

Blue Earth

海と地球の情報誌

ISSN 1346-0811
2011年3月発行
隔月年6回発行
第23巻 第1号
(通巻111号)

2011 1-2 111

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

IODP特集

海底下から 未来を拓け!

深海微生物のエコ生活

2億年後に超大陸が出現

音を使った海中高速通信

砂浜に落ちた小さな星

——ヒトデ

深海のアーキア（古細菌）は究極のエコ生活をしていた

炭素は有機物として生物の体をつくる材料になるとともに、二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスとして地球温暖化の原因物質となる。炭素は大気や海洋、生物、さらには地球内部との間を循環している。地球環境のメカニズムを知る上で、炭素がどこで、どのように、どれくらい循環しているのか、地球規模での炭素循環の解明が欠かせない。

炭素循環で重要な役割を果たしているのがアーキア（Archaea：古細菌）と呼ばれる生物群だ。近年、海洋や海底堆積物におけるその分布域の広がりや生息量が、従来考えられていたよりも、はるかに大きいことが明らかになってきた。海底下1m以深の堆積物中にすむ微生物のうち、平均すると約9割がアーキアだと推計されている。しかし海洋性のアーキアは培養が難しく、その生態はよく分かっていない。

海洋研究開発機構（JAMSTEC）海洋・極限環境生物圏領域の

高野淑識^{よしのの} 研究員たちは、世界で初めて海底でアーキアを培養する装置を開発し、相模湾の水深1,453mの深海底に設置した。そして炭素13という安定同位体で目印を付けたグルコースを餌として与えてアーキアを培養し、数日から1年以上経過後、装置内部の堆積物とともに回収した。

アーキアの細胞膜は、グリセロールとイソプレノイドという成分からなる。回収した堆積物中のアーキアの細胞膜を分析し、餌として与えたグルコース起源の炭素13が、どれくらい含まれているのか測定した。すると、グリセロールには大量の炭素13が含まれていたが、イソプレノイドからはほとんど検出されなかった。

アーキアは、グルコースを食べてグリセロールを体内で合成したが、イソプレノイドはほとんど合成しなかったと考えられる。では、イソプレノイドはどうやって調達したのだろう。

「アーキアは、自分たちの祖先や仲間が合成し、堆積物に残さ

れていたイソプレノイドを細胞内へ取り込んでいることを発見しました」と高野研究員。「イソプレノイドは分子量が大きいので、新しく合成するにはたくさんのエネルギーが必要です。エネルギーの乏しい深海底において、アーキアは祖先が合成したイソプレノイドを細胞膜の材料として再利用する“究極のエコ生活”をしていると考えられる、と『ネイチャー・ジオサイエンス』誌上でも説明しました」

炭素13を用いた分析により、アーキアの成長や増殖の速度が、従来考えられていたよりもかなり速いらしいことも分かってきた。高野研究員たちは、このような研究を進展させることによりアーキアの生態を明らかにし、炭素循環そして地球環境における役割を具体的に解明することを目指している。

*この研究成果は、JAMSTEC海洋・極限環境生物圏領域および高知コア研究センターと、ドイツ・ブレーメン大学の共同研究による
 （取材協力：高野淑識 海洋・極限環境生物圏領域 研究員）

1 **Close Up**
 深海のアーキア（古細菌）は究極のエコ生活をしていた

2 **特集**
IODP特集
 海底下から未来を拓け！

18 **Aquarium Gallery**
 京都大学白浜水族館
 砂浜に落ちた小さな星
 ——ヒトデ

20 **私が海を目指す理由**
 “オールジャパン”の海のロボットをつくらう！
 石橋正二郎
 海洋工学センター 先端技術研究プログラム
 巡航探査機技術研究グループ 技術研究主任

24 **理科からつながる研究最前線**
 大陸移動→マントル対流→地球の歴史
 吉田晶樹
 地球内部ダイナミクス領域 地球深部活動研究プログラム
 マントル・コア活動研究チーム 主任研究員

28 **Marine Science Seminar**
 音を使った海中高速通信
 最新の音響データ伝送技術
 越智 寛
 海洋工学センター 先端技術研究プログラム グループリーダー

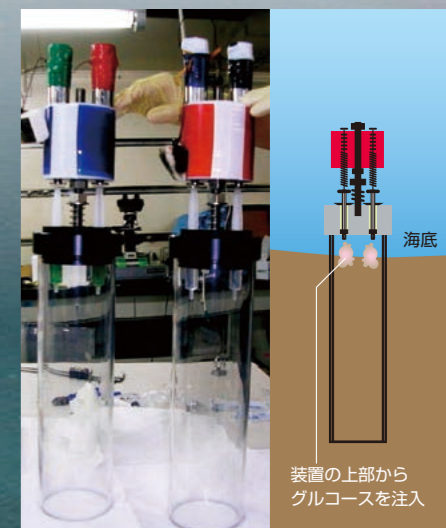
32 **BE Room**
 編集後記
 『Blue Earth』定期購読のご案内
 JAMSTECメールマガジンのご案内



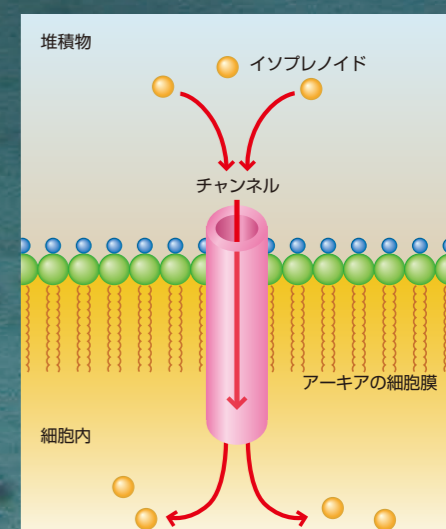
アーキア培養装置

「ハイバードルフィン」のマニピュレータ

JAMSTECの無人探査機「ハイバードルフィン」により、長さ30cmほどの筒状のアーキア培養装置を数本、海底に突き刺して設置した
 （撮影：野牧秀隆 研究員）



アーキア培養装置。海底に突き刺した筒状の装置の上部から、炭素13で目印を付けたグルコースを餌として注入して、アーキアを培養した



アーキアは、堆積物中のイソプレノイドを、細胞膜に埋め込まれたチャンネルから細胞内へ取り込み、細胞膜の材料として再利用していると考えられる

IODP特集

海底下から未来を拓け!

取材協力
地球内部ダイナミクス領域
海洋・極限環境生物圏領域

2003年から始まった国際深海掘削計画 (IODP) は今年で10年計画の8年目、いよいよ大詰めを迎えている。「固体地球の解明」「地球環境変動の解明」「地下生命圏の解明」それぞれの分野でこれまで積み重ねてきた研究成果が続々と報告されつつある。海底下という新たなフロンティアと研究者たちがどう向き合っているのか。それは、私たちの未来とどう関わるのだろうか。この特集で紹介しよう。



統合国際深海掘削計画 (IODP) の10年

取材協力 木下正高 / 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 南海トラフ活動予測研究チーム チームリーダー

統合国際深海掘削計画 (IODP: Integrated Ocean Drilling Program) は、1975年以来行われている国際的な深海掘削計画の流れをくむもので、2003年10月に発足した。それまでの深海掘削計画はアメリカ主導で行われてきたが、IODPは地球科学においてアメリカと日本が対等にイニシアチブを取る最初の計画となった。日本のサイエンスコミュニ

ティーの成熟度がやっと世界に認められたのだ。

この計画では、地震や津波、また環境変動や地下生命圏の存在を科学的に解明することが大きな動機の一つとなっている。IODPという国際的な枠組みを使い、世界の海で海底を掘削してコア（円柱状の試料）を採取し、さらに世界中の科学者の英知を結集して解析することで自

然災害の法則性の芽をつかみたい。科学研究を社会に還元したいという願いが、このIODPの発足を促した。

IODP発足にあたり、2003年から2013年までに行うべき科学計画が同時に設定され、その計画はイニシャルサイエンスプランと呼ばれている。10年間で取り組むべき課題として取り上げられたテーマは膨大だ。この特集では、そのなかのほ

んの一部を紹介する。

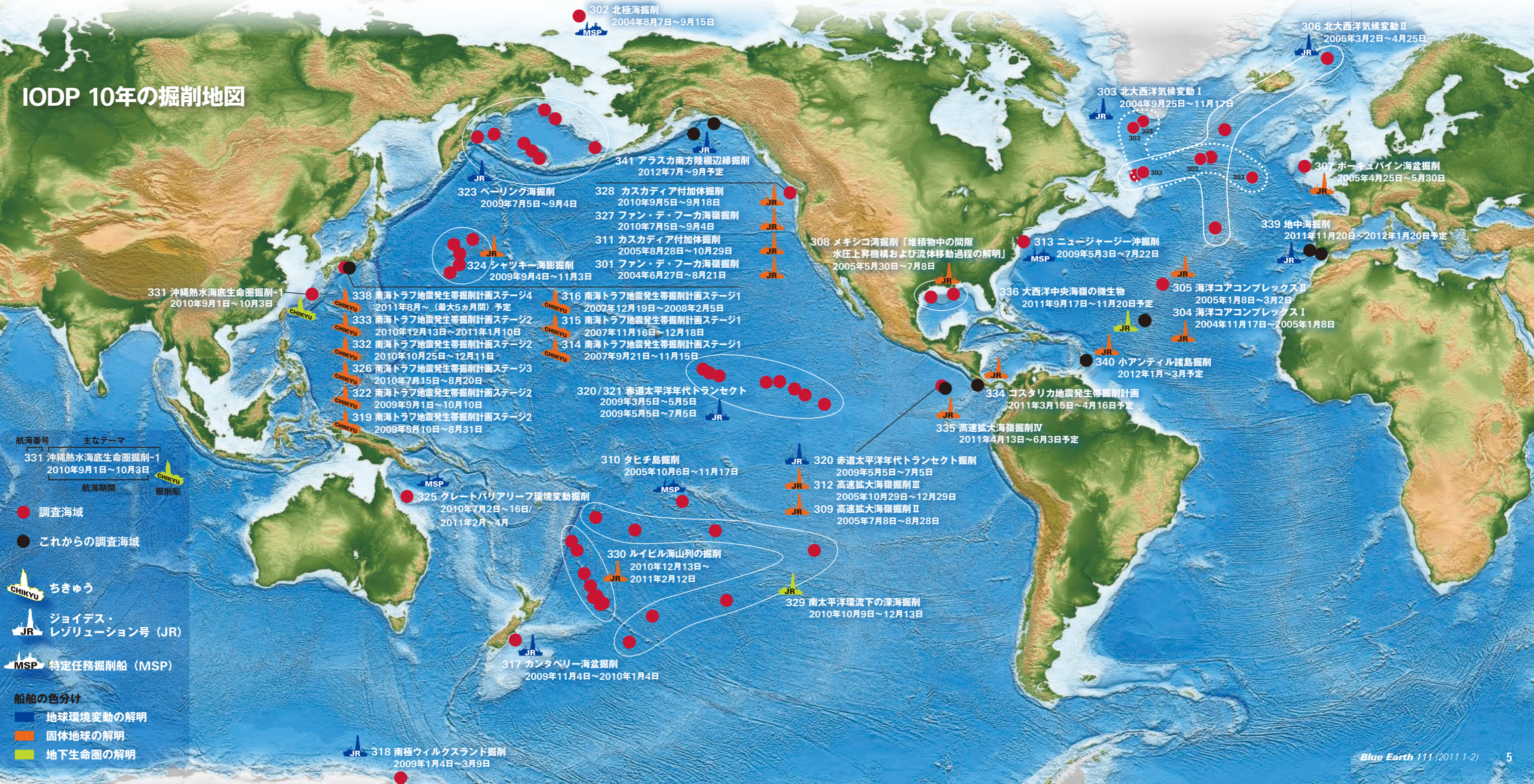
IODPでは、日本の地球深部探査船「ちきゅう」と、アメリカが提供する「ジョイデス・レゾリューション号 (JR)」、ヨーロッパが提供する特定任務掘削船 (MSP: Mission Specific Platform) の複数船を利用して、イニシャルサイエンスプランの実現に向けて深海科学掘削を進行中だ。それぞれの船には特徴がある。JRは、前の深海掘削計画から続く科学掘削のための類まれなる技術を習得した人たちの能力に支えられている。また、MSPは計画の都度、その場所にふさわし

い船を借り上げ、掘削を行う。そのため、北極圏や浅海など、通常的大型船ではなかなか航行できない場所での作業を受け持つ。「ちきゅう」は、これらの船のなかでも最先端の技術を持ち、最も掘削が難しい分野に挑んでいる。主に固体地球と地下生命圏の解明を目的とした、海底下の深い地点への掘削と、地下構造が掘削に不向きな場所での作業が続いている。

このIODPも2013年には一応の区切り、10年目を迎える。現在、IODPの後の深海掘削計画の計画づくりが進められている。今後の計画の中心に挙げられてい

るのは、「気候・海洋変動」「生命圏の最前線」「地球深部・環境相関」「アース・イン・ムーション」だ。過去の気候変動の証拠を深海の堆積物から取り出し、その原因を地球内部での変動と関連づけることを目指す。生命圏については、微生物探査が、生物資源や生命進化の理解のための大きなテーマとなる。また、これまでの固体地球の探査に新たに時間軸を加え、刻々と移り変わる状況をモニターして、地震・津波・地滑り災害や炭素循環のメカニズムを追求することが、大きな挑戦として掲げられる。

IODP 10年の掘削地図





かつて北極海は、よどんだ閉じた海だった

取材協力 坂本竜彦 / 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
地層から読み解く地球生命圏史研究チーム チームリーダー

北極海では一度たりとも、科学掘削は行われていなかった。航海番号302、北極海掘削計画研究チームによって2004年8月から約1ヵ月行われた航海が、北極海での科学掘削という新しい歴史を開いた。準備を始めてから実に10年。ヨーロッパが大中小3隻の特定任務掘削船（MSP）を提供し、それらをフルに使って掘削は遂行された。

海水は大変な強敵だ。最も大きな船はロシアの原子力砕氷船「ソビエツキー・ソユーズ」。この屈強な船でまず巨大な海

氷を割り込む。そこへ中型船の「オーデン」が突入して海水をさらに細かく砕いていき、3隻のなかでは最も小さい「ヴィダー・バイキング」が定点で掘削を行う。海水は動き回り、砕氷したそばから凍り付いていく。この厄介な強敵に囲まれて定点で掘削を続けるためには、常に周囲を2隻の船が砕氷して回らなければならなかった。通常の北極航海のなんと30倍もの航路を走ることで、定点は確保された。それでも、予定していた掘削計画のうちの3分の1ほどしか実現できなかった

のだ。想像以上に北極海での掘削は難しい。

とはいえ、このときの航海で、長さ428mの海底コアを手に入れることに成功した。これは現在から約6550万年前まで、つまり新生代全体の北極海の様子を示す世界初の試料となった。航海から5年がたち、その研究成果が次々と報告されている。最も大きな成果は、北極海の変遷が明らかになったことだ。

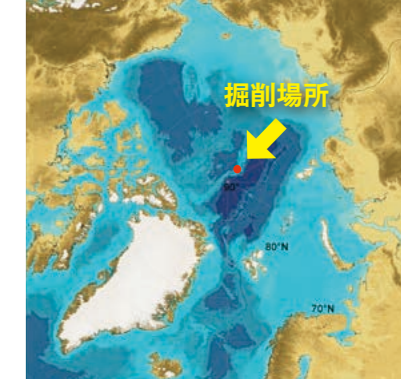
現在でこそ、北極海は開いた海であり、北極点周辺は一年中氷に覆われているも

の、海洋自体は大西洋の海洋循環と深い関わりを持っている。ところが、北極海掘削で得られた試料は、5500年から1400万年前にかけては淡水と海水が混じり合う汽水域のような塩分濃度の低い状態であったこと、特に4500年から1400万年前は湖沼のような閉じた状態であったことを示していた。現在の開いた海になったのは、中新世にあたる1400万年前ごろのことだった。それまで北極海は、現在の黒海のようによどんだ酸素濃度の低い還元的な海だったのだ。現在とはまったく異なる姿をしていたことが明らかになった。

では、1400万年前の還元的状態から、いまのような酸素豊富な海へとどのように変化を遂げたのだろうか？ その点もこの

航海が明らかにした。ちょうどそのころ、フラム海峡部分が大きく開いたのだ。それによって大量の海水が大西洋から北極海へと流れ込めるようになった。それより少し前の時代、3800年から1700万年前にかけては試料がうまく採取できない期間があり、この時期に北極海がどのような状態だったのかはよく分かっていない。しかし、それより前の時代である始新世（5500年から3800万年前）は、いまより温暖化していた時期であり、この時期には大西洋側のフラム海峡は閉じていて、太平洋側のベーリング海峡も閉じていた可能性がある。

またこれまで、南極では3500万年ほど前に氷床が発達したということは判明していたが、北極の様子は試料もなく分



かっていなかった。北極海掘削計画研究チームによる新たな試料が、3500万年前には北極海に海水が発達していたことを解明した。陸地を広く覆う氷床が発達するのは、この時期より後になるが、海水自体はおそらく南極より前の4500万年前くらいにはすでに発達していたことが分かってきた。



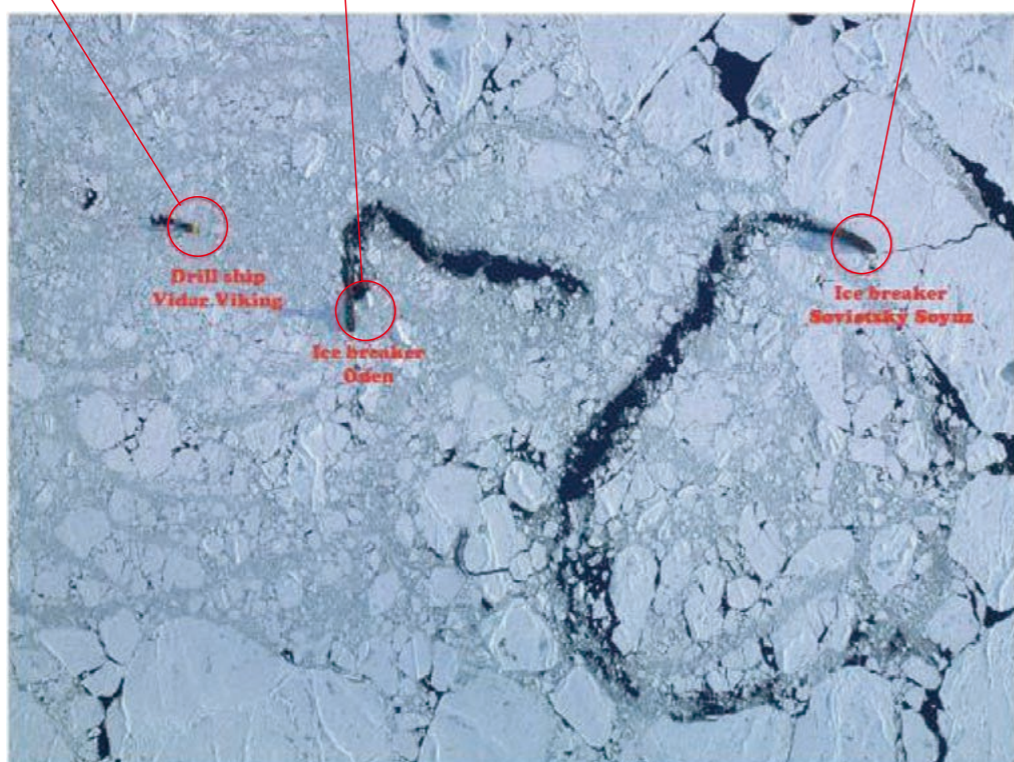
ヴィダー・バイキング

オーデン

ソビエツキー・ソユーズ

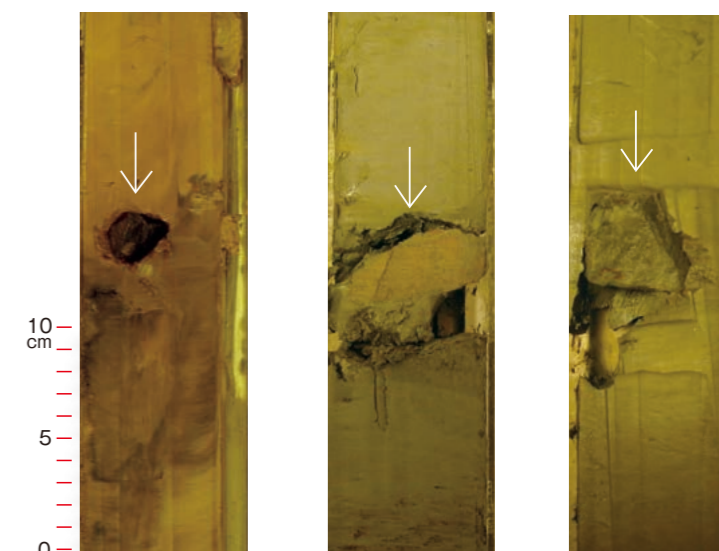
特定任務掘削船による掘削の様子

北極海掘削計画では3隻の船がチャーターされた。一番大きな船「ソビエツキー・ソユーズ」で巨大な海水を割って進み、その後、中型の船「オーデン」がさらに細かく海水を砕く。小さな船「ヴィダー・バイキング」が1点にとどまり、掘削を行った。3隻の軌跡は通常の北極点航海の30倍にも及んだ。それほど、動く海水のある場所で1点にとどまって掘削するのは困難を極めた



