

Blue Earth

海と地球の情報誌

162

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

ISSN 1346-0811
2020年1月発行
年4回発行
第31巻 第4号
(通巻162号)



1 特別記事

真核生物誕生の鍵を握る微生物
「アーキア」の培養に成功

4 特集

海域地震火山 の新研究

18 社会とつながるJAMSTEC

ヨットレースで海の
マイクロプラスチックを調査する

真核生物誕生の鍵を握る微生物「アーキア」の培養に成功

取材協力

井町寛之

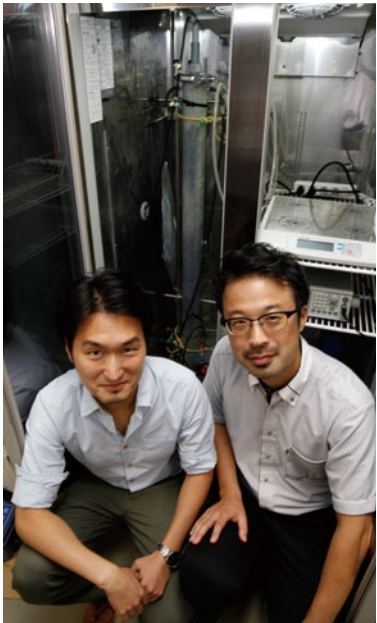
JAMSTEC 超先鋭研究開発部門
超先鋭研究プログラム 主任研究員

Masaru K. Nobu (延 優)

産業技術総合研究所 生物プロセス研究部門
生物資源情報基盤研究グループ 研究員

「私たちの大切な仲間です」。そういつて、井町さんと延さんが紹介するのは、高さ1mほど、筒状のリアクターと呼ばれる装置だ。温度を一定に保つインキュベーターのなかに入っている。

「2006年12月、このリアクターで、深海底から採取した堆積物に含まれる微生物の培養を始めました。そして、私たちは真核生物の祖先に最も近いアーキアを世界で初めて培養することに成功し、それがどういう姿をしていて、どういう生き方をしているのかを明らかにしました。実験開始から12年。長いですね」と井町さんは笑う。



井町寛之さん（右）と延優さん。下降流懸垂型スポンジリアクターの前で。

私たちヒトや植物を含む真核生物は、どのようにして地球上に誕生したのか

——真核生物誕生は、生物学最大の謎ともいわれている。

JAMSTECの井町寛之さんと、産業技術総合研究所の

延 優さんは、真核生物の祖先に最も近い「アーキア」を深海底の堆積物から培養することに世界で初めて成功した。

顕微鏡観察や全ゲノム解析によって明らかになった細胞の

構造や生理的な機能、遺伝子の特徴などから、

真核生物誕生の道筋が見えてきた。

アーキアから真核生物へ

地球上に生息する生物は、アーキアとバクテリアと真核生物の3つの大きなグループに分けられている。動物や植物や菌類は真核生物である。微生物とは分類ではなく、肉眼では観察できない小さな生物の総称だ。

地球の生命の共通祖先は、約40億年前に誕生したと考えられている。これまでの研究によって、共通祖先からバクテリアとアーキアに分かれ、さらにアーキアと真核生物に分かれて進化してきたことが明らかになっている。しかし、真核生物がどのように誕生したのかは謎に包まれたままだ。

真核生物は、細胞のなかに核を持ち、そこに遺伝情報が書かれたDNAが収められている。一方、アーキアとバクテリアは細胞のなかに核を持たない原核生物である。核を持たない原核生物のアーキアから、どのようにして核を持つ真核生物が誕生したのか。それが分からないのだ。

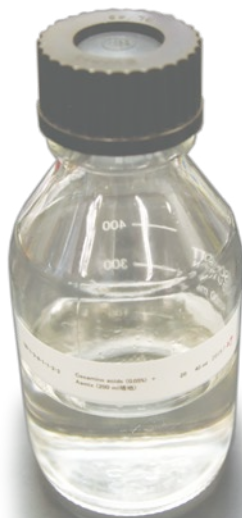
ある種類のアーキアがバクテリアを取り込み、共生させることによって真核生物が誕生した、という仮説が広く支持されている。真核生物の細胞には、エネルギーをつくり出すミトコンドリアという小器官がある。取り込まれたバクテリアが、やがてミトコンドリアになったと考えられている。しかし、原核生物から真核生物になる途中の、中間体のような生物は見つかっていないため、その仮説は検証できていない。

「真核生物の祖先に近いアーキアについて詳しく調べれば、真核生物の誕生について、もっとよく分かるに違いありません。だから、真核生物の祖先に近いアーキアをどうしても培養したかったのです」と井町さんは語る。

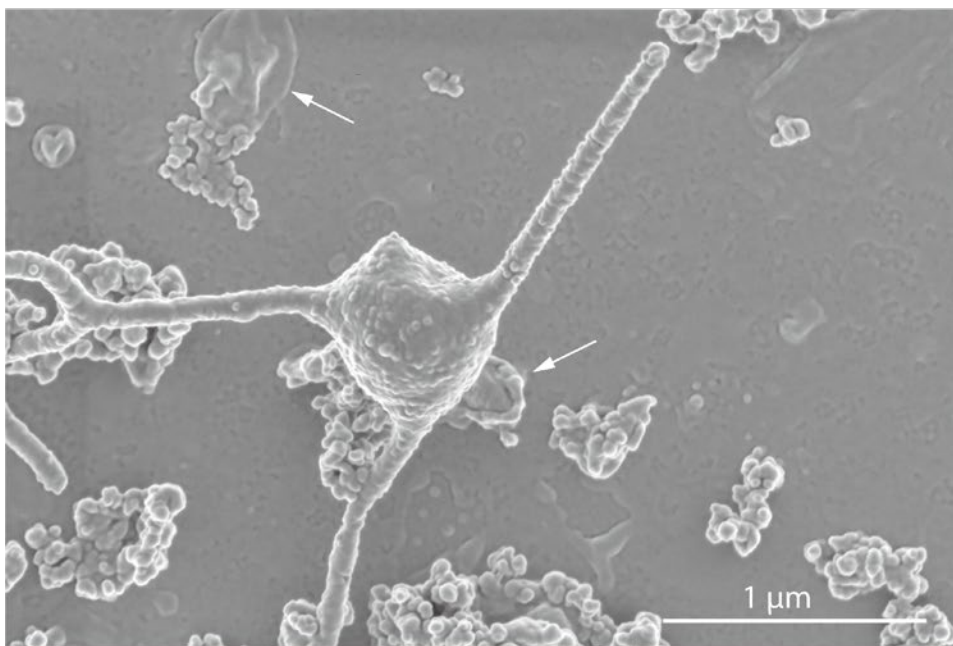
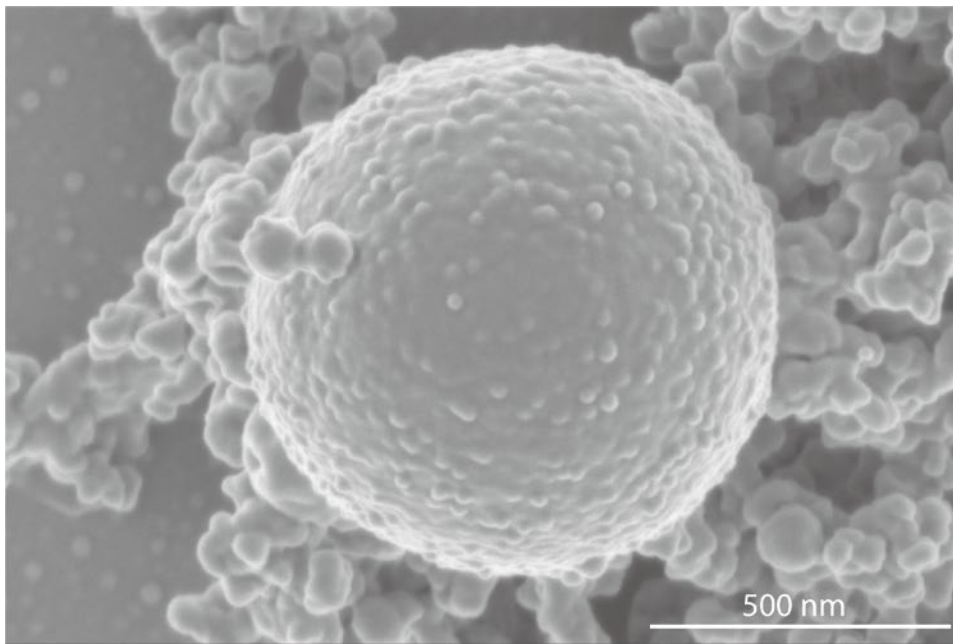
微生物を研究する2つの方法：培養とゲノム解析

