。このような試みは世界で初めてであり、30万人以上が視聴した。今回の調査では、熱水に極めて高濃度の水素が含まれていること、化学合成生物群集は多様性に乏しいことなどが明らかになった。今後、詳細な研究を行っていく。

「しんかい6500」は8月に一時、日本に帰国して、主電池の交換などを行った。10～11月にかけて、南太平洋のトンガ海溝・ケルマディック海溝の調査を実施する予定だ。



カリブ海・  
中部ケイマン海膨



ビービ熱水域のブラックスモーカー。約400°Cの高温を記録  
フォンダム熱水域で熱水噴出孔から高温の熱水を採取する様子



ビービ熱水域のチムニー。リミカリス・ハイピサイエが群がっている  
フォンダム熱水域のチューブワーム

「QUELLE 2013」特設ページ  
<http://www.jamstec.go.jp/quelle2013/index.html>