3500万年前の北極海

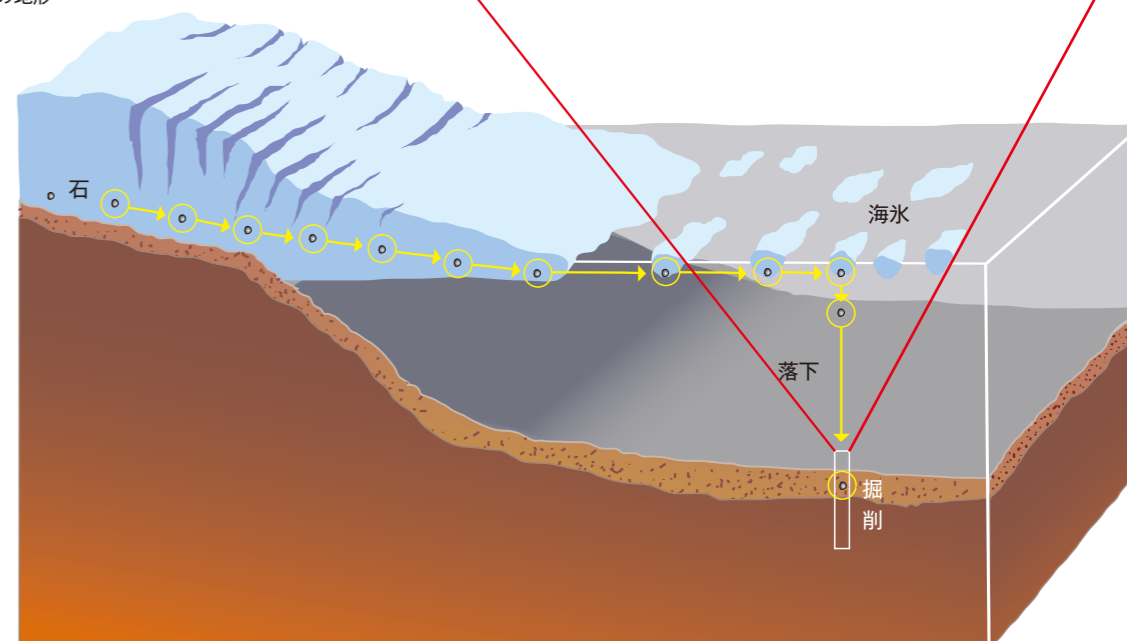
北極海掘削計画の航海によって、こうした想像図が描けるようになった。3500万年前、北極海は現在とはまったく異なる姿をした、暖かな、閉じた海だった可能性が高い



写真提供：坂本竜彦

コア内の石の生い立ち

4500万年前以降の海底コアから上の写真のような石が見つかる。この石は、棚氷や氷河に閉じ込められて陸上から運ばれてきて、海に押し出された海水が遠洋で融けたとき、海底に落下したものである。この石の存在によって、およそ4500万年前には北極海に海水があったことが分かる。ただし、陸上を広く覆う氷床が発達したのは、3500万年前よりも後のことだった





氷期・間氷期サイクルのメカニズムをベーリング海が握る?!

取材協力 坂本竜彦 / 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
地層から読み解く地球生命圏史研究チーム チームリーダー

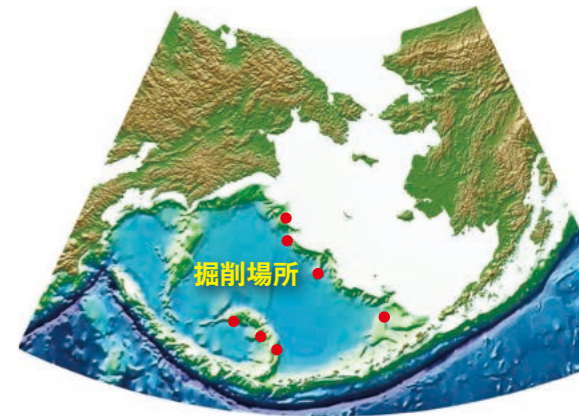
地球温暖化を考えると、高緯度地域がとても重要な意味を持つ。それは、南極や北極などの高緯度地域ほど温暖化の影響を強く受け、変化に敏感に反応するからだ。過去には現在よりもはるかに温暖な時期や寒冷な時期が存在した。過去の気候を詳細に探ることで、生きものや気候を含めた地球という惑星の環境変動メカニズムを明らかにする。古気候の研究にはそうした使命があり、高緯度地域は古気候研究にとって格好の場なのだ。北極海は温暖化研究に適した場所の1つでありながら、これまで十分な研究がな

されてこなかった。北極海と北大西洋の関係は議論されてきたが、ことベーリング海峡を通した太平洋との結び付きについては、よく分かっていなかった。世界の海を結んでいる海洋循環は、気候に大きな影響を与える。こうした海洋循環を考える場合、ベーリング海峡は地球全体の気候システムに大きな影響力を持ち続けてきた可能性が見えてきた。過去500万年間の気候では、約270万年前に北半球で大規模な氷床が形成された時期（北半球氷河化、NHG：Northern Hemisphere Glaciation）が

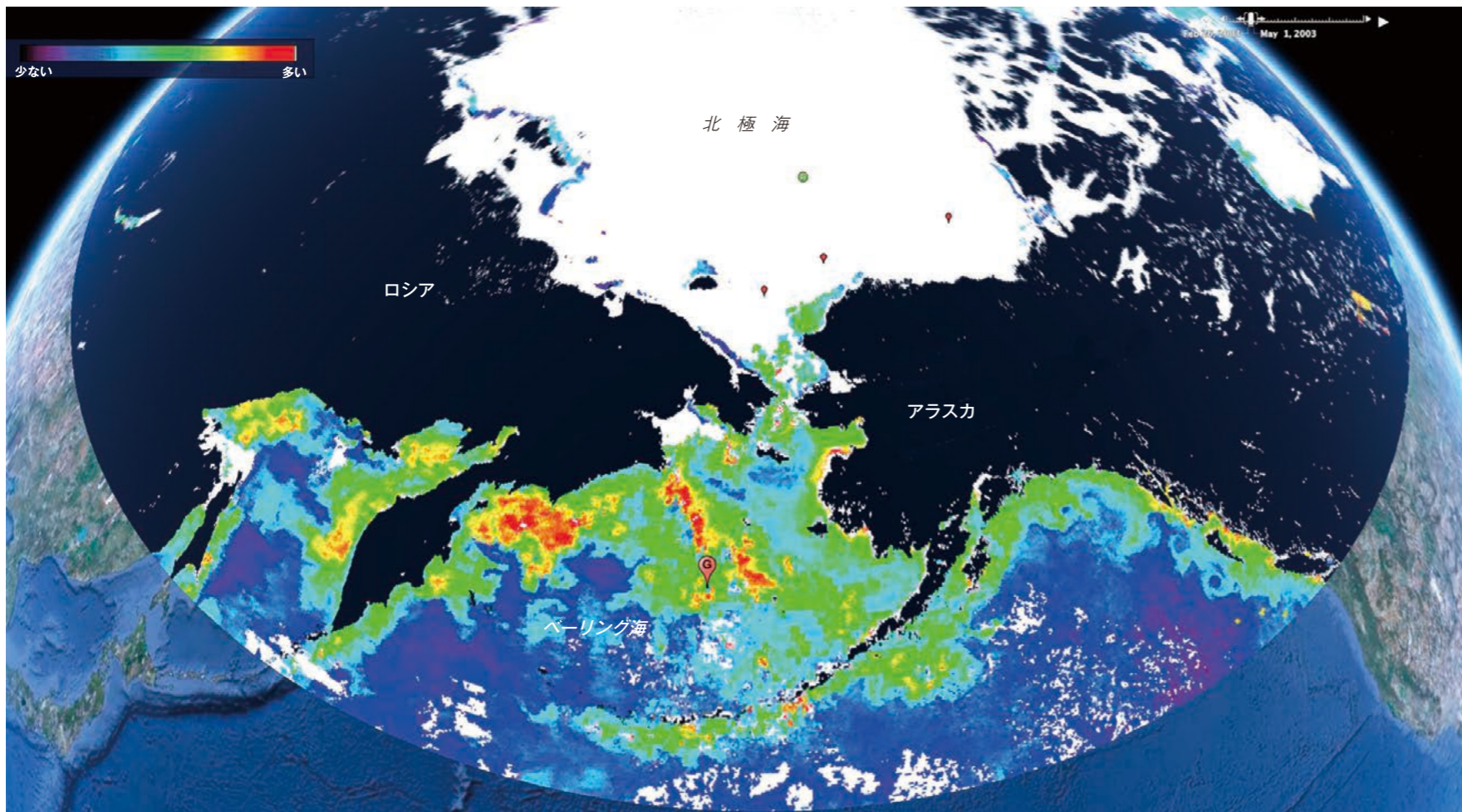
あり、それ以降、氷期・間氷期のサイクルが顕著になった。この270万年前以降のベーリング海の様子を、第323次航海で得られた海底下深度740mの海底コアによって明らかになりつつある。海底コアの解析によれば、300万年前にはベーリング海で海氷が形成されていた。海氷も気候に大きな影響を与える。1つには、氷の白い色は太陽光線をほとんど吸収せずに宇宙へと跳ね返してしまうため、氷ができればできるだけ地球はどんどん寒冷化に向かう。また、海水は氷になるときに塩分を手放す。このとき手

放された冷たくて塩分の高い水は重いで沈み込んで、現在でも世界的な熱塩循環、つまり深層水の流れをつくる原動力となっている。海底コアの記録を読み解くと、氷期にベーリング海を広大な海氷が覆い尽くし、海洋循環も不活発だったようだ。その一方で、気温が高くなる間氷期には、季節によって海水が現れたり消えたりし、海洋循環が活発になっていた。また、陸上から流れ込む豊富な栄養によって植物プランクトンが大繁殖していた。こうした海の様子を見ると、ベーリング海が高緯度地域を冷やし、海洋循環をつかさどる役割を果たしていた可能性が浮かび上がってきた。氷期になると、海面が約50~100mも下がる。ベーリング海峡は水深およそ60mなので、氷期にはこの海峡は閉じて

いた可能性がある。また、海面が下がると陸地が広がることで、スカンジナビア氷床やグリーンランド氷床だけでなく、カナダの氷床も面積が広く大きくなるため、ベーリング海周辺の大陸棚がすべて氷に覆われたかもしれないのだ。巨大な海氷域の可能性と、ベーリング海峡周辺の植物プランクトンの大繁殖は、太平洋側の海洋循環にとっても大きな影響を与えていたと考えられる。しかもその影響は太平洋だけにとどまらない。現在のベーリング海でも、ケイ藻などに含まれるクロロフィルを観測すると、ほかの海域に比べて植物プランクトンは大発生している。植物プランクトンによって二酸化炭素が固定されて、冷たい水とともに深層へと沈み込めば、空気中の二酸化炭素量は減少方向へと進む。氷期と間氷期で



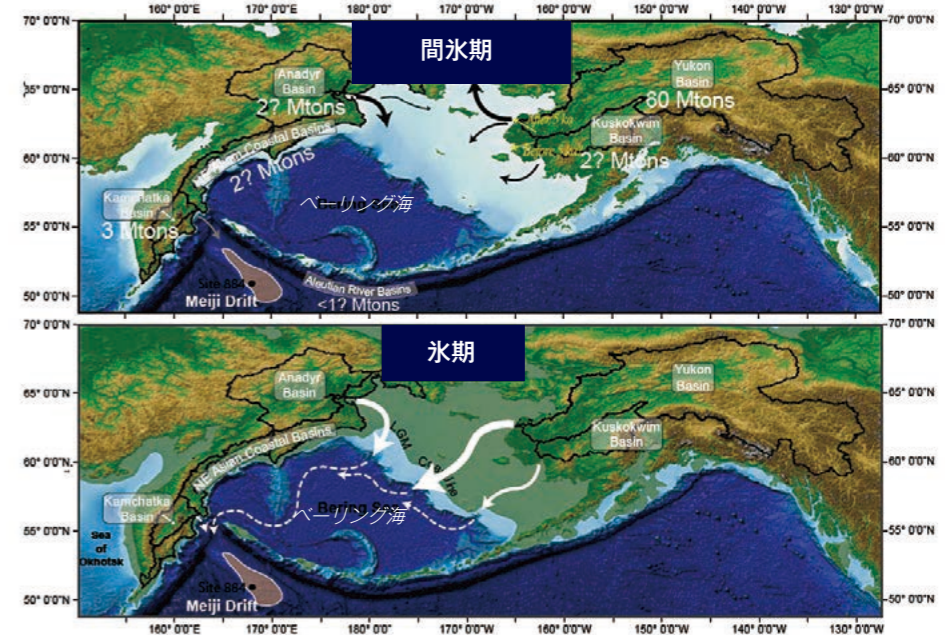
は、大気中の二酸化炭素の量が180ppmから330ppmと大きな開きがあったことが知られているが、このメカニズムについてはいくつかの説はあるもののよく分かっていない。そこにベーリング海の植物プランクトンが関わっている可能性が、深海掘削で見えつつある。



春のベーリング海の海洋表層での植物プランクトンの大繁殖
2003年にベーリング海付近で観測された、5月にクロロフィルaが増加した様子。クロロフィルaの増加は主にケイ藻が繁殖したことを示している。ベーリング海では「海開け」といって、毎年、海水が融けた直後に、海の色が変わるほど爆発的に植物プランクトンの量が増える。大量の植物プランクトンは、大量の二酸化炭素を吸収、固定する。過去にも、この爆発的な生物生産が気候に影響を与えてきた可能性がある
出典：SeaWiFS+MODIS, NOAA on Google Earth



ベーリング海の掘削試料
掘削試料のなかの明るいオリーブ色の部分は、多数の植物プランクトンを含んだ間氷期のもの。灰色の部分は海洋循環が不活発だった氷期のときのものです。海水で運ばれてきた多数の粒子や石が含まれている



出典：Sam Vanlaningham, 2009, EPSL



南海トラフで巨大地震発生のメカニズムに迫る

取材協力 木下正高 / 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 南海トラフ活動予測研究チーム チームリーダー

南海トラフの掘削、それは科学者の使命でもある。人類の、とりわけ日本を含む地震発生地帯で暮らす人々に大きな影響を与える地震・津波といった災害を科学的に捉え、人々の生活に還元していくこと。それはIODPという計画において、とても大きな意味を持つ研究と位置づけられている。

インドネシアやアメリカ西海岸など数ある地震発生地帯のなかで、日本の南海トラフが第一に深海掘削すべき場所として選ばれた背景には、過去1,000年以上にわたって地震・津波災害の記録が残っていること、また技術的に掘ることができ、深さに巨大地震を起こす断層があることが明らかだという理由があった。

地震の規模には、地震を起こすプレート境界上にある固着した部分、アスペリティの面積が関係している。マグニチュード(M)7クラスの地震では、固着域の幅が10~20kmの大きさであり、

M8クラスの南海トラフの地震は100km程度、M9クラスを記録したスマトラ沖地震は1000kmに及ぶ大きさだった。この固着した面が一気に滑って、それまでに蓄積されていたひずみエネルギーが解放されることで、地震は発生しているのだ。M7クラスは比較的頻繁に解放されるため、発生間隔が短いことが多い。M8クラスの南海トラフは、古文書から100~200年おきに解放されることが分かっている。これに対して、M9クラスの発生頻度は数百年から千年に及ぶと考えられている。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震もまさにこのようなM9地震であり、M7級の固着域を次から次へと破壊した。

南海トラフでの地震がM8なのかM9までいくのか、今は分からない。そのための手掛かりを得るため、まず固着域断層の「出口調査」が行われた。巨大地震を起こす断層は、海底面に向かうにつれて大きく2本に分かれる。デコルマと分岐断

層という名で呼ばれている2本は、最終的には水深2,400~4,000mほどの海底に何らかのかたちで顔を出す。この部分を両方の断層で掘削し、コアを回収することに成功した。分岐断層のコアで確認すると、45度の角度できれいに断層面が現れていた。年代測定すると、断層面の上が370万年前、下が160万年前に堆積したものと分かった。古い地盤が新しい地盤の上に乗上げる、典型的な逆断層だ。この特徴は、デコルマ、分岐断層、そのどちらでも見られた。逆断層であること、また堆積層の上下関係などから解析すると、分岐断層は約200万年前に活動を開始したことが明らかになった。200万年前といえば、ちょうど日本列島が激しく動きだして造山活動などが始まった時期であり、コアの解析結果はこれまでの地質学的な研究とも合致した。

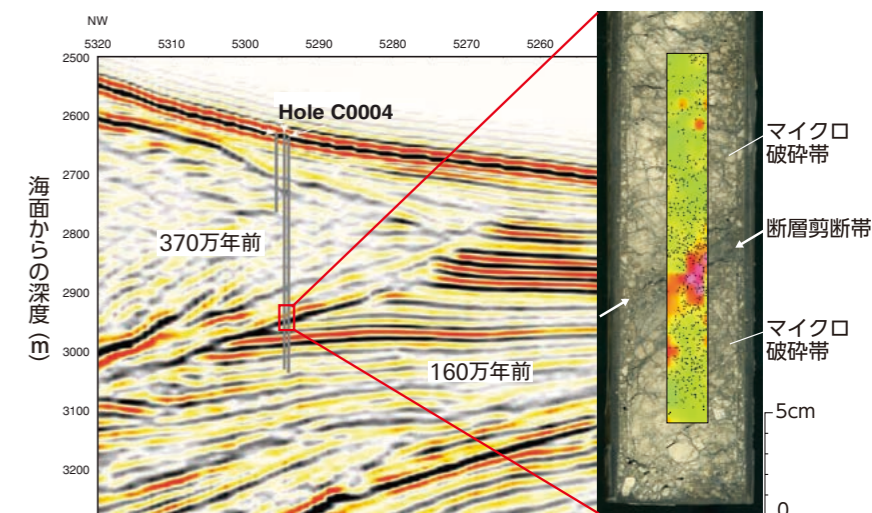
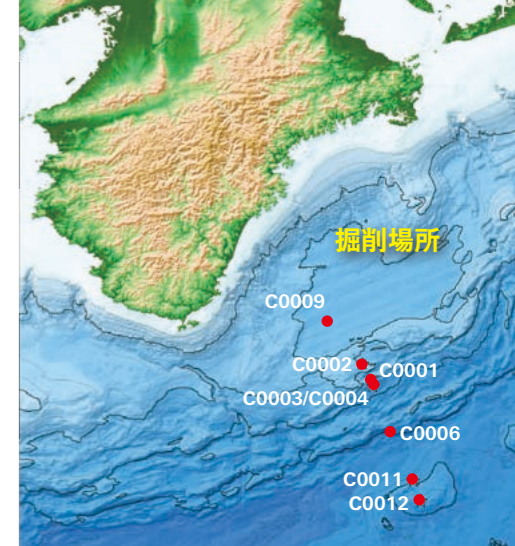
南海トラフ掘削でのもう1つの大きな成果は、海底付近の応力場異常の発見