微生物を研究するには、大きく分けて2つの方法がある。1つは、目的の微生物を培養して、細胞の形態、生理的な性質、生活環などを調べる方法である。もう1つは、微生物のゲノムを調べる方法だ。ゲノムの本体であるDNAの塩基配列を読み取って、どういった遺伝子があるかを解析し、どのような機能を持っているのかを推定する。今回の研究では2つの手法を組み合わせ、培養を井町さん、ゲノム解析を延さんが担当した。

現在、ロキアーキオータと呼ばれるアーキアの一群が真核生物に最も近いと考えられている。しかし延さんは、「ロキアーキオータは2015年、深海堆積物中の微生物集団に由来するゲノムを網羅的に読み取るメタゲノムという方法で発見されました。培養されたことが一切ないため、どのような形態をしていて、どのような生き方をしているのかは分かっていませんでした」と指摘する。「ロキアーキオータの培養に成功すれば、細胞の形態を観察できます。さらに、そのアーキアの全ゲノムを解析できるようになるので、メタゲノ



MK-D1株を培養中



ム解析では分からない詳細な機能についても分かります。そこにはきっと、真核生物誕生の謎を解く鍵があるでしょう。だからこそ、ロキアーキオータの培養が待ち望まれていたのです」

井町さんが培養を始めた2006年には、まだロキアーキオータという名前はなかったものの、真核生物の祖先に近縁なアーキアはメタンを含む冷たい水が湧き出している深海底の堆積物に多く生息していることが、遺伝子解析から分かっていた。そこで2006年5月、有人潜水調査船「しんかい6500」によって、紀伊半島沖の南海トラフにあるメタン湧出帯から深海堆積物を採取してきた。

「その『しんかい6500』に、私も乗っていました」と井町さん。「4月にJAMSTEC

に移ったばかりで、『しんかい6500』に乗ったのも初めてでした。水深2,533mの深海底で堆積物が採取される様子を目の前で見て、とても感動して、とても興奮したことを、よく覚えています」

つるしたスポンジで微生物を培養

真核生物の祖先に最も近縁なアーキアを含んでいると思われる深海堆積物は手に入れた。しかし、微生物の培養はとても難しく、地球上に存在する微生物のうち培養できているものはわずかで、1%以下だともいわれている。

「深海堆積物からの微生物培養は特に難しいことが知られていました」と井町さんはいう。「試験管やシャーレを使う従来の方法では、おそらく培養できない。



下降流懸垂型スポンジリアクター。なかにスポンジがつるされている。

真核生物に最も近縁なアーキアであるMK-D1株の走査型電子顕微鏡写真。上は、増殖しているときの細胞形態。下は、増殖が終わるころの細胞形態で、触手状の長い突起をつくる。矢印は、MK-D1株が細胞外に放出した小胞。

新しい方法が必要だと考え、水処理装置を使った培養のアイデアを思い付きました。それが、スポンジを微生物の住み処として使った、下降流懸垂型スポンジ（down-flow hanging sponge : DHS）リアクターです」

井町さんは学生時代、微生物を使った排水処理技術の研究をしていた。微生物を含ませておいたスポンジに排水を通すと、微生物が排水中の有機物や無機物を分解して水がきれいになる。「スポンジのなかにいる微生物を遺伝子解析で調べると、知られている微生物のほかにも、これまで培養されたことがない未知の微生物がたくさんいます。ということは、水処理装置を使えば深海堆積物中の未知の微生物も培養できるのではないか、とひら

めいたのです」

具体的には、深海堆積物を微生物を育てるための培地で薄め、その泥水をスポンジにもみ込む。泥と微生物が付いたスポンジを20個ほど、ナイロン製の釣り糸を使って縦に並べてつなぎ、塩化ビニル製の筒状容器のなかにつるす。深海堆積物中の多くの微生物は、酸素がないところでしか生育できない嫌気性微生物だ。リアクターのなかに酸素が入らないようにして、上から栄養分を含んだ人工海水を、下からはメタンガスを供給して微生物を培養する。

ついに培養に成功

そうして2006年12月、培養を開始した。ときどきスポンジから試料を少し取り出し、遺伝子解析を使ってどのような微生物が増殖しているかを調べる。ところが、「真核生物の祖先に近縁なアーキアが増えているというはっきりとした結果が一向に出ませんでした」と井町さんは声を落とす。「それでも諦めずに培養を続けていくと、ようやく目的のアーキアが増殖していることが分かりました。培養開始から約2,000日、5年半がたっていました」

しかし、スポンジから取り出した試料は、さまざまな微生物が混在して培養された状態だ。目的のアーキアだけを増やして、最終的にはそのアーキアだけを分離する必要がある。そこで、少しずつ内容を変えた培地を入れた試験管を数百本用意して、スポンジから取り出した試料から目的のアーキアを分離するための培養を