だ。南海トラフでは、日本列島が乗っているユーラシアプレートの下にフィリピン海プレートが沈み込んでいる。つまり、押し込まれて、日本列島は圧縮されている。断層直上の領域を、いくつかのブロックに分け、それぞれにどのような力がかかっているかを計測した。多くのブロックでは強い圧縮が起きていて、圧縮場になっていた。この圧縮が解放されることで地震が発生するのだから、当然の計測結果だ。ところが、1つのブロックだけ、圧縮ではなく、逆に伸長の力がかかっていることが分かった。それがC0002と呼ばれる掘削サイトで、ちょうど分岐断層の直上に位置している。

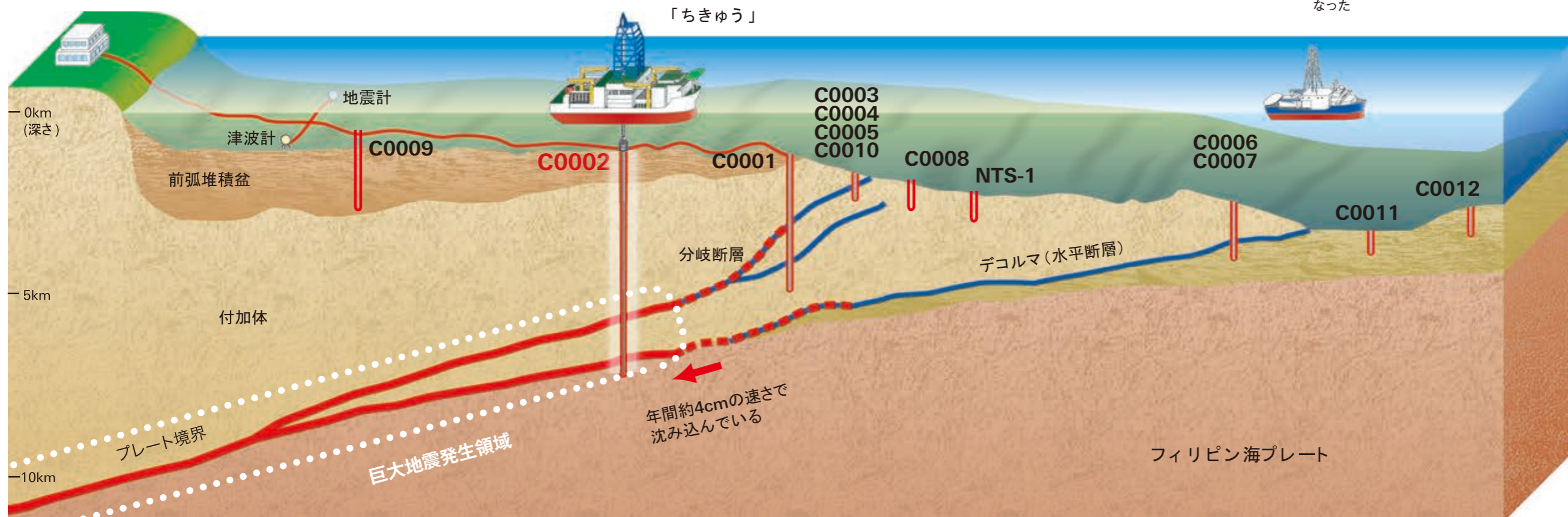
なぜC0002だけが伸張場になっているのか。その理由はまだよく分かっていないが、おそらく分岐断層の上盤がせり上がることで、この現象が起きている可能性がある。つまり、この点が地震発生メカニズムにとっても重要な役割を果たしていると考えられるのだ。

今後は、あと3年かけてC0002の真下にある分岐断層と、その下にあるプレート境界まで掘り抜き、地震発生領域の岩石を採取する。さらにリアルタイムで地

震活動などの状況をモニターできるように、孔内や海底にセンサーを設置する。2010年12月にはC0002の海底下約900m地点に、地震計、圧力計、ひずみ計、傾斜計、温度計を備えた計測器を設置した。次の地震に向けて、ひずみがどのように蓄積されていくのか、蓄積状況を明らかにし、精度の高い地震発生モデルをつくり上げること、それが当面の目標である。



分岐断層とコア C0004サイトで得られたコアの様子。ちょうど分岐断層部分で、斜めの断層岩そのものが採取された。その部分を境に上部が370万年前、下部が160万年前に堆積したものと分かった。地下の様子は、ほかの方法でも知ることができるが、こうした年代測定はコアを手に入れないと分からない。コアの年代解析によって、これらの断層が200万年前に活動を開始したということが明らかになった



南海トラフの断層と掘削サイト 南海トラフでは2007年から6回にわたり航海を行い、これまでに12サイトで掘削が行われてきた。それぞれのサイトには数本の掘削孔が開けられている。これまでに掘られた孔の深さは300~1,600mだ。C0002以外はすべて圧縮する力がかかっていた。C0002だけが伸長する向きの力が働いていた



沖縄トラフには巨大な海底熱水湖が広がっていた

取材協力 高井 研 / 海洋・極限環境生物圏領域 深海・地殻内生物圏研究プログラム プログラムディレクター

沖縄トラフの掘削、それは想定外の事態が連続した航海だった。掘り始めるとプラスチックコアライナーは溶けだし、すぐさま使い物にならなくなった。1本目に掘削したC0013という場所は、海底下わずか3mでいきなり熱水が噴き出し、それ以降50m掘り進んでもずっと高温の状態が続いた。想定していた微生物がすめる環境はそこにはなかった。場所を変えて、

熱水噴出孔から500m離れた場所で掘削する。海底面にはシロウリガイの群生が広がっていて、熱水源から何らかの栄養が供給されていること、また、生きものが生息できる程度の温度に保たれていることが見て取れる。このC0014では、基本的には海底下40mくらいまで温度はそれほど上がらず、堆積層が広がっていた。さらに、噴出孔から2km離れたところでは、

海底下50mくらいまでは温度上昇がほとんど見られなかったが、深く掘り進むと急に温度が上昇した。

実はこれが大発見だった。沖縄トラフ伊平屋北海丘の地下には、巨大な熱水湖が存在していたのだ。その姿は基本的には海底火山の形状に沿って、お椀を逆さにしたようなもので、熱水湖の半径は10km以上広がっていた。そのため、中心

から離れるほど、熱水湖面、つまり熱水の場所に到達するまでの深さが3m、40m、150m以上になっていたのだ。これは世界で初めての巨大な海底熱水湖の発見となった。

この熱水湖の発見は、資源科学的な大発見につながった。それは、現在の東北地方に広がる黒鉱と呼ばれる鉱床がどのように誕生したのかという謎を一挙に解決したのだ。黒鉱とは複雑鉱ともいわれ、金や銀などのほかに銅や亜鉛、鉛、ガリウムなど多くの鉱物を含んだ黒い鉱石の総称で、秋田県北部に広がる北鹿盆地などが鉱床のある場所として有名だ。この地方の陸地は、1500万年前は海底下にあった。しかも、いまの伊平屋北フィールドと同じような場所にあった可能性がある。ちょうどそのころ、日本海周辺で活発な火山活動が起き、海底に地溝帯が出現して日本海が拡大し始めた。日本列島ができるのは、それから1000万年以上も後の180万年前のことだ。このころ、ユーラシアプレート境界が日本海に新たに形成さ

れ、太平洋プレートとフィリピン海プレートとの衝突によって、日本列島が上昇を始めた。この上昇によって、海底熱水鉱床が陸に上がり、現在の東北地方へと移動して黒鉱と呼ばれる鉱床となったのだ。

海底熱水鉱床であれば、日本近海にはいくつも存在する。なぜ伊平屋北フィールドの発見がそれほど重要なのか。それは海底下に広がるその規模だ。伊平屋北海丘に見つかった海底下熱水湖、つまり鉱床は、世界最大のスペインにある鉱床の規模を軽々と抜く。では、なぜそのような巨大な鉱床が誕生できたのか。

中国大陸の大河から流れ込む豊かな堆積物が、その1つの鍵だった。堆積物が熱水に上からシートをかぶせるように広がる。それが最初のキャップロック、つまりお椀形の熱水をため込む構造をつくり上げる。いったんキャップロックができると、軽石層を縫ってキャップロックはどんどん水平方向に広がっていき、それが巨大な海底下熱水湖をつくった。

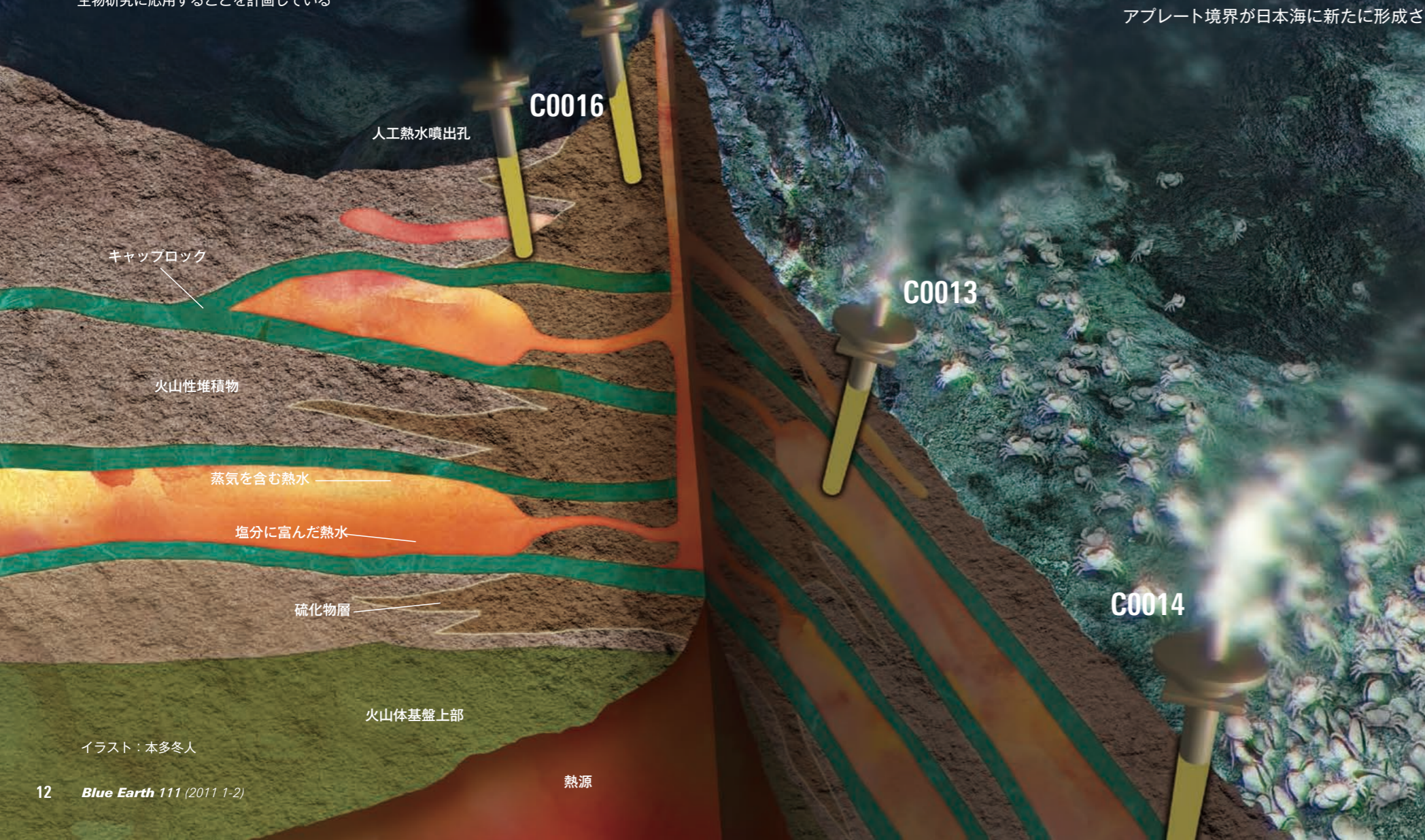
海底掘削では同じ場所で何本かのコアを採取する。C0014やC0015では、ほぼ同じ場所にもかかわらず、熱水湖に届くまでの間に異なる深さで熱水のピークが捉えられた。ところどころに熱水の通り道があるためだ。近い場所で熱水や堆積層の性質に違いが現れるのは、熱水に引き込まれて周囲の冷たい海水が入ってくる水循環の影響による。熱水湖へと注ぎ込む海水の支流



が網の目のように張り巡らされ、そこかしこで微生物の巣をつくっている。

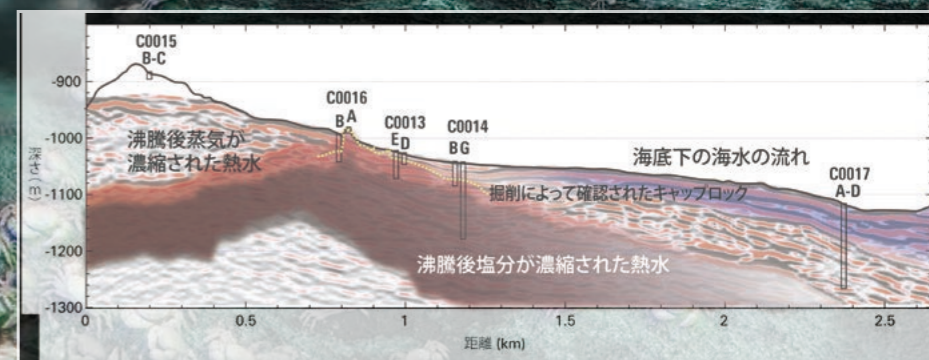
C0014でも海底下熱水湖に到達するまでの40mのコアからは、古細菌（アーキア）のDNAが検出されつつあり、当初の予想通り、多くの微生物が生息する兆候が見られている。また、微生物が生成すると考えられるメタンの上昇も捉えられた。熱水湖を中心に巡っている水循環に乗って、メタン菌がつくり上げたメタンが循環し、それがまた別の微生物を支えている可能性もある。物質が循環できる水の流れ、これが生きものにとっては重要な意味を持つ。伊平屋北フィールドの海底と海底下は、生きものと地球内部のエネルギー、それらが相まってどのような生態系を生み出してきたのか、それをリアルタイムに見ることができるといえる貴重な海域なのだ。海底下に予想を超えた豊かな世界が広がり、地球最大の生命圏がある。そして、この世界は海を通して私たちと確実につながっている。

伊平屋の地下構造概念図 熱源と海底の間に巨大な熱水湖があった。伊平屋の熱水噴出孔から噴出する熱水は透明だったため、黒鉱の存在はあまり期待されていなかった。しかし、C0016では、30~40m掘り進むとブラックスモーカーが噴き出した。この場所でいままさに黒鉱ができていく証拠となった。また、これらの掘削孔にパイプを設置し、人工的な噴出孔を世界で初めて設置した。現場での微生物培養器として利用し、海底下の微生物研究に応用することを計画している



イラスト：本多冬人

熱源



海底下の巨大熱水湖 伊平屋の熱水噴出孔から噴き出す熱水は塩分が低く、それがなぜなのか長い間原因が分からなかった。今回の航海で、熱水湖ができていたために塩分の高い重い熱水は湖の下の方に沈降し、塩分の低い軽い熱水が噴出していることが明らかになった。熱水が噴出する分、周囲から海水が引き込まれ、それが海底下の水循環を生み出している

次期10年で地球科学のパラダイムシフトを!

取材協力 異好幸 / 地球内部ダイナミクス領域 地球内部物質循環研究プログラム
プログラムディレクター

炭素と水は、私たちの生活と切り離すことのできない最も重要な物質だ。炭素は、私たちの身体を構成する主要な元素であり、普段口にする食べ物、鉛筆の芯、プラスチック、その他身の回りの多くのものを構成している。私たちの身体のおよそ70%は水分だ。炭素と水は生命の源なのだ。

私たちが暮らす生命圏は、炭素と水の大きな貯蔵庫でもある。温室効果ガスである二酸化炭素は、炭素が主成分である。また、水蒸気は二酸化炭素より強力な温室効果を持つといわれている。したがって重大な地球環境の問題となっている温暖化についても、固体地球と生命圏などの表層域を含んだ地球全体で、どのように炭素と水の循環が行われているかを知らなければ、長期的な予測を立てることは難しい。にもかかわらず、固体地球を含めて炭素と水がどのように循環しているのか、実はよく分かっていない。

この人類最大ともいべき謎に挑むのが、IODPの次の10年、地球深部探査船「ちきゅう」の新たな目標になる。次期計画のターゲットは、地球という惑星が持つ炭素・水循環システムの解明、地球科学のパラダイムシフトだ。

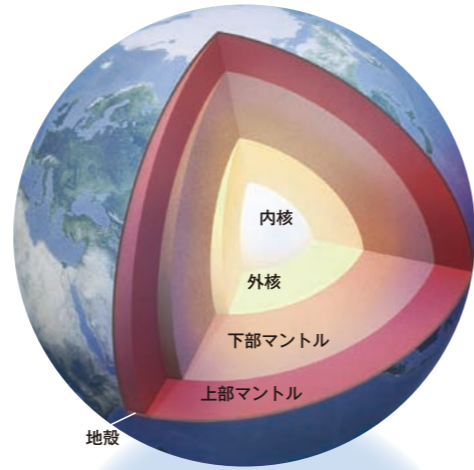
今後10年で新たな地球観を打ち出す——そのきっかけとなったのは、チベットで見つかったある石だった。その名は、あのダイヤモンド。ダイヤモンドは炭素から成る。チベットのダイヤモンドは、約2億年前から約6400万年前まで存在したテチス海の海洋地殻だった地層（オフィオライト）から発見された。それは、まさに地球科学の重大事件だった。

そもそもダイヤモンドは、これまで大陸の真ん中でしか発見されてこなかった。たとえば、世界最大のダイヤモンド産出地である南アフリカ共和国のキンバリー州では、キンバーライトというマグマ起源の火成岩のなかから鉱脈が発見されている。そのため、大陸の周りで沈み込むプレートに運ばれて大陸下にたまった炭

素が、上部マントル内で高圧がかかってダイヤモンドとなり、それがマントルが溶けてできたマグマの急上昇、つまり噴火によって地上付近にまで運ばれる、と考えられてきた。ところが、大陸とは関係のない海洋地殻のなかからダイヤモンドが発見されたのだ。これは、ダイヤモンドを構成する炭素の由来が、大陸にはないことを示している。さらに、チベットでダイヤモンドと一緒に見つかった鉱物、モアッサナイトなどの高圧鉱物は、地下数百kmより深いところでないとなら生成されない。こうしたことから、チベットで見つかったダイヤモンドの起源は、少なくとも下部マントル以深にあると考えられる。このダイヤモンドを構成する炭素は、地球深部から表層まで、まさに地球全体をフルに循環している可能性を強く示していた。

では、この炭素はいったいどのようにして、地球深部にまで持ち込まれたのだろうか? 「ちきゅう」による掘削計画では、それを明らかにすることになる。しかし、いかに世界で最も優れた掘削能力を持つ「ちきゅう」といっても、地下何千kmまで掘り進むのは無理。そこで、理論研究に基づく戦略が必要になる。

これまでの研究によって、大陸地殻の下には、「反大陸」と呼ばれる大陸地殻をつくった残りかすのようなものが存在することが分かってきた。反大陸の量は、大陸地殻の3倍ほどもある。これまで地球内部へ炭素や水を持ち込むのは、沈み込んだプレートだと考えられてきたが、実は反大陸である可能性も出てきた。この大量の反大陸はとても重く、マントルの底、つまり核との境界まで一挙に落ちると考えられる。核とマントルの境界付近には、D[”]（ディー・ダブル・プライム）と呼ばれる層があるが、くしくもこの層と反大陸の量はほぼ同じで、この層には過去に落下した反大陸がたまっている成分もある。反大陸の落下によって炭素がマントルの底まで運ばれ、その炭素がマ



地球の構造 地球の構造はよく卵に例えられる。殻にあたる地殻、白身にあたるマントル、そして黄身にあたる核だ。炭素と水が、表層を含め、これらの地球内部をいったいどのように循環しているのか。重要な問題でありながら、ほとんど分かっていない。地球内部には、海水と同じ量の水が存在すると考えられている

ントル上昇流に乗って海嶺に湧き上がり、海洋地殻の一部となったのではないのか。チベットのダイヤモンドはその名残ではないのか。

炭素・水循環システムのこの仮説を証明しようというのが、伊豆・小笠原・マリアナ島弧掘削計画（IBMプロジェクト）やモホールプロジェクトだ。

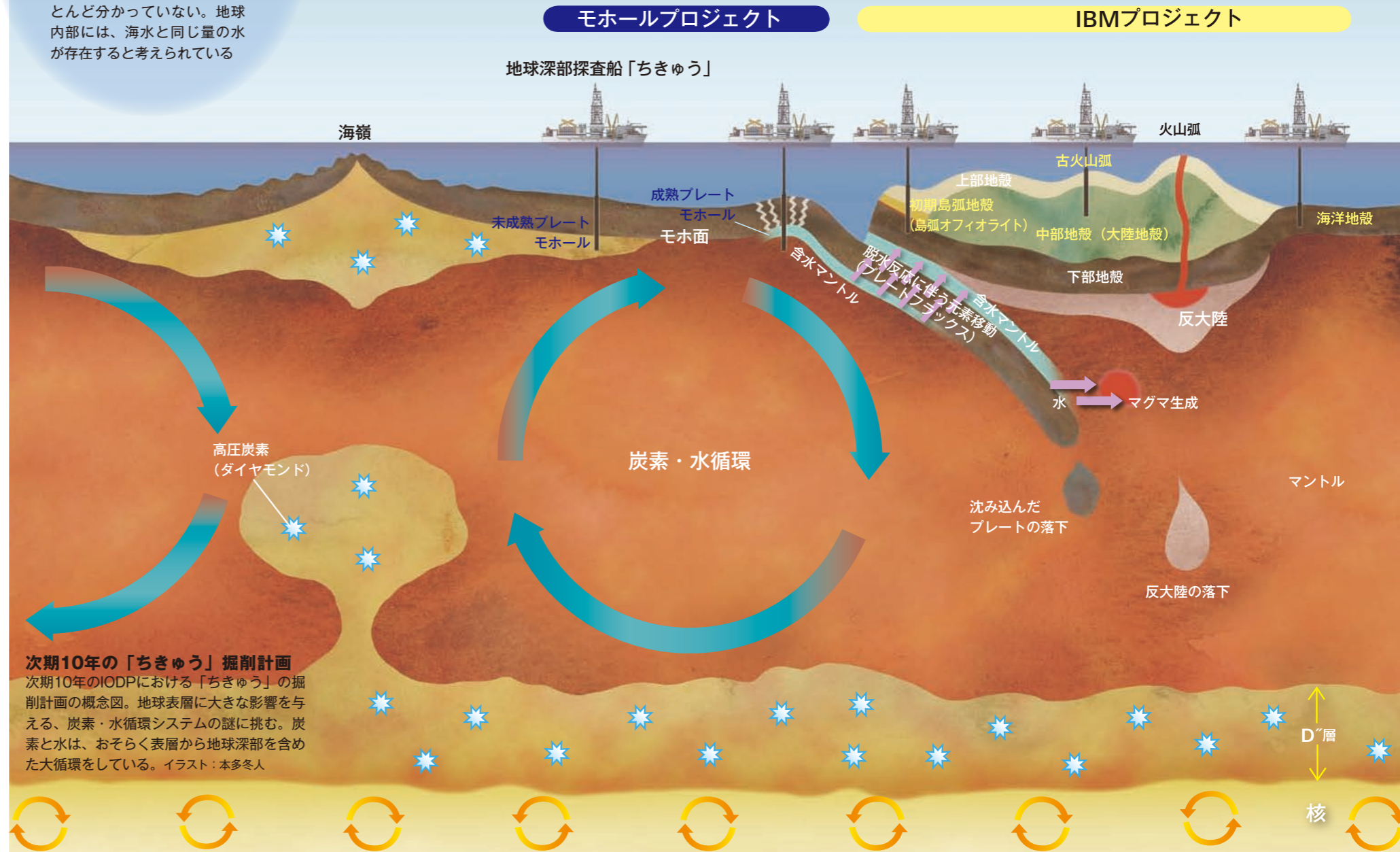
伊豆・小笠原・マリアナ島弧の下で、大陸地殻を構成する安山岩や花崗岩が作られていることが分かっている。島弧の4地点を掘削し、海洋地殻と生まれただばかりの大陸地殻の組成を明らかにすることで、マントルからどのくらいの水と炭素が海洋地殻や大陸地殻へと受け渡されているのか、また反大陸の性質がどのようなものかを割り出していく。地球は太陽系で唯一大陸地殻を持つ惑星であ

る。IBMプロジェクトによって、どのようにして大陸地殻ができたのかという大きな謎にも迫ることができる。

モホールプロジェクトは、地殻とマントルの境界であるモホ面（Moho）まで達する孔（Hole）をうがつことからそう呼ばれる。これはIODPが始まる以前からの深海掘削に関わる多くの研究者の目標でもある。中央海嶺では、マントルが上昇して日々新たな地殻が生まれている。この海洋地殻と上部マントルの一部が海洋プレートとして沈み込み帯へと移動する。このプロジェクトは、沈み込み帯付近の成熟した海洋地殻、そして最終的には、最も深く難易度の高い海嶺付近の若い海洋地殻を掘り抜く。その下のマントルからダイヤモンドを見つけ出して微量元素や同位体を解析することで、炭素の

起源を直接明らかにする。モホ面を掘り抜いてこそ、水・炭素の地球規模での循環を示す、動かぬ証拠を手に入れることができる。

惑星地球は、地球内部と表層が密接に関わり合って調和を保っている。表層に張り付いて暮らしている生命は、地震や火山など地球内部の活動に翻弄されてきた。地球内部を含めた炭素と水の大循環を知る——それは私たちの地球を理解することであり、気の遠くなるほど長い時間をかけて進化してきた地球の様相を知ることは、未来を知ることにはかならない。生命進化の過程においても、生態系においても、ほんの一部でしかない私たちが、明日のためにどう生きるべきか? 次期10年間で「ちきゅう」がその答えを示してくれるだろう。



次期10年の「ちきゅう」掘削計画 次期10年のIODPにおける「ちきゅう」の掘削計画の概念図。地球表層に大きな影響を与える、炭素・水循環システムの謎に挑む。炭素と水は、おそらく表層から地球深部を含めた大循環をしている。イラスト：本多冬人

海底下というフロンティアを未来のために

取材協力 平朝彦/JAMSTEC 理事

人間が生まれるずっと昔から、生きものは地球システムの一部であり、地球とともに生きてきた。人間もその一部だ。地球表層で暮らす生きものがつくる生態系と固体地球が、いったいどのように関連し合い、地球のシステムを駆動させているのか。IODPをけん引するJAMSTECは、地球に網の目のように張り巡らされたさまざまな関係性のなかから本質を見だし、そのシステムをサイエンスで明らかにすることを目指している。

テーマとしては、大きく3つ。1つ目は海底資源エネルギー科学、2つ目は動的な地球システムを使った海底地下利用方

法の開発、3つ目は固体地球と表層を含めた炭素循環の解明である。これらの例を簡単に紹介していこう。

1つ目の海底資源エネルギー科学の例では、12ページで紹介した沖縄トラフで、これまでの理論を大きく塗り替える発見があった。ある種の鉱物が集中して蓄積する、鉱物濃集のメカニズムが見えてきたのだ。この発見で重要なのは、鉱物濃集のメカニズムが地球システム全体を理解する鍵となる点である。大陸で生命が作り上げた有機物が海底へと流れ込み、毛布のように海底を覆った。その堆積物と、固体地球からの熱によって、海底下には熱水の巨大な湖が誕生した。こ

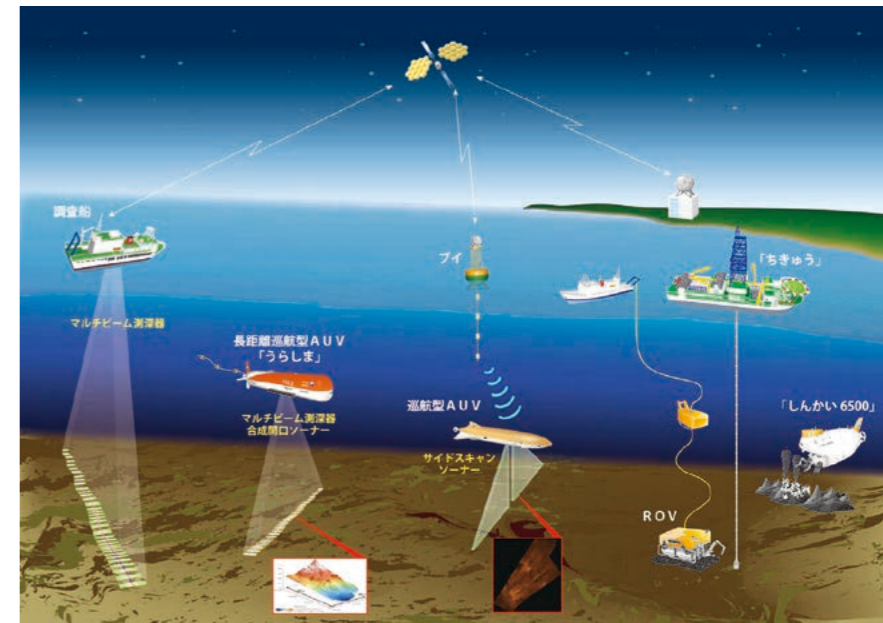
の熱水湖は海底下に広がり、ちょうど湯たんぼのように長い時間、熱を保ったまま存在したため、地球内部から鉱物が時間をかけてゆっくりと溶け出し、たくさんの量が集まることとなった。こうして鉱床が誕生したのだ。これが鉱物が濃集するメカニズムであり、見つかってみれば実にシンプルで、なぜこれまで気が付かなかったのかと思うものだった。鉱物といった物質は、生命と無関係に固体地球の影響でのみつくられるように思われがちだ。しかし実態は、生命と固体地球のはざま、ゆっくりと鉱物が醸成されていたのだ。まさに、生きものを含めた動的な変化が作り出す環境、その相互

作用のなかで固体地球も進化していることを示す発見となった。

2つ目の海底地下利用方法開発の例としては、バイオCCS (Biotechnological carbon capture and storage) と呼ばれる二酸化炭素を地下に埋め込む手法が挙げられる。青森県下北半島東方沖の海底には、石炭層があり、ここに二酸化炭素を送り込むとその二酸化炭素を利用して微生物がメタンなどをつくる可能性がある。増え過ぎた二酸化炭素を封じ込め、さらにエネルギー資源として利用可能にするというものだ。もちろんこれはまだ計画段階で、IODPではこのバイオCCSをにらんだ掘削を下北半島東方沖で検討している。まずは、海底下の状況を調べ、海底下での石炭層と二酸化炭素、微生物との相互作用を深く理解した上で、どのようにバイオCCSを行うかを決定する。

海底下は、まだ人類がほとんど手をつけていないフロンティアである。これまでの研究から、地下空間にはさまざまな温度条件、圧力状態があることが分かっていて、地表では再現が難しい反応を行うことができる。さらに日本の近海には、浅海から深い海、プレート境界、海溝など、海域のほとんどの地質的な条件がそろっている。科学技術を利用して、海底地下の理解を深め、バイオCCSといった海底地下の利用方法を提案すること。それはJAMSTECによる国土の狭い日本への、さらにはほかのアジア地域の未来への貢献である。

3つ目の炭素循環については、14ページでも解説されているが、地球システムを考える上でとても重要な問題であるにもかかわらず、長期的な視点ではその振る舞いはほとんど解明されていない。たとえば、約1億5000万年前から6500万年前まで続いた白亜紀のある時期、人類はもちろん存在しなかったが、いま以上に二酸化炭素が増加し、温暖化が起きていたことが分かっている。地球内部にあった炭素が、何らかの理由によって大量に放出されたのだ。火山活動で放出されたと考えられているが、それほどまでに二酸化炭素が増加した理由は解明されていない。逆に、生きものによる二酸化炭素の吸収が激しく行われ、急激な寒冷



JAMSTECが持つさまざまな海洋探査技術。これらの技術、海に囲まれた日本という環境、そうした環境が育む研究者の斬新な発想が三位一体となって、IODPをけん引するJAMSTECの総合力を生み出している

化に見舞われたときがあったことも過去の地球史では知られている。これらの炭素の振る舞いが、いったい何をきっかけに、どのような地球の状態、条件によってもたらされたのか、確かなことは分かっていないのだ。気象学においては、とても優れた大気・海洋モデルがつくられてはいるが、千年、万年といった長期的なオーダーで私たちの地球がどう変化する、人類がどのような状況に置かれるかという未来予測は、現代の科学では不可能だ。IODPではこうした長期的な時間スケールを含めた炭素循環の問題も、とても重要なテーマとしてチャレンジすべきものと捉えている。

地球深部探査船「ちきゅう」や無人探査機、有人潜水調査船、そして高度な分析装置を有するJAMSTECは、微生物コロニーのようなごく微小な領域から地層のような大きな単位まで扱える技術を持つ。さらには、人材が育ちつつあることも強みだ。海底下の状態を考える上で、地下微生物圏を重要な要素として取り入れて、これまでの固体地球に関する考え方は大きく変化した。JAMSTECの研究者が、地下生物を含めた固体地球の新しい見方に関して世界をリードしつつある。いま生きているこの時代を超えて、何を提案していけるのか？ JAMSTECは未来を常に見据え、射程距離内に収めていく

能力とポテンシャルを秘めた組織だ。

海底下という未知の世界を開発していくことには賛否両論あるだろう。人間はほかの生きものたちを駆逐し自然を変えるからよくない、だからいろいろなものを守っていかなければいけない、とよくいう。それは一種、人間のおごりではないだろうか。もちろん多様性を守ることも大切だ。しかし一方で、こうも考えられる。生きものはそれ自体したたかであり、そうあり続けることで、この惑星のシステムを共に作り上げてきたのだ。人間もまた地球上で暮らす、そうした生きものの一種にすぎない。

未知なるフロンティアである海底下をどのように利用していくのか、そのために地球が駆動しているシステムを深く理解すること。その理解の上に、地球という惑星が持つ潜在的な資質を最大限に生かし、できる限り多くの人類が幸せに少しでも長いスケールで存続し続けること。究極的にはそれを目指している。生き延びることは生命体としての本能であり、長い進化の過程で、すべての生きものが分かち合ってきた使命でもある。その活力を失ってはいけない。「生命体として生き延びるために何をすべきか」。そうしたメッセージを常に発信し続けられる研究機関であり続ける。

(2月9日インタビュー)

BE



地球深部探査船「ちきゅう」

砂浜に落ちた小さな星——ヒトデ

京都大学白浜水族館には、魚類250種に対して、ヒトデのような無脊椎動物が300種ほどいる。無脊椎動物の飼育・展示・研究に力を入れた、日本でも珍しい水族館だ。数いる無脊椎動物のなかでも、手のかからないマイペースな生きもの、それがヒトデの印象。水質を良好に保ち、適度に餌を与えれば、数年は生きる個体が多い。無脊椎動物のなかでは比較的長期飼育しやすい方だ。基本的には5本の腕を持ち、放射相称で盤状、多くが肉食だ。その姿から英語やフランス語では「海の星」と呼ばれ、日本語でも漢字表記は「海星」と書く。ただし、例外もある。たとえば、大発生して造礁サンゴを食べるため、嫌われることが多いオニヒトデは、14～18本の腕を持っている。

オニヒトデを含めて大型のヒトデは、捕食するときに口か

ら胃袋を外に出すものが多い。大きくてやわらかい胃袋で獲物を直接包み込み、消化液でスープ状にしてから飲み込み栄養分を吸収する。

口に歯のようなかたい組織はない。オニヒトデが食べているのは、サンゴの体のうちで褐虫藻がいるやわらかい部分だ。アサリなどの二枚貝を食べるヒトデもいるが、これも貝殻をガリガリやるわけではない。ナマコやウニ、ヒトデといった棘皮動物が持つ「キャッチ結合組織」を使う。キャッチ結合組織は、かたくなったりやわらかくなったりする特別な結合組織で、収縮にあまりエネルギーを使わない省エネな組織だ。ヒトデの場合、キャッチ結合組織は、小さな骨片の間を埋めることで体の基本構造の一部となっている。まず全身を使って、貝を包み込み、貝を上下に引っ張り、貝殻を引

き離そうとする。貝も頑張って貝殻を閉じるが、筋肉は次第に疲労するので口を少し開けてしまう。すかさず、ヒトデはキャッチ結合組織をかたくして現状のまま踏ん張る。この過程を繰り返して、少しずつ貝の口が開くの待つ。貝殻を大きく開かせなくても、胃が差し込める程度の隙間が開けられれば、ヒトデは胃を挿入して中身を食べてしまうのだ。

姿からはかたそうに見えるが、このキャッチ結合組織のおかげで大きさに見合わないほど狭い場所にも器用に入り込むことがある。腕を広げると40cmもあるヒトデが、直径たった5cmの水族館の配水管に入り込んで詰まらせ、水槽の水をあふれさせたことがある。

サンゴを食べたり、ときに大量発生したりして、嫌われがちなヒトデではあるが、太平洋北東部でこんな研究がなされ

ている。磯の生態系からヒトデだけを排除して、その影響を調べた。その結果、ヒトデの餌であるはずの貝やフジツボの種数が逆に減少してしまったのだ。

生きものたちは、関係性を保ちながら生きている。捕食者であるヒトデがいなくなると、その環境のなかで育ちやすい貝が磯の資源を使い切り、生息できる貝の種類は減少、多様性は失われる。多様性が失われた生態系は、環境変動に対抗する力を失う。一見、悪役に見えても、関係性のなかで大切な役割を果たしている。いなくてもいい生きものなんて、何もない。砂浜に落ちた小さな星をそんな目で見つめると、少し輝いて見えませんか？

取材協力：加藤哲哉／京都大学白浜水族館・技術職員（飼育展示担当）

■ Information: 京都大学白浜水族館
〒649-2211 和歌山県西牟婁郡白浜町459
京都大学フィールド科学教育研究センター
海域ステーション瀬戸臨海実験所（京都大学白浜水族館）
TEL: 0739-42-3515 FAX: 0739-42-4518
URL: <http://www.seto.kyoto-u.ac.jp/aquarium/>



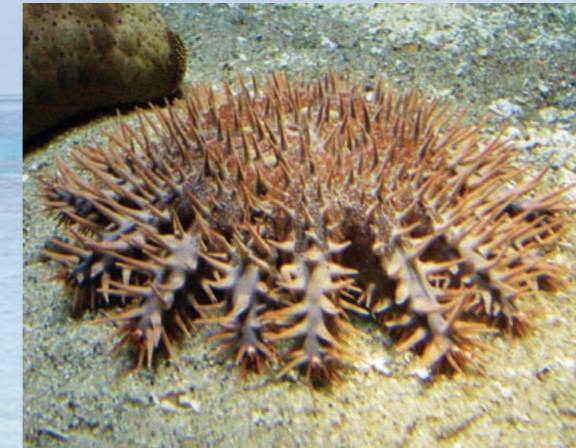
モミジガイというヒトデ。大きさは6cm程度。ヒトデの大きさは、中心から腕の先までの長さで示す。干潟にいて、普段は砂に潜っている。色は異なるが、2つとも同じ種類

コブヒトデモドキ
大きさ12cm

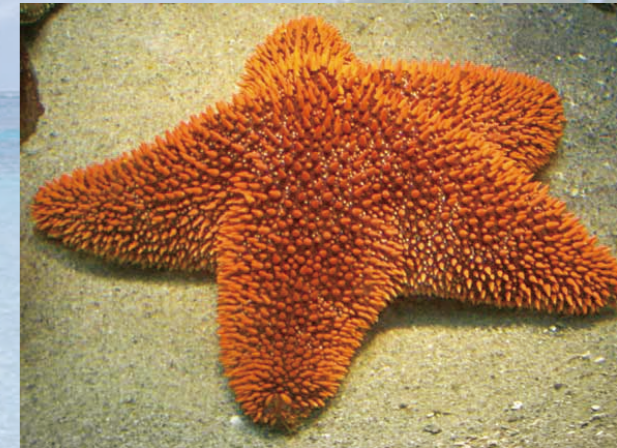


ベニアミメジスベリヒトデ
大きさ4cm
*通常は5本の腕を持つが、本種に限らず写真のような4本腕の個体がまれに見つかる

オニヒトデ 大きさ20cm



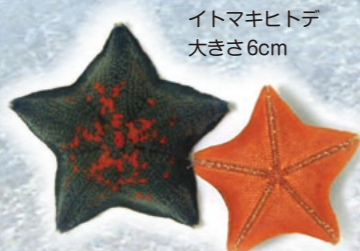
ヤマトナンカイヒトデ 大きさ15cm



アミメジスベリヒトデ
大きさ5cm



イトマキヒトデ
大きさ6cm



フトゲヒトデ
大きさ20cm

アズキイボヒトデ
大きさ8cm



ジュスベリヒトデ
大きさ5cm



アカヒトデ
大きさ7cm



マンジュウヒトデ 大きさ15cm



アオヒトデ
大きさ20cm

“オールジャパン”の海のロボットをつくらう!