行った。

「すると1年後、培地がわずかに濁っている試験管がありました。微生物が増殖すると培地が濁るのです。遺伝子解析をしてみると、真核生物の祖先に近いとされているアーキアと、数種類の微生物と一緒に培養されていることが分かりました」。しかし、まだ道半ばだ。

植え継ぎとって新しい培地に移し替えながらの培養が続く。しかし、「このアーキアはなかなか増えない」と井町さんは嘆く。調べてみると、1個の細胞が2個の細胞に分裂するまでの倍加時間は14～25日かかっていた。よく研究に使われる大腸菌の1,000分の1と、とても遅い。また、細胞はある密度に達すると、増殖を停止する。このアーキアの最大細胞密度は、大腸菌の1,000分の1。少し増えると、増殖が止まってしまう。培養が非常に難しいアーキアだったのだ。

そうした苦労の末、2018年、メタン生成アーキアとの共培養系として真核生物の祖先に近縁なアーキアを分離することに成功した。そして、そのアーキアを *Prometheoarchaeum syntrophicum* MK-D1株と名付けた。深海堆積物を採取してから、12年がたっていた。

細胞のなかは単純、外には長い突起

さっそく、MK-D1株を電子顕微鏡で観察。球状の細胞で、大きさは550nm (1mmの約2,000分の1) ほどだった。真核生物の細胞内部には、核や小器官など複雑な構造がある。真核生物の祖先に近縁なアー

キアの細胞は、すでに複雑な構造を持っているのではないかと予測されていた。しかし、細胞のなかは単純で、核や小器官のような構造物はまったくなかった。

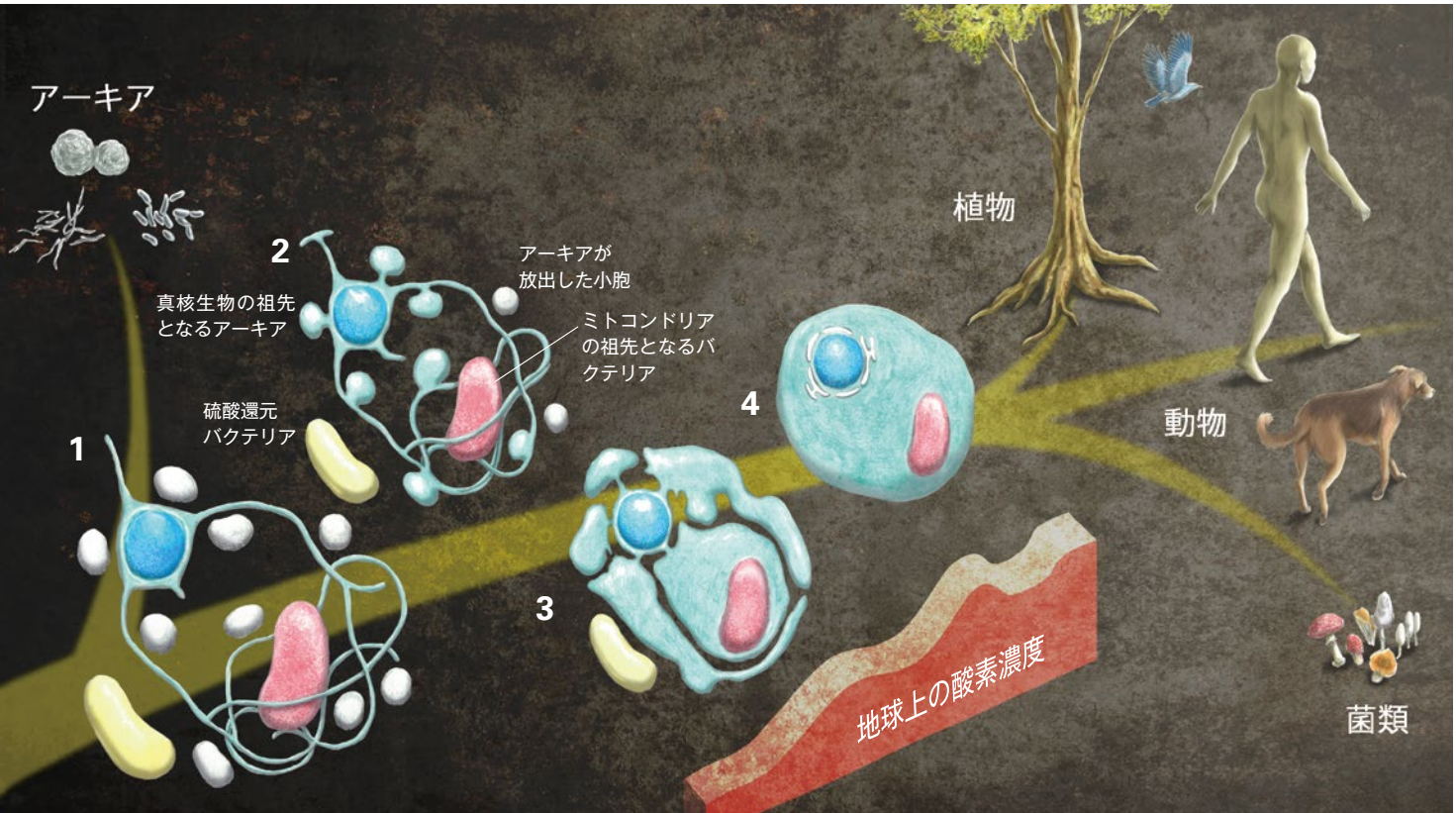
残念に思いつつMK-D1株の観察を続けていた井町さんは、あるとき、思わず声を上げた。「触手のような長い突起を持つものがいたのです！ そんなアーキアは見たことがなかったので、驚きました」。MK-D1株は、増殖が終わるころに長い突起を細胞の外につくることが明らかになった。また、細胞の外にたくさんの小胞を放出することも分かった。延さんも、「衝撃的な姿でしたね。培養して初めて分かることがたくさんあると、あらためて思いました」と振り返る。

真核生物に最も近縁なアーキアの生き方

延さんによるゲノム解析も行われた。「一般的なゲノム解析では、すでに知られている遺伝子の情報をもとに、その微生物がどのような機能を持っているかを推測します。それに対して私は、未知の遺伝子も含めて、しかも個々の遺伝子ではなくさまざまな組み合わせを考えながら解析することで、その微生物は何ができるのか、何が好きで何が嫌いか、どういう生き方をしたいのか、どのような歴史を持っているのか、といったことまで深く読み取ることを目指しています」

まず、MK-D1株はロキアーキオータ群に属し、原核生物のなかで真核生物に最も近縁な生物であることが示された。MK-D1株のゲノムには、真核生物だけが持っているとされていたアクチンやユビキチン、小胞体の輸送に関連する遺伝子がたくさん存在していた。その遺伝子からタンパク質がつくられて機能していることも確認できた。

またMK-D1株は、自身の細胞をつくるために必要なアミノ酸やビタミン、塩基を合成できず、ほかの微生物からそれらを供給してもらわないと生きていけない。「さまざまな微生物のゲノムを見てきましたが、ここまで何もできない微生物は初め



真核生物の誕生についての新しい進化説「E' (Entangle-Engulf-Endogenize) モデル」。Entangleは巻き込む (1・2)、Engulfはのみ込む (3)、そしてEndogenizeは内部に発達させる (4) という意味で、真核生物の祖先となるアーキア (青色で示した細胞) がミトコンドリアの祖先となるバクテリア (赤色で示した細胞) を取り込み、その共生関係が成熟していくそれぞれの過程を表現している。この一連の進化を通じて、私たち真核生物の祖先が生まれた。

てです」と延さん。

培養からも、MK-D1株は硫酸還元バクテリアとメタン生成アーキアと一緒にでなければ生存できないこと、3種類の微生物は密着して生育していることが分かっていた。MK-D1株は硫酸還元バクテリアやメタン生成アーキアからアミノ酸をもらい、硫酸還元バクテリアやメタン生成アーキアはMK-D1株がアミノ酸を代謝してつくった水素を受け取っていたのだ。

真核生物誕生の新しい仮説「E'モデル」

延さんは、ほかのアーキアのメタゲノム解析結果なども使って、真核生物の祖先に近縁の微生物はどのような生き方をしているかを探ってみた。すると、MK-D1株と同じように、アミノ酸を栄養源としてほかの微生物に依存して生きていたことが分かった。

そして井町さんと延さんは明らかにになったことをもとに、真核生物誕生についての新しい仮説「E'モデル」を提案した。——約27億年前、光合成を行うシアノバクテリアの登場によって地球に酸素が増

えてきた。真核生物の祖先となるアーキアにとって、酸素は毒だ。そのアーキアは、酸素を解毒してもらうために、MK-D1株で見られるような長い突起や小胞を使って酸素を利用するバクテリアを取り込んだ。やがて取り込まれたバクテリアはミトコンドリアとなり、最初の真核生物が生まれた——というものである。

これらの研究成果は、科学雑誌『Nature』に論文を投稿した後、プレプリントサーバーで公開した。すると、TwitterなどのSNSであつという間に世界中に拡散し、とても大きな反響があった。延さんは「反響はあると思っていましたが、想像を超えました」と顔をほころばせる。そして、こう続けた。「今回の成果は、培養とゲノム解析を組み合わせると、こんなに画期的なことができる、分かる、ということを示すよい例になったと思います。私たちは生物進化の専門家ではありません。しかし、培養のスペシャリストとゲノム解析のスペシャリストが組み、互いにリスペクトして互いの研究に興味を持つことで、生物進化の専門家にとってもしっくりくる仮説を提唱できたのだと思

ます」

2人はすでに次の研究を始めている。延さんは「細胞内部の構造がどのように複雑化していったのか、ゲノム解析から迫っていきたい」と語る。井町さんは、「真核生物の祖先に近いとされるほかのアーキアも培養して調べる必要があります。DHSリアクターのなかに真核生物誕生の鍵を握る微生物がほかにもいると期待して培養を続けています」

「原核生物に最も近い真核生物のゲノムも解析したい。両方向から攻めることで、原核生物から真核生物への道のりがより明確になることでしょう。井町さんの培養に期待しています」と延さん。

井町さんは、力強く答える。「培養は、失敗の繰り返しです。失敗をしても諦めない。そして、焦らずに待つ。それは自分の性格とも合っていますし、自分の強みだと思っています。培養されていない微生物をすべて培養して調べる。それが私の研究者としての目標です。これからも、誰も培養できていない微生物を培養していきます」

BE

(文・鈴木志乃／フotonクリエイト)

海域地震火山 の新研究

2019年、JAMSTECに海域地震火山部門が発足した。

3つのセンターにより、海域で発生する地震や火山噴火による
災害の軽減に貢献するための新しい研究が進められている。

取材協力 海域地震火山部門

野 徹雄

地震発生帯研究センター
プレート構造研究グループ 技術研究員

Hsiung Kan-Hsi

地震発生帯研究センター
海底地質・地球物理研究グループ 研究員

町田祐弥

地震津波予測研究開発センター
観測システム開発研究グループ 技術研究員

飯沼卓史

地震津波予測研究開発センター
地震予測研究グループ 研究員

上木賢太

火山・地球内部研究センター
地球内部物質循環研究グループ 技術研究員

田村芳彦

海域地震火山部門 専門部長（上席研究員）

鹿児島島の南、鬼界カルデラの縁（外輪山）
にある薩摩硫黄島

2019年11月、深海調査研究船「かいわれ」による
鬼界カルデラの調査より。

撮影：上木賢太／JAMSTEC

日本海地震断層の実態を海底下構造探査で探る

取材協力 野 徹雄 海域地震火山部門 地震発生帯研究センター
プレート構造研究グループ 技術研究員

日本海の拡大でできた断層に 圧縮の力がかかり地震が起きる

1983年、秋田県沖を震源とするマグニチュード(M) 7.7の日本海中部地震が発生。津波が日本海沿岸全域を襲い、大きな被害をもたらした。「私は当時、岩手県の小学校に通っていて、給食直前の授業中に教室が大きく長くゆれたことをいまでも覚えてます。秋田県の海岸に遠足で訪れていた小学生など100人以上の方がその地震・津波により亡くなりました」と野さんは振り返る。海域地震火山部門の地震発生帯研究センターでは地震発生帯の実態を解明する研究を進めている。野さんは、特に日本海で起きる地震の研究に注力している。

日本海中部地震の19年前の1964年には新潟地震(M7.5)、10年後の1993年には北海道南西沖地震(M7.8)が発生するなど、日本海ではM7後半の大地震と津波が10～数十年置きに繰り返し起きてきた。

「北海道南西沖地震を最後に25年以上、日本海でM7を超える地震は発生していません。日本海の場合、地震を起こす断層が陸地に近いところに多数存在しており、地震発生から津波到達までの時間が非常に短いという特徴があります。さらに、積雪量の

多い冬に日本海沿岸が大地震・津波に襲われた場合、想定外の被害が出る可能性もあります」

各地域がどれくらいの地震のゆれや津波による浸水高に襲われる可能性があるのか、高い精度で予測してハザードマップなどを更新して備える必要がある。

そもそも地震や津波はどのようにして起きるのか。ほとんどの地震や津波は、プレートと呼ばれる地球表層を覆う十数枚の岩板の挙動によって引き起こされる。プレートは中央海嶺で生まれ、移動して、海溝やトラフで、ほかのプレートの下へ沈み込んでいる。