「自分の力で目的地まで航行し、自律的に作業して、迷子にならずに帰ってくる、そんな深海探査機をつくりたい。それも、すべて日本独自の技術で」と語る石橋正二郎 技術研究主任。探査機に搭載する機器の制御やソフトウェアを担当する石橋さんの研究室には、探査機の「目」にあたるカメラや、「腕」となるマニピュレータ、「方向感覚」をつかさどる航法装置などが並んでいる。2010年8月には、先端技術試験機「MR-X1」によって、世界で初めて全自動による海底作業にも成功した。夢の深海探査機を目指して、今日も研究開発を進めている。

石橋正二郎

海洋工学センター
先端技術研究プログラム
巡航探査機技術研究グループ
技術研究主任

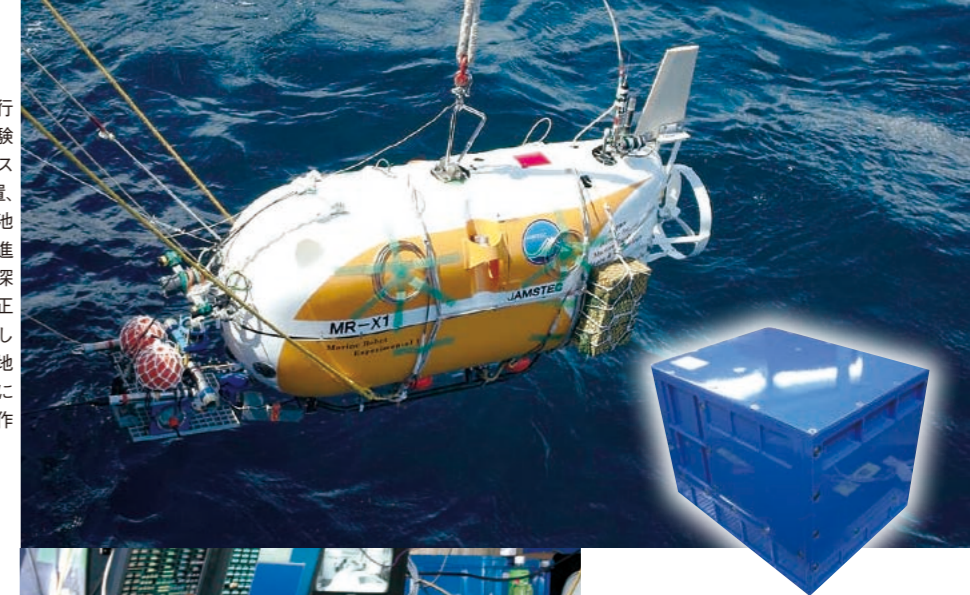


MR-X1は、先進的な技術を実際の海で試験するための探査機である。全長2.5m、重さ約800kg、潜航深度4,200m。正面に装備されたカメラのうち下に並んでいる2台が、石橋さんが開発したステレオ視システム。MR-X1はそのかたちから、親しみを込めて「マンボウ」とも呼ばれている

撮影：STUDIO CAC

石橋正二郎 (いしばし・しょうじろう) 1975年、静岡県生まれ。工学博士。東京商船大学(現・東京海洋大学)商船システム工学課程卒業。2003年、同大学院商船学研究所修了。同年、海洋科学技術センター(現・海洋研究開発機構)入所。深海巡航探査機「うらしま」、大深度小型無人探査機「ABISMO」、先端技術試験機「MR-X1」などの開発に従事。専門は海洋工学、ロボット工学

2010年8月、相模湾で行われたMR-X1の海域試験の様子。高性能画像システムや小型慣性航法装置、深海用リチウムイオン電池などの新たに開発した先進技術機器を搭載し、水深80~1,500mの海中でも正確に機能することを確認した。また、自律的に目的地まで航行・潜行し、海底に旗や磁力計を設置する作業にも成功



MR-X1に搭載された小型慣性航法装置の試作機。国産宇宙ロケットと同じ超小型ジャイロコンパスを組み込んで小型化し、高性能かつ国内最小、最軽量とすることに成功した



支援母船のオペレーションルームから指示を出し、海域試験を進める。オペレーションのソフトウェアは、すべて石橋さんの自作

—現在の研究について教えてください。

石橋：私は、自分で見て考えて判断し、自律的に作業をする、そんな深海探査機をつくりたいと思っています。そのために、カメラやマニピュレータ、航法装置、コンピュータ制御システムなどの研究開発に並行して取り組んでいます。

なかでも、いま私が最も力を入れているのがカメラです。2010年8月には、MR-X1 (Marine Robot Experimental-1) という先端技術試験機に2台の高性能デジタルカメラを搭載して、新しく開発した「ステレオ視システム」の性能を海域試験で確かめました。2台のカメラで異なる視点から撮影することで、対象物の立体的な情報を測定することができます。現在は深海で未知の物の大きさを測ることは非常に難しいのですが、ステレオ視を使えば、対象物の大きさや、対象物までの距離、傾斜や凹凸まで正確に測ることができます。

—マニピュレータについては?

石橋：カメラが探査機の「目」だとすれば、マニピュレータは「腕」です。現在、探査機のマニピュレータは、オペレーターが支援母船で現場の映像を見ながら遠隔操作していますが、その技術の習得には熟練が必要です。そこで、ステレオ視システムと組み合わせることで自動でマニピュレータを動かすことができる機能を開発しています。対象物を自動でつかんだり離したりするだけでなく、障害物をよけるなど、自分で考えて器用に動くマニピュレータを目指しています。

—MR-X1の試験では、新しい慣性航法装置も担当されましたね。

石橋：慣性航法装置は私が海洋研究開発機構 (JAMSTEC) に入所してからずっと取り組んでいる研究対象で、最も思い入れがあります。慣性航法装置は、探査機が自分

の位置を知るための装置です。自分の位置が分からなければ、探査機は目的の場所へたどり着けず、迷子になってしまいます。海の中は真っ暗で目印もなく、電波が届かないのでGPSも使えません。しかし、たとえば北へ2歩、東へ2歩というように、出発点を基準に自分が移動した方向と距離が正確に分かっていれば、いまいる位置がわかりますね。自分が移動した方向を測るジャイロコンパスと、移動した距離を測る加速度計を組み合わせたものが慣性航法装置です。

MR-X1に搭載した新しい慣性航法装置は、重さも容積も従来の約半分です。装置を小型軽量化すれば、その分ほかの装置を積むスペースもできるし、何より慣性航法装置を積むことさえできなかった小型の探査機にも搭載できるようになります。探査機の開発において、小型軽量化はとても重要なポイントです。

—慣性航法装置の性能は?

石橋：光学式のジャイロコンパスは大きいほど精度が上がるので、小型化によって精度が犠牲になります。1時間航行すると数百mの誤差が生じることもあり、航行時間が増えるほどその誤差はどんどん大きくなってしまいます。そのため通常はほかのセ

ンサーと協力し合いながら使うのですが、何とかしてその誤差も小さくしたい。そこで、慣性航法装置を回転させて誤差を相殺する新しい方法の研究に取り組んでいます。この方法を使うと、4~6倍の精度向上が期待できます。

私たち技術研究者には、斬新で実用的な技術を確認させたい、後世に役立つ技術を生み出したい、というモチベーションがあります。そして、これは絶対に自分がやるべき仕事だという自尊心を持って、この仕事をやらせてもらっています。

オールジャパンの探査機をつくる

—日本の探査機の技術は、世界のなかでどのレベルにあるのでしょうか。

石橋：先輩たちの努力のおかげで、欧米諸国と並び世界のトップクラスにいます。でもアジア諸国も追い掛けてきていて、一部の技術では抜かされかねない状況です。日本は技術立国ですから、やっぱりトップを目指したいですね。

しかし探査機の多くは、それ自体は日本でつくっていても、組み込まれる装置や部品の多くが外国製なんです。これでは、もしそれらが入手できなくなったら、探査機をつくれなくなってしまいます。ですから、すべ



研究室に置かれたマニピュレータ。「マニピュレータの魅力は、やっぱり動きでしょうね。もともとロボット、特にガンダムが好きでした。マニピュレータをいかに自律的に人の腕のように動かすか。そのための“仕組み”を開発するのが私の専門です」
撮影：STUDIO CAC



明治生まれの祖父に憧れていた。その明治男らしい気質は石橋さんに受け継がれ、探査機の研究開発という「ものづくり」に生かされている



東京商船大学時代、過酷な訓練を伴う乗船実習を経験。それ以上につらい船酔いと戦いながら、技術研究者への道を模索していった



大学卒業式にて、研究室の仲間たちと。右端が石橋さん。恩師の伊藤教授（左から2人目）は、JAMSTECへ進む道を開いてくれた

ての装置や部品が日本製という「オールジャパン」の探査機をつくるのが理想なのです。しかしそれは現実には難しいので、せめて探査機にとって根幹となる装置はすべて日本製にこだわるべきです。そのためには、国内のメーカーにも探査機技術に関する知見を残していくことが重要なのです。

——メーカーに知見を残すとは？

石橋：私たち技術研究者だけでは探査機はつくれません。ある部分はメーカーにつくってもらう必要があります。一方、日本のメーカーの技術力はとても高いのですが、市場需要の低いものをつくることは、経営方針として厳しい。しかし最近、深海の資源が注目され、探査機の需要が高まると見込まれています。JAMSTECの探査機開発で得られた知見が市場にも展開できる技術や製品につながれば、メーカーも元気になりますし、日本の探査機技術もさらに向上していきます。これからは研究機関も、意義ある市場展開を見据えた研究開発をするべきでしょう。

JAMSTECへの道は船酔いから

——どのような子どもでしたか？

石橋：子どものころから勉強ができるタイプではありませんでした。それなのに、保母さんが「正二郎君は頭がいいですよ」とよくいつてくれたのをうのみにして、「自分はやれば何でもできる」と思い込んでいました。でも勉強は嫌い。そして、負けず嫌いでプライドも高い。だから学生時代も、自分の実力を知らたくないので、模試を一度も受けませんでした。そして本番で初めて気付くんです。「勘違いしていた」と。挫折というより自業自得ですね。

そんな私でも、友人が勉強を教えられたり、進路を一緒に悩んでくれたりして、何とか希望の大学に進学することができました。それが東京商船大学（現・東京海洋大学）でした。

——船が好きだったのですか？

石橋：船が好きというより、小さいころから海が大好きでした。私は静岡の沼津という漁港町、しかも家から歩いてすぐ海、という環境で育ちました。

両親が共働きだったので、幼少時代は祖父に預けられていました。祖父は明治生まれの厳しい人でしたが、私を溺愛してくれ、私もおじいちゃん子でした。大学を決める時、東京商船大学のことを祖父に話した

ら、ものすごく喜んでくれたんです。祖父は鉄道員でしたが、若いころは船乗りになりたくて、東京商船大学は憧れの学校だったそうです。その話を聞き、船乗りになるのも悪くないかな、という気になりました。

——大学はいかがでしたか？

石橋：当時の東京商船大学は絶対的な縦社会で男子校の雰囲気でしたが、その分とても仲間意識が強く、普通では味わえない経験もたくさんできました。私が学んだ機関科では、1～3年生は1ヵ月間、4年生は3ヵ月間の乗船実習がありました。実習で特に嫌だったのが、毎朝のヤシずりです。真冬でも日の出前からはだしになって、木甲板をヤシの実で磨くのです。しかし何よりもつらかったのが、船酔いでした。胃を出して洗いたくなるほど気持ち悪くて、海に飛び込んでやろうかと何度も思いました。

——船乗りを志望しなかったのですか？

石橋：はい。船には本当にさまざまな分野の技術が複雑に、しかし合理的に組み込まれています。それはある種の“工学美”ともいえます。乗船実習を通して、そんな“工学美”に強く魅かれるようになったんです。もちろん、船酔いの恐怖から逃れる道考えた結果なのかもしれませんが（笑）。

そして、3年生のときに研究室選択で目に留まったのが、ロボット工学研究室でした。最初は「ロボット？ 船？ 海？」と、何をやるのかさえ分かりませんでした。ロボットが船と同じようにいろいろな技術を集積させた“工学美”を具現していることはイメージできました。そして、研究室見学で動くマニピュレータを見た瞬間、「おおっ！」と感ずるものがありました。その衝撃から大学院にまで進学してしまい、あとは卒業までひたすらマニピュレータと遊んでいました。

——どのような経緯でJAMSTECに？

石橋：当時は博士論文を仕上げるのに必死で、就職は二の次でした。そんなとき、恩師である伊藤雅則先生に勧められてJAMSTECで実習することになり、その縁で、当時指導してくださっていた青木太郎さん（現・技術担当役）が、「うちの採用試験を受けてみたらどうか」と声を掛けてくれたのです。

振り返ってみると、プライドばかり高くて勉強嫌いの私が、行き当たりばったりで進路に右往左往しつつも、その時々でいろいろな人の厚意にあずかり、何とか社会人になれたのだと思います。そしていま、あんなに恐れ

2005年、無人探査機の航続距離の世界新記録317kmを達成した「うらしま」と、当時の研究グループのメンバー。後列右が石橋さん、その左が吉田さん



深海生物調査ロボット「PICASSO」の海域試験中の石橋さん。手にしているのはPICASSOが撮影した映像をリアルタイムで母船へ送信する光ファイバーケーブル。ステレオ視システムはPICASSOにも搭載されている



ていた船酔いと付き合いながら、結局、船に乗る仕事をしています（笑）。

——高精度の慣性航法装置や全自動のマニピュレータができれば、船に乗らずに探査ができますね。

石橋：そうですね。岸壁から「いつてらっしゃい」と送り出せば、あとは自分の力で目的地まで行って、見て、考えて、作業をして、迷子にもならずきちんと帰ってくる。私の最終目標は、探査機も、そしてもちろん私も船に乗らずに探査できるようにすること。そのためには、いまはまだ船酔いと戦いながら、一生懸命研究しなければなりません。

「褒められたい」が原動力

——2006年には日本マリンエンジニアリング学会論文奨励賞を、2010年には海洋理工学会堀田記念奨励賞を受賞されました。

石橋：私は単純なので、とにかく褒められるのが好きなんです。子どものころから、「足が速いね」と褒められると、「もっと速く走ろぞ」と頑張る。そうやって、ここまで来ました。

相変わらず勉強はできるタイプではありませんが、この年になればきちんと理解しているので、努力でそれを補います。この仕事は頑張りによっては大きな成果を出せることもあるし、ときには褒めてもらえることもあります。私も少しは成長したので、いまは自分だけではなく、共に苦労してきた仲間たちと一

緒に褒めてもらえると、もっとうれしいです。

——尊敬する人は？

石橋：大勢いますが、入所時から私を指導してくださった青木さん、そしていまのグループリーダーの吉田弘さんを、とても尊敬しています。吉田さんの専門は物理学です。ほとんどの工学は物理現象を応用したものですし、吉田さんはメーカーにいたこともあるので、とても幅広い知識と高いレベルの技術を持っています。探査機開発では、私がソフトウェア全般を担当することが多いのですが、その分野でも私より数段上です。それなのに多趣味で甘えん坊のダジャレ好き（笑）。そんなところは私は尊敬しています。

そして吉田さんや私を含め、これまで多くの技術研究者を育ててきたのが青木さんです。探査機技術の分野では、世界唯一の経験と知見をお持ちです。そんなお2人が、私の技術をいまのレベルまで引き上げてくれました。何より、私のようなわがままな人間を、これまで見放すことなく育ててくださったことに感謝しています。

——ほかに影響を受けた人はいますか？

石橋：祖父と父です。2人に教わったのは、何事もゆっくり慌てないで丁寧にやりなさい、ということでした。算数でも、焦って途中の計算式を書かないことを許しませんでした。探査機の研究開発では、不具合が出たら、その原因を丁寧に順を追って探して

いくことが重要です。面倒で根気の要る作業ですが、基本から進めていかないと、結局やり直すことになってしまいます。何事も1つずつ丁寧に積み上げていく。そういう「ものづくりの心得」は、祖父や父が体に染み込ませてくれたのかもしれない。

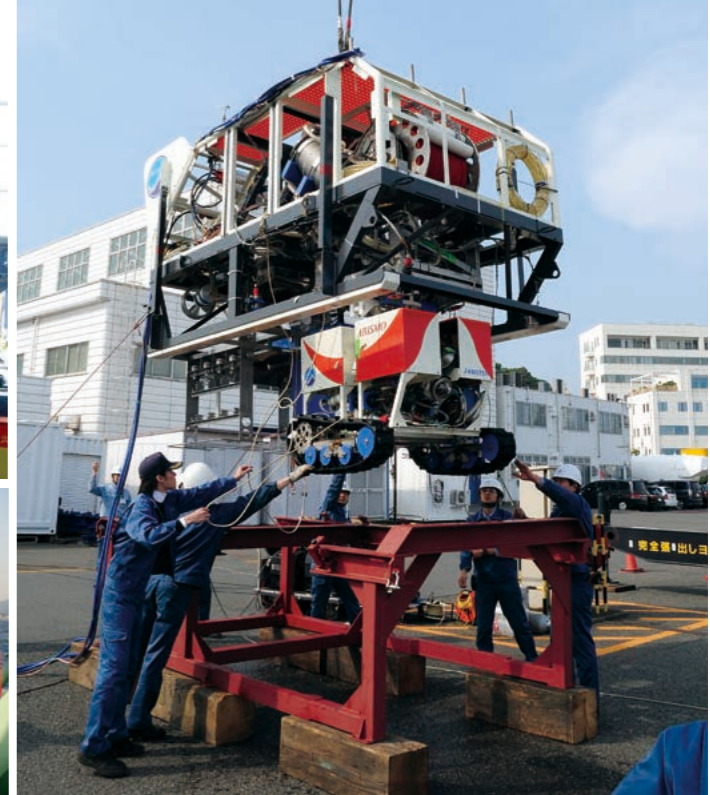
オレ流の“できる”がある

——最後に、若い人へのメッセージを。

石橋：「できない」と、すぐに諦めないでほしい。私にもできないことはたくさんありますが、そこで諦めたら、間違いなくできないままです。でも時間をかければ、どんなことでもできる可能性が生まれます。

大切なのは、できないという劣等感を持たないことです。職業柄、世界中の優秀な人間と接するので、私も劣等感を感じることはあります。しかし、「あの人のようにはできないかもしれないけれど、オレ流の“できる”がある」と考えるのです。

私も挫折には弱いし、実際にこれまで何度も挫折してきました。でもそんなときは、人より時間をかけて、できるだけ多くのことを試してみます。その結果、もし解決することができれば、それは大きな自信となります。諦めることを選ばず、まずは自分を信じて、今自分にできることから地道にやってみよう。そうすれば、たとえどんな結果でも、絶対にこれからの自分につながります。 **BE**

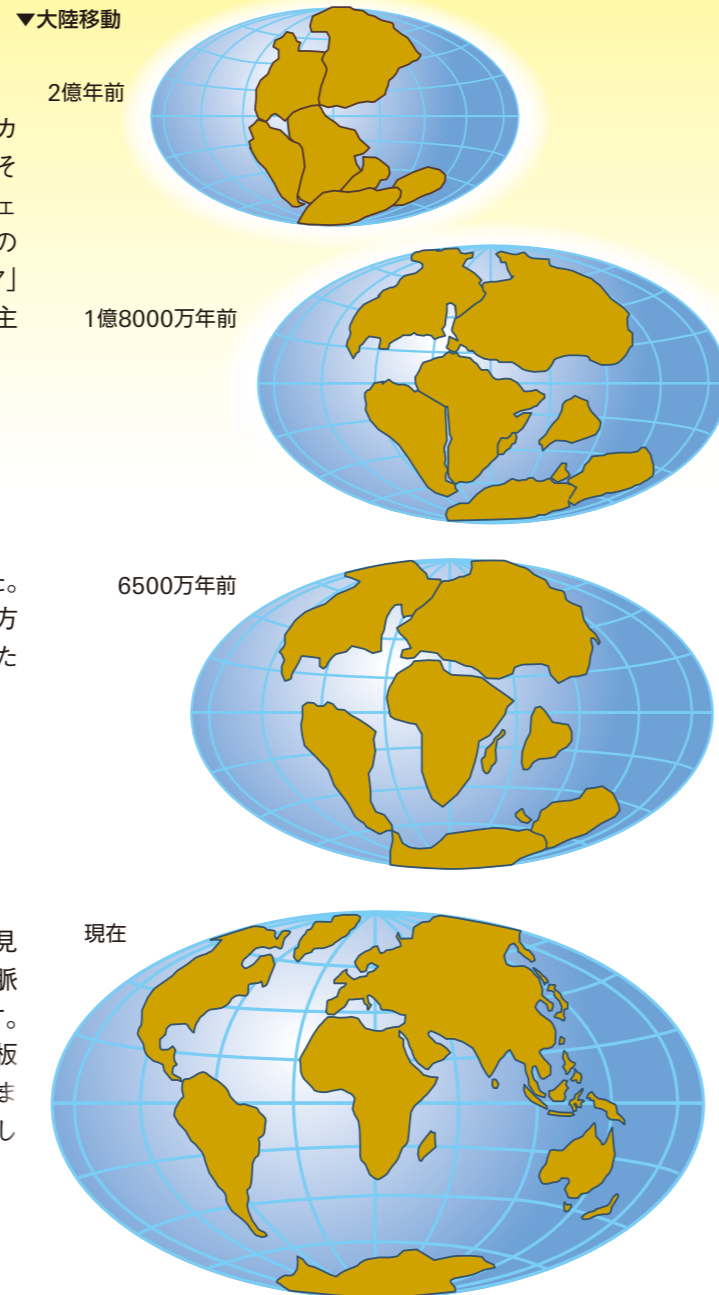


大深度小型無人探査機「ABISMO」。開発当初、吉田さんと2人で毎日徹夜していた。石橋さんは制御ソフトウェアを担当。2008年には、世界で初めてマリアナ海溝水深10,000m以深の連続試料採取に成功した

大陸移動→マントル対流→地球の歴史

1 ポイント 大陸は移動する

世界地図を見ると、大西洋で隔てられている南アメリカとアフリカは、ジグソーパズルのピースのようにつなぎ合わせることができそうなかたちです。1910年代、ドイツの気象学者アルフレッド・ウエゲナーは、現在の生物や古生物の生息域、岩石や氷河の跡などの分布から、約2億年前にすべての大陸が集まった超大陸「パンゲア」があったと結論づけました。「大陸は移動する」とウエゲナーは主張したのです。

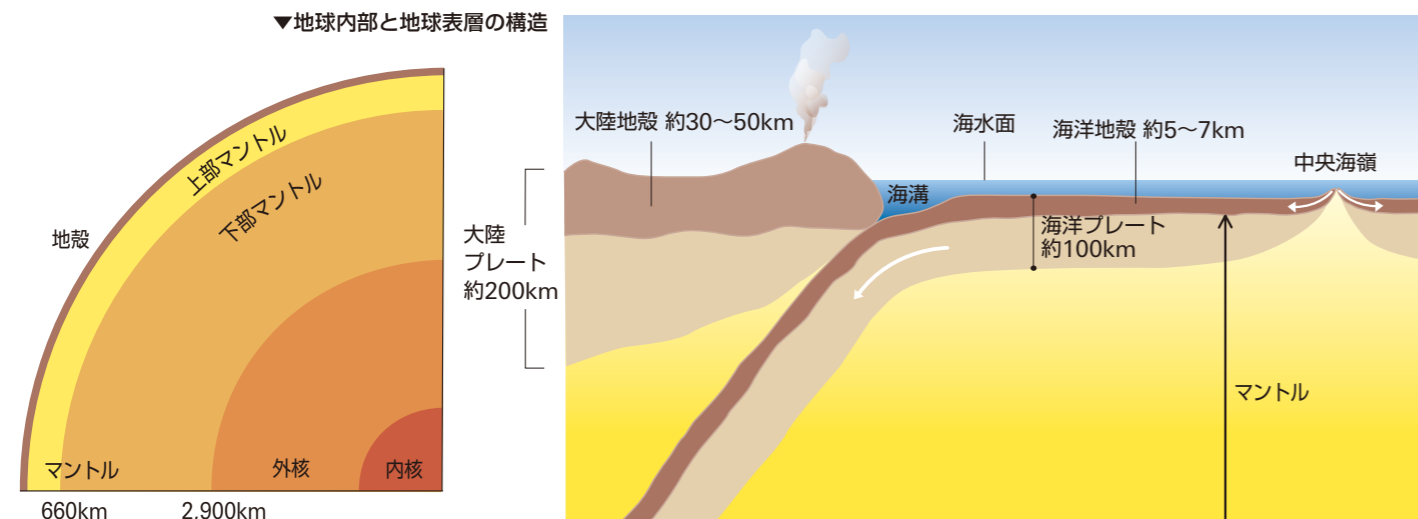


2 疑問 大陸を移動させる原動力は？

ウエゲナーの大陸移動説は、学会で大きな論争を巻き起こしました。しかし当時は、「大陸や海底は動かない」というのが常識的な考え方でした。また、大陸を移動させる原動力をうまく説明できなかったため、大陸移動説は長い間、認められませんでした。

3 ポイント プレート運動に伴い大陸は移動する

1960年代、「大陸や海底は動かない」という常識を覆す大きな発見が海底の調査からもたらされました。中央海嶺と呼ばれる海底山脈で海底が新しく生まれ、両側へ拡大していることが分かったのです。現在では、地球の表層は十数枚のプレートと呼ばれるかたい岩板で覆われていることが分かっています。プレートは中央海嶺で生まれ、移動して、海溝で別のプレートの下に沈み込んでいます。そして、このプレート運動に伴い大陸や海底は移動しています。



約2億年前、すべての大陸が集まり超大陸「パンゲア」をつくっていた。やがてパンゲアは分裂し、大陸はそれぞれ移動して現在の配置になった。

—このような大陸移動説が1910年代に提唱されましたが、長い間、認められませんでした。

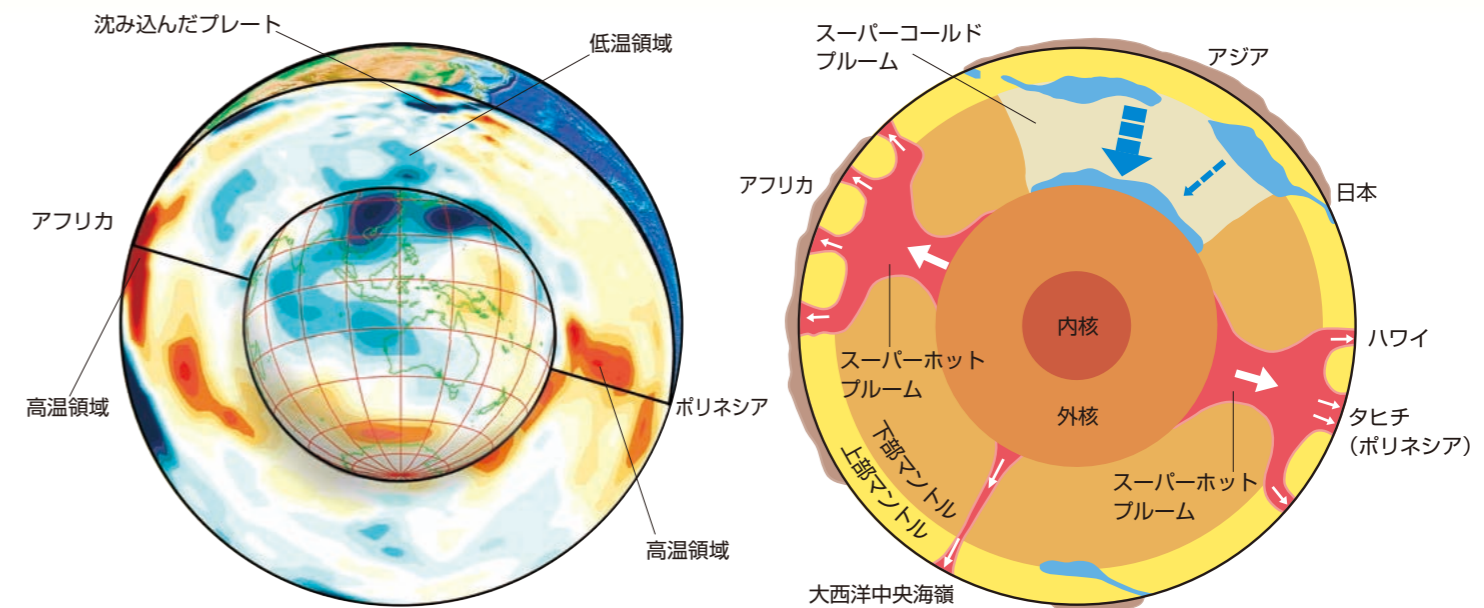
大陸を動かす原動力が分からなかったからです。

現在では、マントル対流により大陸は離合集散を繰り返し、

地球環境や生命進化に大きな影響を与えてきたと考えられています。

そして約2億年後、各大陸が再び集まり新しい超大陸がつけられると予測されています。

取材協力 吉田晶樹 地球内部ダイナミクス領域 地球深部活動研究プログラム マントル・コア活動研究チーム 主任研究員



▲地震波トモグラフィー(左)とスーパーブルーム
深尾上席研究員たちは、地震波トモグラフィーにより、マントルのなかに地震波速度の速い巨大な低温領域と、地震波速度の遅い巨大な高温領域があることを明らかにした。東京工業大学の丸山茂徳教授は、地震波トモグラフィーの画像から、スーパーホットブルームとスーパーコールドブルームの存在を指摘した

4 確認 地球の内部構造とプレート

地球の内部はどうなっているのでしょうか。最も外側は「地殻」で覆われ、その下の深さ2,900kmまでは「マントル」という岩石層、地球中心部には金属から成る「コア(核)」があります。

海洋と大陸では地殻の厚さが異なります。海洋地殻の厚さは約5~7kmですが、大陸地殻は約30~50kmの厚さがあります。プレートは、地殻とマントルの最上部から成ります。海洋プレートの厚さは約100kmですが、大陸プレートは約200kmの厚さがあります。海洋プレートは密度が高いため、海溝で大陸プレートの下へ沈み込んでいきます。

5 まとめ マントル対流により大陸は移動する

プレートの運動に伴い、大陸は移動しています。そしてプレート運動や大陸移動の原動力は、マントル対流だと考えられています。では、マントルはどのように対流しているのでしょうか。

1992年、地球内部ダイナミクス領域の深尾良夫 上席研究員たちは、地震波トモグラフィーという技術により、地球内部の地震波の伝わり方を画像化しました。それにより、東アジアの下には沈み込んだプレートがマントルの底へ落ちる巨大な下降流「スーパーコールドブルーム」が、アフリカと南太平洋にはマントルの底から湧き上がる巨大な上昇流「スーパーホットブルーム」があるらしいことが分かりました。

このようなマントルの大規模な対流と大陸移動はどのように関係しているのでしょうか。

岩石層が対流する？

マントルは岩石の層です。固体である岩石の層で本当に対流が起きるのでしょうか。実は、マントルの岩石は数百万年、数千万年以上の時間スケールでは、水あめのような“ねばねばした流体”として、非常にゆっくりと動いています。マントルの岩石の粘性率や密度などを推定し、マントル対流をコンピュータのなかで再現する研究が行われてきました。そのような研究により、マントルは対流することが確かめられています。

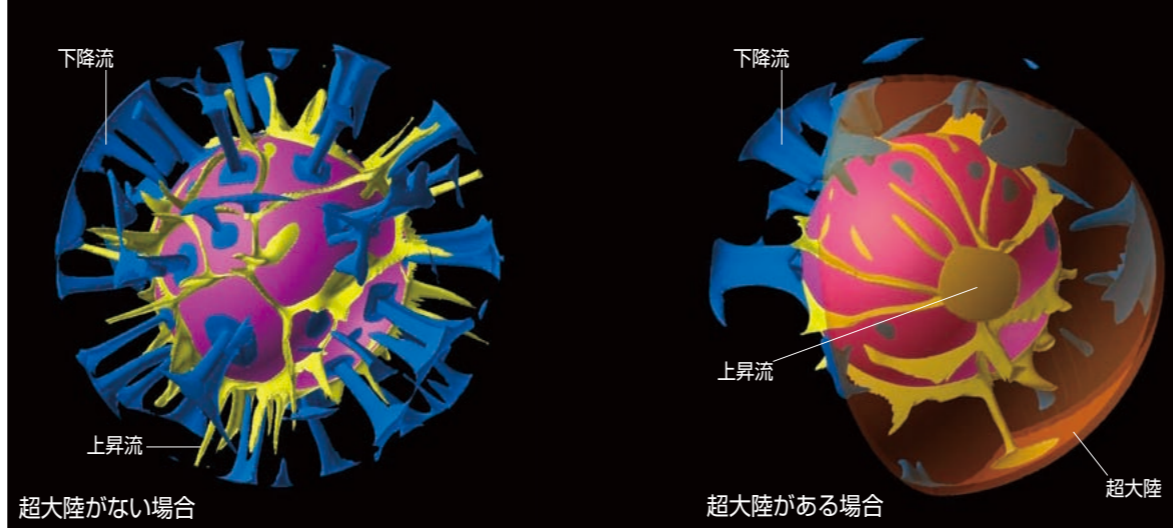
大陸がスーパープルームをつくり出す

マントルはどのようなかたちで対流しているのでしょうか。地球内部は深くなるほど温度が高くなります。マントルは熱対流を起こし、地球内部の熱は地球表層で冷やされます。その地球表層の3~4割は大陸で覆われています。大陸は毛布のような断熱材の役割をして、地球内部の熱を閉じ込めます。

吉田晶樹 主任研究員は、超大陸がある場合とない場合でマントル対流がどのように変化するかを、コンピュータ・シミュレーションによって調べました。すると、地球表層に超大陸がない場合には、たくさんの細い上昇流と下降流が均等に分布していることがわかります。対流の規模が小さいのです。ところが、超大陸がある場合にはスーパーホットプルームのような大規模な上昇流が大陸の下にいくつか発生し、対流の規模が大きくなります。超大陸の存在は、マントル対流の規模に大きな影響を与えるのです。

大陸移動とマントル対流の相互作用

では、大陸移動とマントル対流はどのように関係しているのでしょうか。大陸はプレート運動に伴い変形したり移動した



▲地球表層の超大陸とマントル対流

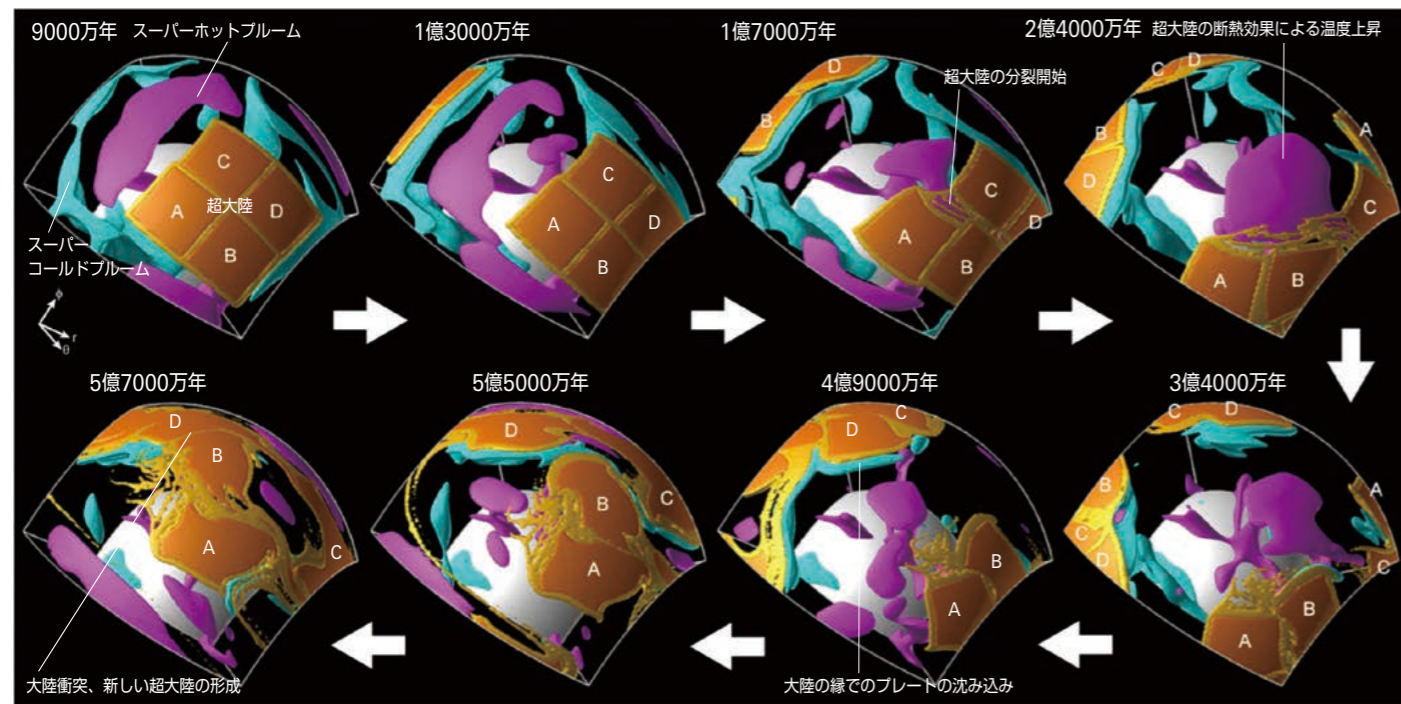
りします。そのような大陸の離合集散を伴うマントル対流の三次元シミュレーションは計算が難しく、実現していませんでした。吉田主任研究員は2010年、世界で初めてそのシミュレーションに成功しました。