日本列島の太平洋側では、日本海溝や南海トラフで沈み込む海洋プレートと陸側のプレートの境界の断層がずべることで巨大地震が起きる。さらに地震に伴い海底面が上下に変動すると、海水が持ち上げられて津波が発生する。

「一方、日本海側の地震発生に関する仕組みについては、実はあまりよく分かっていません。ただし、日本海の形成に関係していることは間違いないと考えられています」

かつて日本列島はユーラシア大陸の一部だった。約2000万年前、大陸地殻に引っ張りの力が働きマグマが上昇、海洋地殻がつくられて日本海が拡大し、日本列島はユーラシア大陸から離れていった。地殻に引っ張りの力が働くと正断層ができる。

1500万年前ごろ日本海の拡大は止まり、300万年前ごろから圧縮の力が働くようになり、それは現在も続いている。その影響によって、一部の断層では正断層ができて弱くなったところに今度は圧縮の力がかかり、一方が持ち上がる逆断層となって地震断層を形成している。

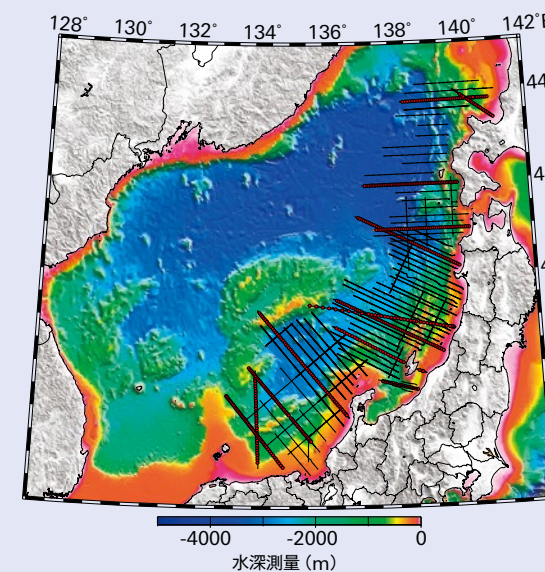
また、日本海溝で2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の後、日本海の地震活動も活発化した。「これは、日本海で起きる地震が、太平洋プレートの沈み込みの影響を受けていることの表れだと考えられます」

日本海地震断層の2つのタイプ

太平洋側に比べて日本海の地震の調査研究は進んでいなかったが、2000年代後半から国内の大学・研究機関が共同で日本海の地震研究を進めるプロジェクトが開始された。

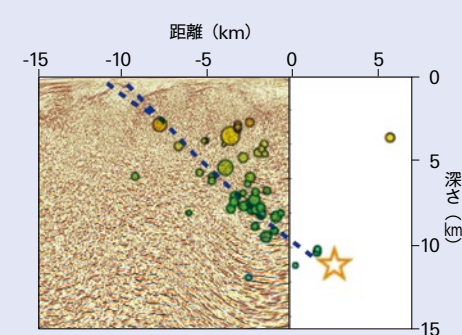
「海域での地震断層を調べるための構造探査は、産業技術総合研究所を中心に、堆積層を対象

「かいめい」のエアガンから音波を発生した様子。音波による円状の波が海面に見える。
(2017年、北海道沖日本海での調査にて)



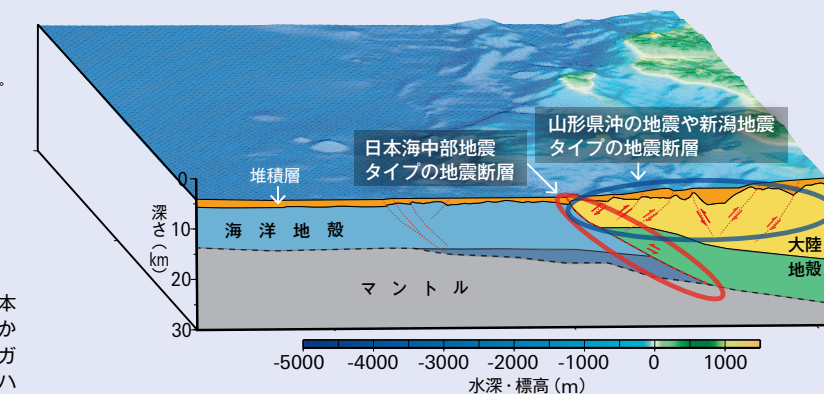
日本海の海底地形とJAMSTECが実施した 海底下構造探査の測線 (2007～19年)

文部科学省が進めた「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」や「日本海地震・津波調査プロジェクト」にJAMSTECは参加し、「かいめい」「かいよう」「かいよう」を使った探査を実施。この調査では、船のエアガンで音波を発生させ、海底下の各地層で反射した波を、水中マイク(ハイドロフォン)を内蔵した電線(ストリーマーケーブル)で受振するマルチチャンネル反射法地震探査(黒の測線)と、各地層で屈折・反射した波を海底地震計で捉える探査(赤色の測線)をほぼ毎年行ってきた。地形は GEBCO_2019 Grid を使用。



2019年山形県沖の地震の 余震域付近のマルチチャンネル 反射法地震探査によるイメージ

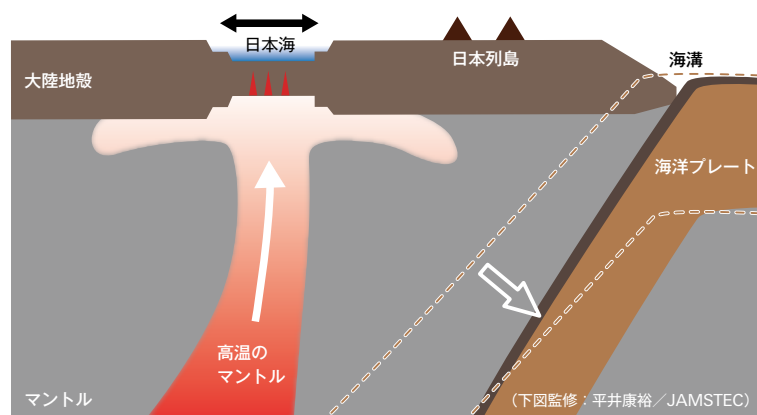
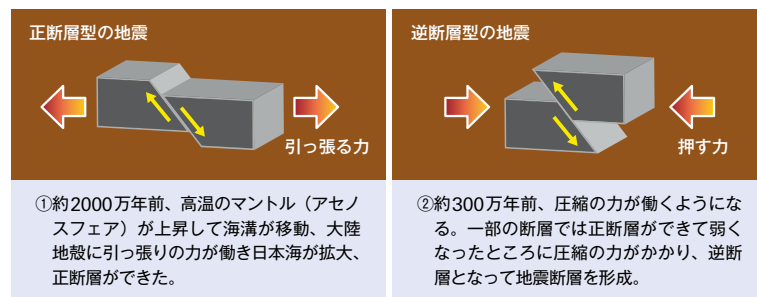
2019年山形県沖の地震の余震域付近では2010年に「かいめい」でマルチチャンネル反射法地震探査を実施。その探査で得られた海底下構造のイメージと余震観測(東京大学地震研究所、2019)の結果から推定される断層の位置が示されている(青点線)。星印は本震の位置(防災科学技術研究所「F-net」の結果)。



日本海側の地下構造と地震断層のタイプ

海底下構造探査により、日本海側の地震断層には、海洋地殻と大陸地殻の境界に形成されたタイプと、大陸地殻のなかに形成されたタイプがあることが分かった。

日本海の拡大と地震断層



に長く調査が進められてきました。一方、私たちJAMSTECは東京大学地震研究所などと共同で、地震断層全体を把握するために、海底下約15～20kmまでの地殻構造全体を対象に、JAMSTECの深海調査研究船『かいめい』、海洋調査船『かいよう』、海底広域研究船『かいめい』を用いた海底下構造探査を2007年以降ほぼ毎年実施し、地震断層と地殻構造の関係に関する研究を進めてきました」

海底下深部までを探査することにより、地震断層と地殻構造の関係が見えた。たとえば、1983年の日本海中部地震は、大陸地殻と海洋地殻の境界に形成された地震断層の活動によるとみられる。一方、

1964年の新潟地震や2019年6月18日に起きた山形県沖の地震(M6.7)は、大陸地殻のなかに形成された地震断層が作用したと推定される。

「2016年に竣工した最新鋭の『かいめい』の能力を最大限に活用できれば、海底下の浅いところから深い領域までを連続的に、より高精度な海底下構造が得られ、従来よりも詳細な地震断層を描き出すことができる可能性があります。そして、『かいめい』による新しいデータを反映した地下構造モデルに基づき、地震・津波シミュレーションを行うことで、より精度の高いハザードマップなどがつくられ、防災に役立てられるはずだ」

海溝の堆積物から地震・津波の発生履歴を調べる

取材協力 Hsiung Kan-Hsi (ション カンシー)

海域地震火山部門 地震発生帯研究センター
海底地質・地球物理研究グループ 研究員

どのような規模の地震・津波がいつごろ起きるのかを予測して備えるには、過去の発生履歴が重要な情報となる。台湾出身のHsiungさんは、海底堆積物を物理・化学的に分析して発生履歴を調べる研究を進めている。

津波を発生させる海底の地殻変動によって土砂が運ばれて堆積し、「タービダイト」という地震・津波の痕跡が記録される。「陸上や水深の浅い海域に比べて、水深が深い海溝の堆積物にはタービダイトがきれいに保存されます」とHsiungさん。

日本海溝で起きるM9地震と津波地震

JAMSTECでは、2011年の東北地方太平洋沖地震の後、ピストンコアラという装置で日本海溝の宮城県沖で海底下10mほどの堆積物を採取して分析した。その結果、1454（享徳3）年と869（貞観11）年にできたと推定されるタービダイトが見つかった。日本海溝では500年ほどの間隔で巨大地震・巨大津波が繰り返されてきた可能性がある。

「ただし堆積物の記録から、地震・津波が起きた年代や規模・震源を推定することは容易ではありません」とHsiungさんは指摘する。

年代を推定する有力な指標は、火山灰や古文書の記録だ。宮城県沖の堆積物試料には、2ヵ所のタービダイトの間に、915年に噴火した十和田火山の火山灰が見つかった。それと古文書の地震・津波の記録から、2ヵ所のタービダイトは、1454年と869年の地震・津波によるものと推定されたのだ。

「その地震・津波の規模や震源を探るには、日本海溝の複数地点の試料を分析して、タービダイトがどこから流れてきたのかを調べる必要があります」

2020年、Hsiungさんらも参加しIODP（国際深海科学掘削計画）の一環として、「かいめい」により日本海溝の北端から南端まで十数ヵ所の堆積物を採取する計画だ。「かいめい」のジャイアントピストンコアラは、約40mの堆積物試料を採取できる。宮城県沖では堆積物10mで約1,000年分に相当する。日本海溝における過去4,000年間に起きた、古文書の記録がないM9クラスの巨大地震・巨大津波の発生履歴を明らかにできると期待される。

日本海溝では、M9クラスの地震とは別に、地震のゆれの被害は小さいが津波の被害が大きい「津波地震」も発生する。1933年の昭和三陸地震（M8.1）では約3,000人、1896年の明治三陸地震（M8.2）では約2万2000人も死者・行方不明者を出した。実態の解明が進んでいない津波地震についても、約40mの堆積物試料から重要な情報が得られるだろう。

北海道を襲う千島海溝の巨大地震・津波

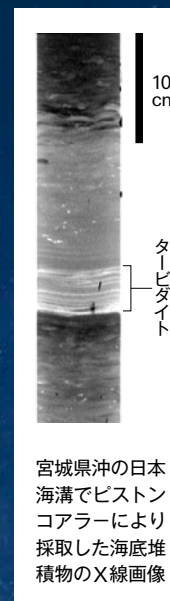
さらにJAMSTECでは、日本海溝の北へ延びる千島海溝でも「かいめい」による堆積物の採取を2020年に実施する計画だ。北海道東部では、津波で海岸や海底から陸上へ運ばれた堆積物が見つかり、その分析から1600年代にM8.8程度の巨大地震・津波が起きたと推定されている。さらに過去にも巨大地震・津波が繰り返し起きてきた痕跡があり、その平均発生間隔は約340 380年と推定されている。前回から400年ほど経過していることから、今後30年以内にM8.8程度以上の地震が7 40%の確率で起きると予測されている。

ただし、その発生間隔には異なる推定結果もあり、不確実性が高い。これまでの陸上堆積物の調査に加えて、海溝の海底堆積物を採取・分析することにより、発生間隔をより確かに推定する情報が得られるだろう。