まず、地球表層にA~Dの4つの大陸が集まった超大陸をつくりました。すると、時間がたつにつれて、超大陸が大きな断熱材の役割をして、超大陸の下の温度が高くなります。こうして地球表層で温度の高いところと低いところの温度差が大きくなります。するとマントルに大規模な対流が起きて、スーパーホットプルームが活発になります。

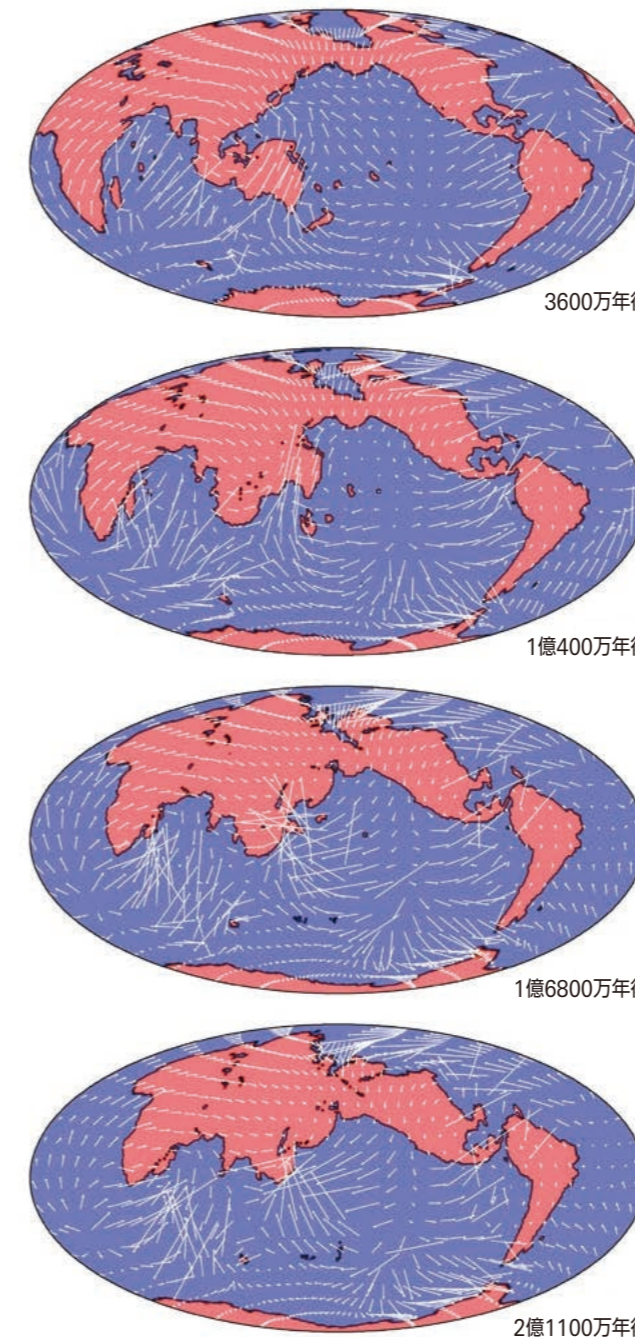
やがてスーパーホットプルームの上昇により超大陸が分裂します。各大陸が移動して分散すると、地球表層の温度差が小さくなり、スーパーホットプルームの活動が弱くなります。そして大陸の縁でのプレートの沈み込みに伴い大陸は再び衝突・合体を始め、新しい超大陸がつくられます。

コンピュータのなかで、このような大陸の離合集散が約6億年の周期で起きました。現実の地球では、5億~7億年の周期で超大陸がつくられてきたと考えられています。

▼大陸移動とマントル対流の三次元シミュレーション



▼未来の大陸移動と超大陸



白い矢印の方向と長さは、プレートの運動方向と速度を示す

地球環境や生命進化に影響

生命の歴史では、これまでに何度か大量絶滅が起き、進化に大きな影響を与えてきました。史上最大の大量絶滅は約2億5000万年前に起きました。その原因はよく分かっていませんが、活発なマグマ活動による地球環境の激変が原因だったという説があります。それは超大陸パンゲアの下に上昇してきたスーパーホットプルームに伴うマグマ活動だった可能性が指摘されています。

このようにマントル対流と大陸移動は、地球環境や生命進化に大きな影響を与えてきたと考えられています。

地球の歴史を再現する

大陸をつくる物質は、海洋プレートの沈み込みに伴う岩石の組成変化によってつくられると考えられています。しかし現在の大陸移動とマントル対流のシミュレーションでは、大陸の成長は再現できていません。

「誕生したばかりの原始地球は、海洋プレートだけだった。やがて海洋プレートの沈み込みによって大陸が生まれ、その大陸が成長と離合集散を繰り返してマントル対流の振る舞いに影響を与え、地球は進化してきた」と考えられています。吉田主任研究員はそのような地球の歴史をコンピュータのなかで再現することを目指しています。

約2億年後に新しい超大陸が出現

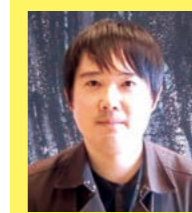
さらに吉田主任研究員は、未来の大陸移動についてもコンピュータ・シミュレーションを行っています。

現在、分散している大陸は、約2億年後に再び集まり、新しい超大陸が形成されると予測されています。過去の例から考えると、未来の超大陸のでき方には2通りのパターンがあり得ます。1つは大西洋が再び閉じるパターン。もう1つは、太平洋が閉じるパターンです。

吉田主任研究員は、太平洋が閉じるパターンで、未来の大陸移動をシミュレーションしてみました。すると北アメリカ大陸とユーラシア大陸が衝突し、さらにオーストラリア大陸が北上してユーラシア大陸に衝突しました。その衝突帯に位置する日本列島は大陸の一部となります。

このような大陸移動のシミュレーションは、地球内部の活動や地球環境変動、生命進化などの地球の歴史を理解する上で欠かせない研究です。

BE



吉田晶樹 主任研究員

大学で地学の勉強を始めたころ、岩石の名前を覚えるのは苦手でした。その後、プレート運動やマントル対流のような地球規模の活動を学びました。その活動が生み出したものとして岩石を眺めると、興味が湧いてきます。地学は、地球全体のダイナミックな営みを想像しながら勉強すると、とても面白いと思います。

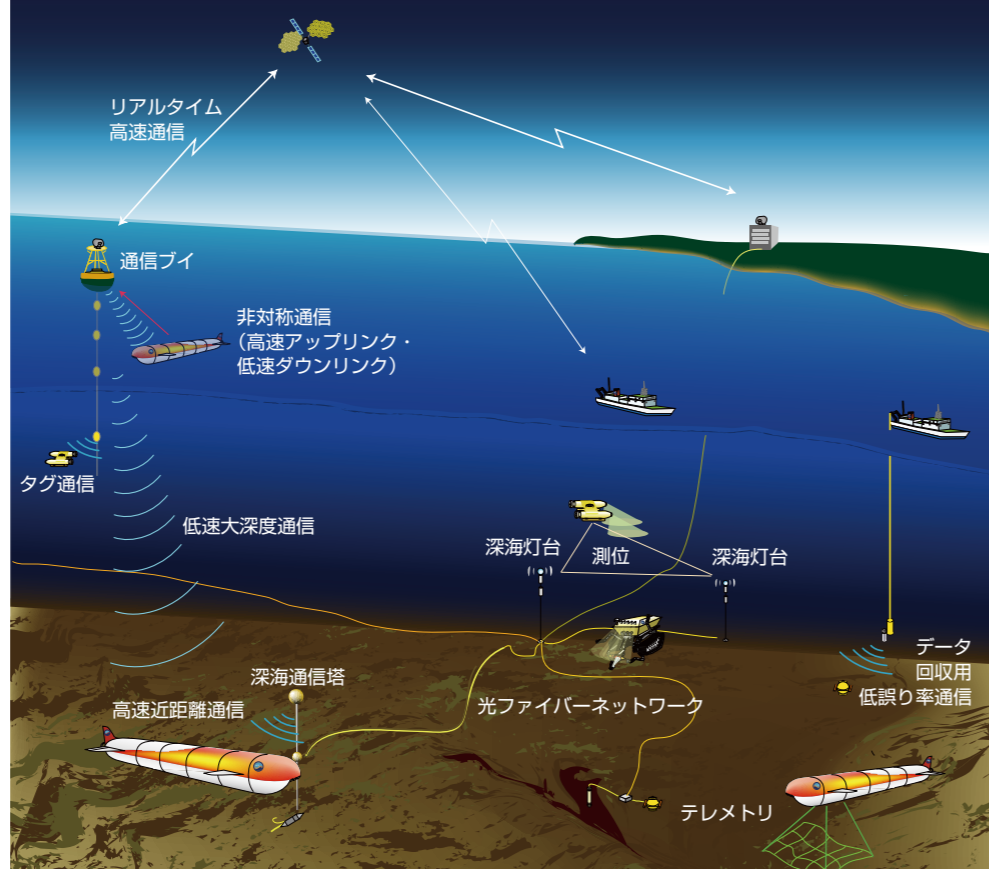


図1 水中音響通信の未来構想

近距離でも高速なデータ通信、長距離への通信など、用途に応じた通信方法が開発されている。それらの通信方法を組み合わせて、水中音響通信のネットワークがつけられるだろう

図2 水中音響通信で使われる周波数

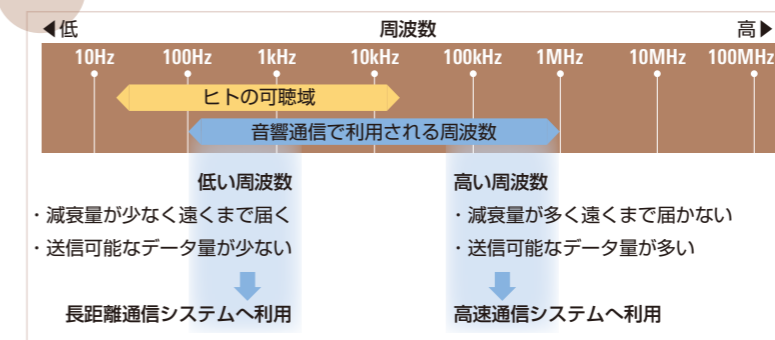
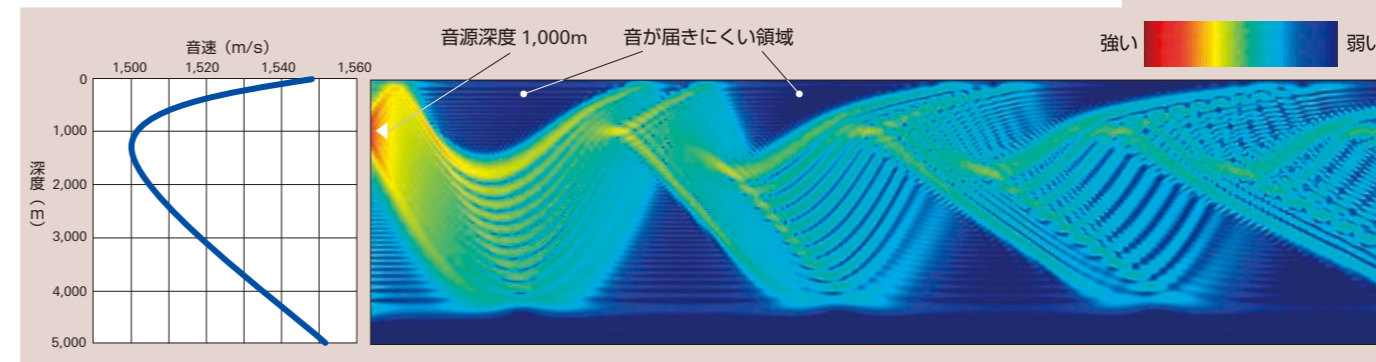


図3 海中での音波の伝わり方

中緯度海域での典型的な音速分布(左)に基づいて、水深1,000mの音源から水平方向に出した音波が水平距離200km先まで伝わる様子をシミュレーションした。音波は音速が遅い方へ曲がるので、音速が最も遅いところに沿って遠方まで伝わっていく



音を使った海中高速通信 最新の音響データ伝送技術

2010年8月21日 第116回地球情報館公開セミナーより

携帯電話やGPSで使われる電波は、水中では遠くまで届きません。そのため、海中での無線通信には音波が使われています。私たちは、音波を使って海のなかで自在にデータ通信をすることを目標として、研究を進めています。海洋研究開発機構 (JAMSTEC) でこれまでに実用化された音響通信システムや、現在研究中の、より高速、より長距離を目指した新しいシステムについて紹介します。

は、伝播してきた音波は、音速の遅い方へ屈折するという性質があります。図3は、水深1,000mの音源から放射した音波がどのように伝わるかをシミュレーションしたものです。音波は音速が遅い方へ屈折するので、表層では下へ、深層では上へ屈折します。音波は波打つように進み、音速が一番遅いところに沿って遠くまで到達します。一方、音源の近くでも、音が届きにくい領域もあります。



海洋工学センター
先端技術研究プログラム
グループリーダー
越智 寛

おち・ひろし。1965年、広島県生まれ。工学博士。1990年、電気通信大学大学院博士前期課程電子情報学専攻修了後、海洋科学技術センター(現在の海洋研究開発機構)に深海開発技術部の研究員として入所。2001年から1年間、イギリス・ニューカッスル大学在外研究員。2009年から現職。主に水中音響通信に関する研究に従事

音波とは

私たちは携帯電話で通信したり、GPSを使って車の位置を知ったりすることができます。どちらも電波を使って情報を送っています。しかし、水中で活動している探査機と通信したり、その位置を知りたいとき、陸上のように電波は使えません。電波は水に吸収されてすぐに弱くなってしまい、遠くまで届かないからです。水中での通信には、電波より減衰量の小さい音波が使われます。

音は、物体の振動によって発生します。物体の振動は、隣の物質、その隣の物質へと伝搬していきま。音は波のように伝わることから、「音波」と呼ばれます。電波などの電磁波は、真空中でも伝わります。一方、音波は、振動を伝搬する物質がない真空中では伝わりません。

ヒトは、周波数が20Hzから20kHzくらいの音波を感じることができます(図2)。周波数とは、1秒間に繰り返される波の数

のことで、Hz(ヘルツ)という単位で表します(kHzは1000Hz、MHzは100万Hz)。音波は、周波数によって特徴があります。その特徴を生かして、通信をはじめ、地震観測や地下の構造探査、水深の計測、魚群探知など、さまざまな用途に利用されています。

水中音響技術の歴史

初めて水中の音を聞いたのは、レオナルド・ダビンチだといわれています。ダビンチは、長い管の先端を海のなかに入れて遠くの船で発した音を聞くことに成功しました。これが、水中音響技術の始まりです。

科学的な実験は、1826年にスイスのジュネーブ湖で、水中を伝わる音波の速度を測定したのが最初です。水中の鐘をたたくと同時に光を発し、離れた場所にいる観測者が光を見てから音が聞こえるまでに何秒かかったか計測しました。その結果、水温が8℃のときの水中の音速は

秒速1,435mであると求まりました。水中の音速として現在通用している、秒速1,500mにとっても近い値です。

1912年、豪華客船「タイタニック」が氷山に衝突して沈没しました。この事故をきっかけに、水中の送信装置から音波を出し、反射して返ってくる音を捉えることで障害物の存在を探る装置が開発されました。ソナーの原型です。この装置の試験中、氷山から返ってくる音波とまったく違う時間に音が返ってくることに気が付きました。それは海底で反射したもので、音波を使って水深を測る音響測深器の発明につながっていきました。そして第一次世界大戦では、潜水艦対策のためにソナーが開発され、水中音響技術が一気に進みました。

音は曲がりながら進む

音波の速度は、気温15℃の気中では秒速340mです。一般にかたいものほど

音速が速く、鋼鉄は秒速約5,000m、水中は秒速約1,500mです。水中の音速は、水温や水圧によっても変わります。

音の伝わり方が水温や水圧によってどのように変化するかを調べるため、2010年3月に伊豆小笠原海域で実験を行いました。南北に並んだ直線上の3点で、海面から水深2,000mくらいまでの水温と音速を計測しました。音速は、表層では水温が高い南の観測点ほど速くなっています。そして、3点とも深くなるほど音速が遅くなります。これは、水温が下がっていくからです。しかし、水深1,000mを超えると、再び音速が速くなります。これは、水圧によって水が「かたく」なるからです。こうした水温や水深による音速の違いを把握することは、高精度な水中音響通信を実現するために、非常に大切なことです。

また、音波は真つすぐ伝わるわけではありません。音速が異なる物質の境界で

音波を使って画像を送る

私たちは、こうした環境のなかで画像や探査機制御などの情報を、音波を利用してやりとりするために、水中音響通信技術の研究を進めています。

水中音響通信には、大きく分けて「水中通話」と「データ通信」があります。水中通話とは、ダイバーや有人深海調査船の乗組員と海上の船舶との間で音声をやとりするものです。JAMSTECでは、有人潜水調査船「しんかい6500」と支援母船との間で水中通話を行っています。

データ通信は、「テレメトリ」と「デジタル通信」に分けられます。テレメトリとは、探査機から海上の船舶に自分の位置情報を送るなど、情報量の少ない、低速のデータ通信です。海底に設置した地震

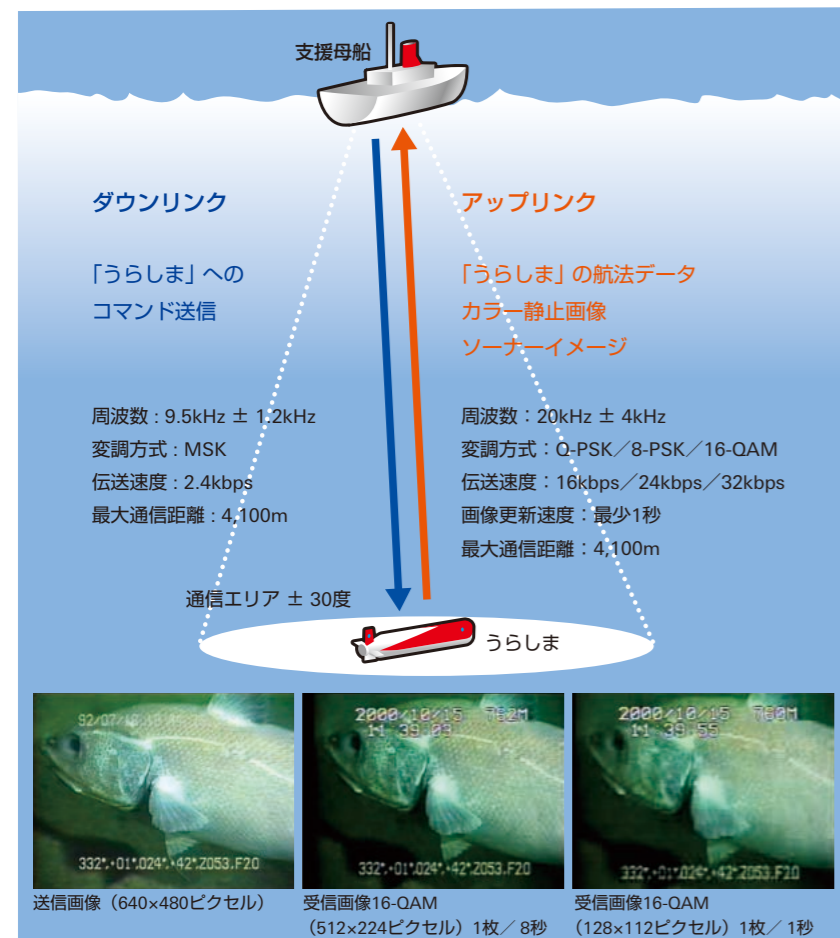
計や、おもりで係留した観測装置を回収するとき、船舶からおもりの切り離し・浮上の指令を送り、観測装置からは応答信号を返します。これも、テレメトリの1つです。