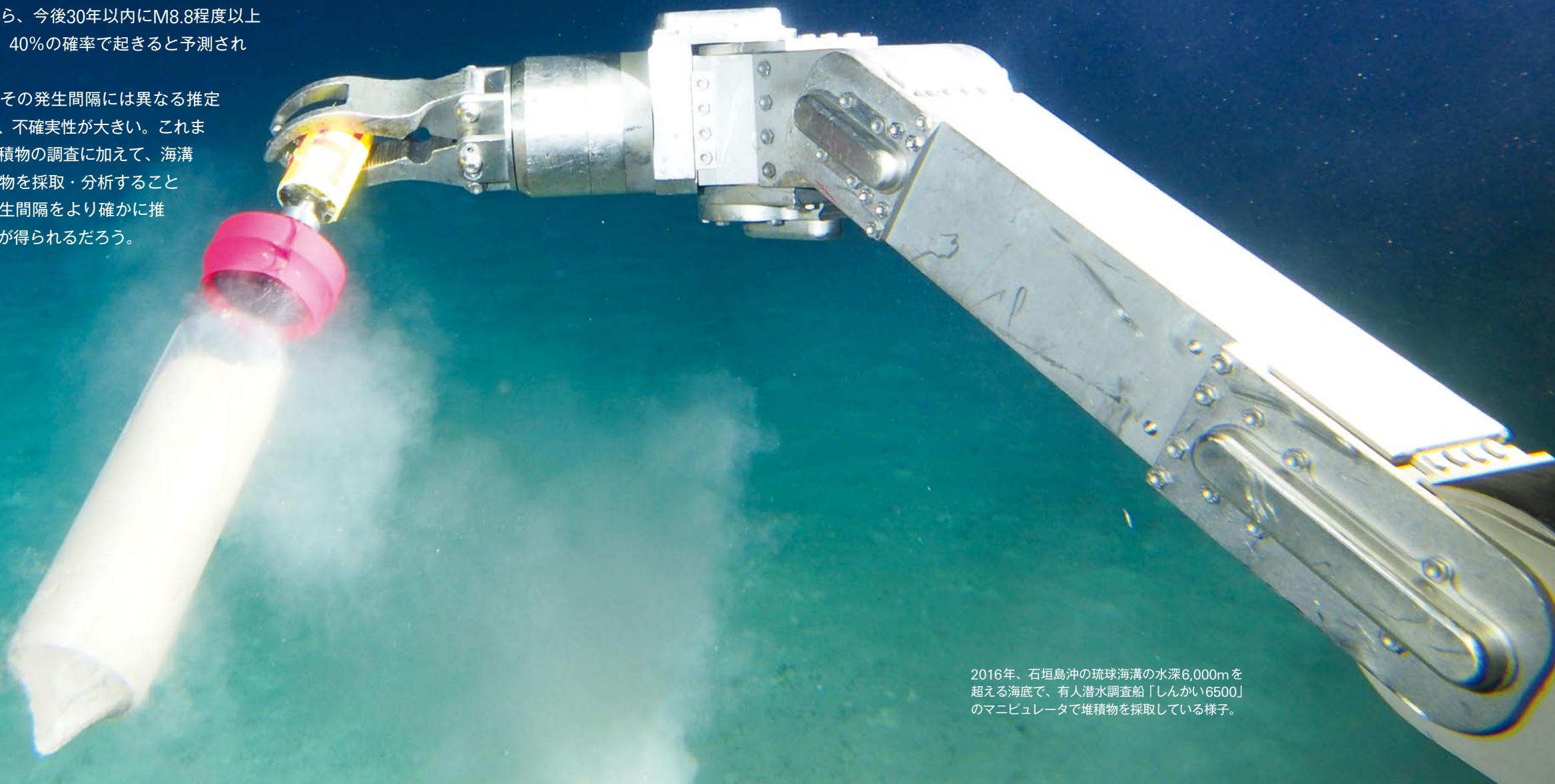
琉球海溝・石垣島沖で起きた明和の地震の謎

南西諸島から台湾へ至る太平洋側には、琉球海溝が走っている。「2016年に石垣島沖の琉球海溝で採取した堆積物の分析も進めています」とHsiungさん。この海域では、明和8（1771）年に八重山地震（M7.4）が発生。これも石垣島に大きな被害をもたらした津波地震であり、地震の実態がよく分かっていない。「海底堆積物から明和の地震のタービダイトはまだ発見されていません。私は、それを発見して分析して、明和の地震の実態を解明することを目指しています」

海底堆積物などに記録された発生履歴のデータは、コンピュータ上で地震・津波を再現するシミュレーションモデルの高精度化にも役立つ。海域地震火山部門の地震津波予測研究開発センターでは、海底変動の連続監視を行い、地震・津波の予測につなげる研究を進めている――



宮城県沖の日本海溝でピストンコアラにより採取した海底堆積物のX線画像



2016年、石垣島沖の琉球海溝の水深6,000mを超える海底で、有人潜水調査船「しんかい6500」のマニピュレータで堆積物を採取している様子。

海底の地殻変動を連続リアルタイムでモニターする

取材協力 町田祐弥 海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター
観測システム開発研究グループ 技術研究員

電波が届かない海底の地殻変動観測の難しさ

南海トラフでは、100～150年ほどの間隔でM8クラスの巨大地震が繰り返し起きてきた。1944年に昭和南海地震（M7.9）、その2年後の1946年に昭和南海地震（M8.0）が発生。それから70年以上が経過し、次の南海トラフ地震の発生が危惧されている。

海洋プレートと陸側プレートの境界がびったりとくっつき固着している領域で、海洋プレートの沈み込みに伴い陸側プレートが引きずられてひずみがたまり、やがて一気に反発してプレート境界付近の断層がすべることで巨大地震は起きる。従って、プレート境界のどの領域が固着していて、どの領域がすべっているのかを知ることは、巨大地震の発生過程を理解する上で重要だ。

南海トラフでフィリピン海プレートが年間数cm沈み込むことに伴い、室戸岬では年間0.5cmの沈降が観測されている。この地殻変動を地震発生帯直上である海底でも観測することで、プレート境界の固着・すべりをより正確に知ることができる。「しかし、海底の地殻変動を連続リアルタイムで観測するには大きな課題があります」と町田さんは指摘する。

陸上では、GPS衛星や準天頂衛星システム「みちびき」などを利用したGNSS（全球測位衛星システム）により、地殻変動の連続リアルタイム観測が実現している。国土地理院が全国1,300カ所に設置した電子基準点網で、日本列島の地殻変動は時々刻々観測されているのだ。

一方、海底には衛星からの電波が届かないため、

海底の地殻変動を探るためには別の手法が必要だ。海底に設置された基準点とその上にいる船との相対的な位置関係を音波で求め、船の絶対的な位置を衛星からの電波を使って測る方式（GNSS-A）が実用化されている。海上保安庁が海底に基準点を設置して繰り返し観測を行っているが、リアルタイムでの連続的な地殻変動量の把握は実現できていない。

DONET水圧計のドリフト成分を差し引いて連続リアルタイム観測を実現する

JAMSTECでは、南海地震と東南海地震の震源域に、海底強震計、広帯域地震計、水圧計などから構成される51カ所の観測点を設置し、海底ケーブルで陸上と結んで連続リアルタイムで地震と津波を常時監視する「地震・津波観測監視システム（DONET）」を整備してきた^{*}。海底が変動することにより水圧も変化するので、DONETの水圧計により海底の地殻変動をリアルタイムで観測できるはずだ。