デジタル通信では、画像などの大きな情報を高速に送信します。画像を音波で送信するには、まず画像の情報をデジタルデータに変換します。さらに、デジタルデータを音波の周波数や位相に変換する必要があります。これを「変調」といいます。変調方式には、情報を音波の周波数に割り当てる「FSK」(周波数遷移変調)、音波の位相に割り当てる「PSK」(位相遷移変調)、音波の位相と振幅に割り当てる「QAM」(直交振幅位相変調)があります。

受信側では、音波をデジタルデータに変換し、そこから情報を導き出します。これを「復調」といいます。音波が水中を伝わる間に、周囲の雑音や減衰、海底や海面での反射、水中での屈折など、さまざまな外乱を受けます。復調するとき、いかに外乱の影響を補正するかが重要で、そのための技術開発を進めてきました。ここからは、JAMSTECで実用化した水中音響通信システムについて紹介しましょう。

図4 「うらしま」の水中音響データ伝送システム

ダウンリンクは指令(コマンド)を確実に送るために、周波数の幅を狭くしている。アップリンクは、大量のデータを送る必要があるため、周波数の幅を広くしている。下は、送信画像と受信画像



「うらしま」の音響データ伝送

深海巡航探査機「うらしま」は、航続距離最大300km(燃料電池使用時)、最大潜航深度3,500mの大型無人探査機です。海底に設置された音響灯台に向けて音を出し、音響灯台から返ってきた応答信号をたどって自律航走します。「うらしま」は、支援母船とケーブルでつながれていません。緊急時に対応するため、水中音響通信を使って支援母船から探査状況をリアルタイムでモニターしています。

支援母船から「うらしま」に向けた通信を「ダウンリンク」と呼びます(図4)。ダウンリンクでは、「うらしま」へ制御のための指令を送ります。データ量が少ないので、周波数の幅を狭くして確実に送ることを狙っています。「うらしま」から母船へ向けた通信は、「アップリンク」といいます。アップリンクは、「うらしま」の速度や深度など航法データのほか、カメラで撮影した静止画像、ソーナーイメージなど大量のデータを送る必要があるため、使う周波数の幅も広くして、高速な伝送ができるようにしています。

「うらしま」で撮影した画像は、16-QAMという変調方式で、8秒に1枚ずつ支援母船に送ることができます。解像度を落としてでも早く送信したい場合には、8分の1の解像度で1秒に1枚送ることができます。

より高速の通信を目指して

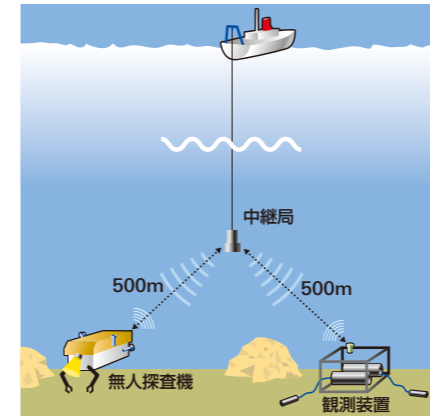
周波数の低い音波は遠くまで届きますが、送信できるデータ量は少なくなります。周波数の高い音波は減衰量が大きいため遠くまで届きませんが、同じ時間でより多くのデータを送ることができます。現在、低い周波数、高い周波数それぞれの特徴を生かした新しい通信システムを研究しています。

1つは、高い周波数の音波を使い、より高速の通信を目指したシステムです。「うらしま」のアップリンクで使用している20kHzより高い80kHzの音波を使います。500~1,000mという短い距離ですが、通信速度80~120kbps(bps:通信速度の単位で、1秒間に何ビットのデータを送信できるかを表す)を目指して研究を進めています。「うらしま」の通信速度は最大32kbpsですから、2.5~4倍速くなります。

この高速通信が実現すれば、海底に設置した地震計の近くに海上の船舶から送

図5 研究中の高速通信システム

海上の船舶から中継器を、地震計などの観測装置や無人探査機の近くに下ろすことで、観測装置を回収せずにデータを受信したり、無人探査機をリモートコントロールしたりすることが可能になる



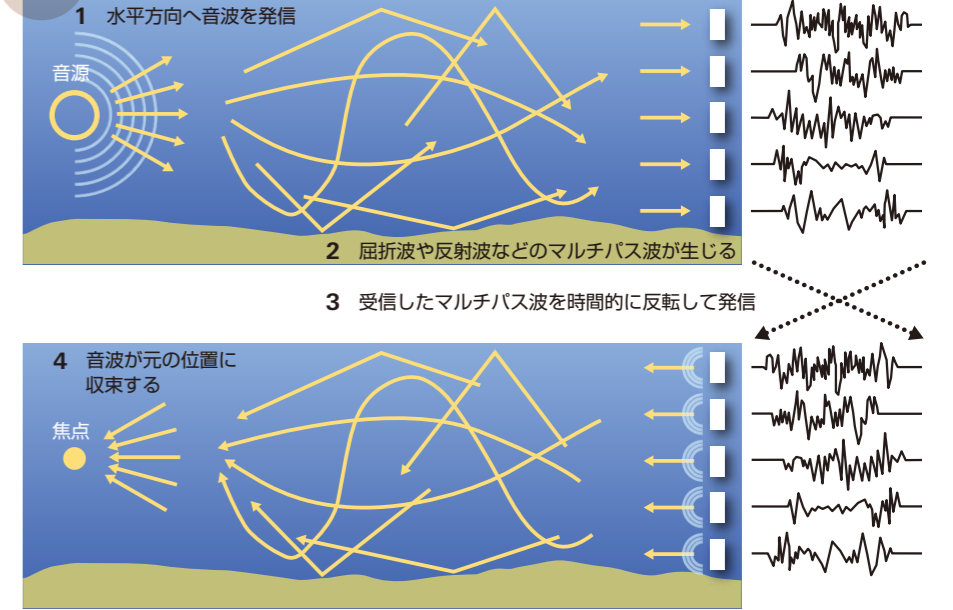
受信機を備えた中継器を下ろし、地震計を回収することなく観測データを手にすることができるようになります(図5)。もう1つ期待される使い道は、無人探査機のリモートコントロールです。たとえば、「かいこう7000-II」は母船と光ファイバーケーブルでつながっているため、動きが制限されます。高速通信システムが実現すれば、ケーブルをなくし、中継器から無人探査機をリモートコントロールすることが可能になります。深海の調査研究を効率的に進めることができるようになるでしょう。

2010年1月に、高速通信システムの試験を行いました。水深約1,600mの海底に送信機を設置し、その近くに母船から受信機を下ろしてデータ通信を行いました。送信機との距離を少しずつ広げ、通信エラーの有無を調べました。

その結果、通信速度80kbpsでは約900mまで、120kbpsでは600m以上の距離まで問題なく高速データ通信ができることが分かりました。距離500~1,000m、伝送速度80~120kbpsという目標を、ほぼ達成しています。

試験で送信したのは、320×240ピクセル(画素)のカラー画像をJPEG方式で5,825バイトに圧縮した画像データでした。この画像を送るのにかった時間は、Q-PSK変調方式では約0.8秒、8-PSK変調方式では0.6秒でした。同じ画像を送るには、「しんかい6500」で8秒、「うらしま」でも4秒かかるので、とても高速になったことが分かります。このように高速で画像

図6 位相共役通信の原理



を送信することができれば、母船上で深海の画像を見ながら無人探査機のマニピュレータを操作することも可能になるでしょう。現在、リアルタイム復調の試験に向けてハードウェアの試作をしています。

700kmの長距離通信を実現

低い周波数による長距離の通信では、500Hzの音波を使って、100~1,000kmという長距離を目標にしています。伝送速度の目標は100bpsと非常に遅いのですが、ほかに通信手段のない海中で、探査機の状態だけでも知りたいときに必要になる技術です。しかし、通信距離が長くなるほど、海面や海底で反射したり水中で屈折したりした波がたくさん生じて、通信の障害になります。音源から直接届く直接波と重なり合って、データを正しく識別できなくなってしまうのです。

これまでは、デジタル信号処理によって反射波や屈折波を取り除く方法が取られていましたが、外乱が多くなると除去し切れません。私たちは、反射波や屈折波を除去するのではなく、逆に信号の乱れを利用してエラーのない通信を実現する「位相共役通信」という方法を開発しました(図6)。受信装置が捉えた音波をかき集めて、ビデオを巻き戻すように時間を逆転した位相共役波を生成し、送信装置へ送り返します。すると位相共役波は逆にたどって元の音源に収束するので、きれいな信号を受信できます。音を出す方向をいくら狭くしても距離が遠くなるとい

ろいろな経路の波が届くことになってしまうのならば、元の場所に集められるようにしましょう、という逆転の発想です。

この方法を用いて2009年、水深約4,000mの海域で300kmの長距離通信に成功しました。これほどの長距離通信の成功は、世界で初めてです。現在、さらに距離を伸ばし、700kmの通信にも成功しています。この技術をさらに発展させることで、遠く離れた海上にいる船舶と通信しながら、北極海の氷の下を探査することも可能になるでしょう。

水中音響通信の未来

「通信距離(km単位)×伝送速度(kbps単位)」の値が大きいほど、通信の性能がよいことを示します。これまでの通信装置では、その値は40ぐらいでした。数千kmの距離の通信を行う「しんかい6500」や「うらしま」では性能が大幅に向上し、100ぐらいに達しています。一方、近距離高速通信は、ずっと40以下でした。しかし、この数年でようやく100に近づいてきました。引き続き、より高速の通信、より長距離の通信の実現を目指した研究を進めています。

また、水中音響通信のネットワークの構築も大きな目標の1つです。さまざまな用途や状況に応じて周波数や通信方式などを使い分ける技術を開発し、無人探査機を2機同時にリモートコントロールするなど、新たな水中音響通信技術を実現していきます(図1)。

『Blue Earth』の編集作業のさなか、3月11日に三陸沖を震源とするマグニチュード(M)9の大地震が発生し、それによる大津波が東日本沿岸を襲い、未曾有の大震災となってしまいました。三陸沖はプレートの沈み込みによりM8より大きな地震が多発する海域で、記録によれば869年に発生したM8.3~8.6の貞観地震では極めて大きな津波が発生したことが知られていました。しかし、今回の東北地方太平洋沖地震での津波の高さは、それよりはるかに巨大だったと考えられています。

いくらかでも海洋に関する勉強をした人なら、海洋物理などの授業で津波の高さを表す数式を教わったことでしょう。その際、例として出てくるのが1960年に三陸地方に大きな被害をもたらしたチリ地震津波であり、そのときの津波が現在の防潮堤の高さを決める基準値になっていることも教わります。しかし、今回の地震・津波におけるすべてのデータが「想定外」であり、単に過去からのデータを積み重ねただけの研究では「想定」の枠から出ることができないという現在の科学・技術の限界を露呈してしまいました。

残念ながら現在、最新の地球科学研究成果を集結しても、天気予報のような地震予知は不可能です。しかし、将来の予知研究の推進には、本誌10ページのような地震発生領域を直接掘削する研究やDONET(地震・津波観測監視システム)のような広域の海底観測網の整備が必要とされています。

海洋研究開発機構(JAMSTEC)では、今回の1,000年に一度という大地震の詳細なデータを取得・解析し、これからの研究者に伝える責任があると考えています。そのために、職員の総力を結集して今後、調査・研究を行う決意を持っています。この編集後記を書いている時点では、JAMSTECの船舶は原子力発電所の事故で拡散した汚染物質の調査のため交代で沖合での採水を実施しており、併せて、汚染水の拡散シミュレーションなども行っています。今後は、震源域の海底や海底下の詳細な調査を計画しています。

最後になりましたが、Blue Earth編集委員会を代表して、東日本大震災で亡くなられた方々に心から哀悼の意を表するとともに、被災された方々の1日も早い復興をお祈りしております。(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 事業推進部 広報課

TEL.045-778-5406 FAX.045-778-5498

Eメール info@jamstec.go.jp

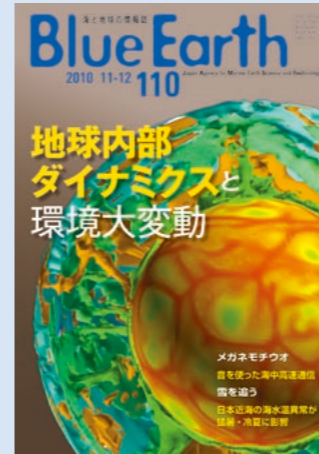
ホームページにも定期購読のご案内があります。上記URLをご覧ください。

*定期購読は申込日以降に発行される号から年度最終号(3-4月号)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案内

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。

賛助会(寄付)会員名簿 平成23年4月1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
株式会社アイ・エイチ・アイマリンユナイテッド	株式会社海洋総合研究所
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
株式会社アサツディ・ケイ	川崎重工業株式会社
朝日航洋株式会社	株式会社環境総合テクノス
アジア海洋株式会社	株式会社関電工
株式会社アルファ水工コンサルタンツ	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SGKシステム技研	極東貿易株式会社
株式会社NTTデータ	株式会社きんでん
株式会社NTTデータCCS	株式会社熊谷組
株式会社NTTファシリティーズ	クローバテック株式会社
株式会社江ノ島マリンコーポレーション	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MTS雪氷研究所	KDDI株式会社
有限会社エルシャンテ追浜	京浜急行電鉄株式会社
株式会社OCC	株式会社ケンウッド
沖電気工業株式会社	株式会社構造計画研究所

神戸ペイント株式会社	株式会社損害保険ジャパン
広和株式会社	第一設備工業株式会社
国際気象海洋株式会社	大成建設株式会社
国際警備株式会社	大日本土木株式会社
国際石油開発帝石株式会社	ダイハツディーゼル株式会社
国際ビルサービス株式会社	太陽日酸株式会社
五洋建設株式会社	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
株式会社サノヤス・ヒシノ明昌	株式会社竹中土木
三建設備工業株式会社	株式会社地球科学総合研究所
株式会社ジーエス・ユアサテクノロジ	中国塗料株式会社
JFEアドバンテック株式会社	株式会社鶴見精機
財団法人塩事業センター	株式会社テザック
シナネン株式会社	寺崎電気産業株式会社
清水建設株式会社	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
株式会社商船三井	東海交通株式会社
社団法人信託協会	洞海マリンシステムズ株式会社
新日鉄エンジニアリング株式会社	東京海上日動火災保険株式会社
新日本海事株式会社	東京製綱繊維ロープ株式会社
須賀工業株式会社	東北環境科学サービス株式会社
鈴鹿建設株式会社	東洋建設株式会社
スプリングエイトサービス株式会社	株式会社東陽テクノカ
住友電気工業株式会社	東洋熱工業株式会社
清進電設株式会社	株式会社中村鉄工所
石油資源開発株式会社	西芝電機株式会社
セナーアンドバーンス株式会社	西松建設株式会社

日油技研工業株式会社	富士通株式会社
株式会社日産クリエイティブサービス	富士電機システムズ株式会社
ニッスイマリン工業株式会社	物産不動産株式会社
日本SGI株式会社	古河電気工業株式会社
日本海洋株式会社	古野電気株式会社
日本海洋掘削株式会社	松本徽章株式会社
日本海洋計画株式会社	マリメックス・ジャパン株式会社
日本海洋事業株式会社	マリンサポート株式会社
社団法人日本ガス協会	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
日本興亜損害保険株式会社	株式会社丸川建築設計事務所
日本サルヴェージ株式会社	株式会社マルトー
社団法人日本産業機械工業会	三鈴マシナリー株式会社
日本水産株式会社	三井住友海上火災保険株式会社
日本電気株式会社	三井石油開発株式会社
日本ヒューレット・パカード株式会社	三井造船株式会社
日本マントル・クレスト株式会社	三菱重工業株式会社
日本無線株式会社	株式会社三菱総合研究所
日本郵船株式会社	株式会社森京建築事務所
株式会社間組	八洲電機株式会社
濱中製鎖工業株式会社	郵船商事株式会社
東日本タグボート株式会社	郵船ナブテック株式会社
株式会社日立製作所	ユニバーサル造船株式会社
日立造船株式会社	
株式会社日立プラントテクノロジー	
深田サルベージ建設株式会社	
株式会社フジクラ	
富士ゼロックス株式会社	
株式会社フジタ	

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23巻 第1号(通巻111号) 2011年3月発行

発行人 他谷 康 独立行政法人海洋研究開発機構 横浜研究所 事業推進部

編集人 満澤巨彦 独立行政法人海洋研究開発機構 横浜研究所 事業推進部 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, p24-27) / 鈴木志乃 /

坂元志歩(p2-19) / 佐藤ひとみ(p20-23, p28-31)

デザイン 株式会社デザインコンビビア (AD 堀木一男 / 岡野祐三 / 岩崎邦好 / 飛鳥井羊右ほか)

ホームページ <http://www.jamstec.go.jp/>

Eメールアドレス 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。

独立行政法人 海洋研究開発機構の研究機関

横須賀本部
〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2番地15
TEL. 046-866-3811(代表)

横浜研究所
〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173番25
TEL. 045-778-3811(代表)

むつ研究所
〒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)

高知コア研究所
〒783-8502 高知県南国市物部乙200
TEL. 088-864-6705(代表)

東京事務所
〒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)

国際海洋環境情報センター
〒905-2172 沖縄県名護市宇豊原224番地3
TEL. 0980-50-0111(代表)

Washington D.C. Office
1120 20th street, NW, Suite 700S,
Washington, D.C. 20036, USA
TEL. +1-202-872-0000 FAX. +1-202-872-8300

第12回 全国児童 『ハガキにかこう 海洋の夢コンテスト』

<http://www.jamstec.go.jp/j/kids/hagaki/index.html>

海洋への関心が高まっている今日、未来を担う子どもたちが持つ海洋への夢やあこがれ、興味をさらに高めるために、海洋研究開発機構（JAMSTEC）では全国の児童を対象とした絵画コンテストを、文部科学省などの後援により開催しています。作品募集は、毎年11月下旬から1月末ごろです。第12回コンテストには、全国から2万6709点の応募がありました。そのなかから入賞作品を紹介します。コンテストに関する詳しい情報は、JAMSTECのホームページをご覧ください。これまでの受賞作品もご覧いただけます。



特別賞

絵画部門

横須賀市教育委員会委員長賞
波と海流でエコ発電!

青森県八戸市立美保野小学校6年
佐藤元重



特別賞



絵画部門

横浜市教育委員会教育長賞
魚にのって海を探検

静岡県静岡市立服織小学校2年
仲西美波



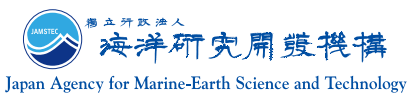
特別賞



絵画部門

むつ市教育委員会教育長賞
フッシュヨンセンターウコ

神奈川県横浜市立金沢小学校3年
永橋 凱



ホームページ <http://www.jamstec.go.jp/>

定価300円 (税込)