「水圧計により長期的な変動を捉えることを難しくしているのは、水圧計の計測値が真の値から一定の傾きでずれていく、水晶水圧計に特有の『ドリフト』という現象です。海底の上下変動量に換算すると、年間で最大10cmの誤差が生じます」

それぞれの水圧計でドリフト量は異なり、その量は地殻の上下変動量と同じcmレベルであるため、両者を切り分けることが難しい。そこで各水圧計のドリフト量を調べ、計測値からドリフト成分を差し引くことで、地殻の上下変動量を導き出すことができる。そのために町田さんたちは、DONET水圧計のある海底で真の水圧値を計測するための移動式水圧校正装置の開発を進めてきた。

「目標は、DONET水圧計で年間1cm以下の上下

変動を計測できるように校正することです。そのために校正水圧計にはmm単位で地殻変動を計測できる精度が求められます。私たちは、水圧計に誤差が生じる要因を実験で調べました。その結果、目標の精度を達成するには、実験室から海底までのどの環境下においても水晶水圧計の温度は0.1℃以下、圧力は5MPa以下（水深換算500m以内）の変動となるように制御し、計測時には姿勢を0.1度以下の範囲で制御する必要があることが分かりました」

町田さんたちはその条件を実現できる移動式水圧校正装置を開発。実際にDONET水圧計がある海底まで運び、DONET水圧計の横で精密水圧計測を行う校正作業を2018年に開始した。時期を隔てて2回以上、移動式水圧校正装置で真の水圧値を計測してDONET水圧計の誤差を調べることでドリフトの傾きを導き出し、校正することができる。「今後、DONET水圧計の校正を順次進めていく計画です」

光ファイバーで海底の地殻変動をナノメートルの精度で広域観測する

計測のノイズとなる潮流などの影響を受けない海底で地殻変動を高精度で観測する取り組みも進められている。JAMSTECでは地球深部探査船「ちきゅう」による掘削調査を紀伊半島沖で続けてきた。掘削孔3地点（海底数数百m）に長期孔内観測システムを設置、DONETに接続して地殻変動を連続リアルタイムでモニターしている。将来的に紀伊水道沖でも長期孔内観測システムの広域展開を視野に入れている。また、「かいめい」の海底設置型掘削装置で海底下20mほどの孔を6地点で掘削して海底地殻変動観測装置を設置、DONETに接続することも計

画している。

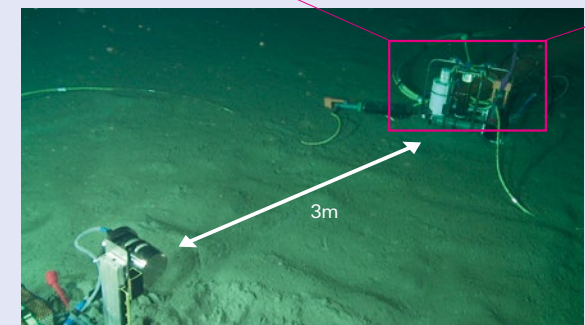
「私たちは、光ファイバーを使ってナノ（10億分の1＝10⁻⁹）メートルの精度で地殻の伸び縮みを計測する技術の開発も進めています。2019年、南海トラフの海底に光ファイバーを200m敷設して実験を始めました。この技術を開発できれば、従来に比べて低コストで広域の地殻変動を連続リアルタイムで観測することができます」



DONET水圧計の校正実験
無人潜水機によりDONET水圧計の横に移動式水圧校正装置を設置し、高さ・姿勢調整を行った後、水圧計測を行う。



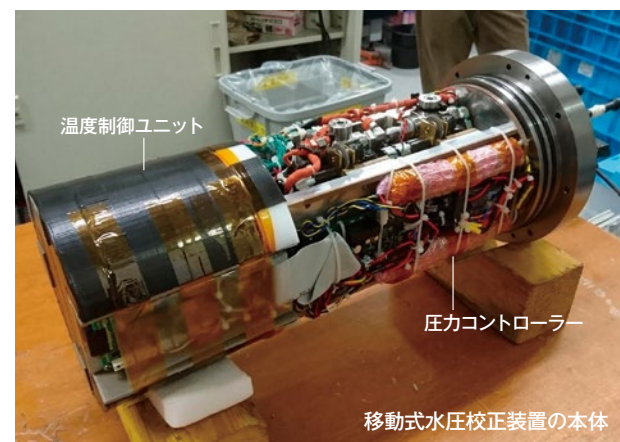
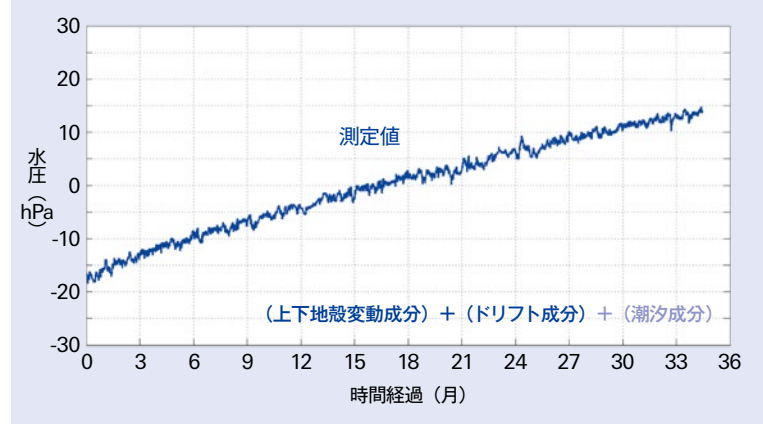
移動式水圧校正装置から水平にレーザーを照射しDONET水圧計と水深を合わせて、真の水圧値を測る。



※DONET
DONETは海洋研究開発機構が開発・設置したもので、2016年4月に防災科学技術研究所に移管され、運用されている。

DONET水圧計のドリフト現象

DONET水圧計のデータには、地殻変動量に加えて計測値が一定の値でずれていく「ドリフト」が含まれており、年間で最大10cmのずれが生じる。



南海トラフにおける地震・津波・地殻変動観測網

海底地殻変動データから地震を起こすプレート境界を描き出す

取材協力 飯沼卓史 海域地震火山部門
地震津波予測研究開発センター
地震予測研究グループ 研究員

プレート境界を正確に描く新モデルを開発

海底の地殻変動データからプレート境界の固着・すべりを求めるには、地殻の変形シミュレーション用のモデルを用いる。

「ただし従来のモデルでは、海底下は力がかかったときにすべて同じように変形する、弾性率が一律な構造を仮定し、地形も単純なもので、現実が反映されていませんでした。それでは、海底の地殻変動データからプレート境界のすべり量を過大評価してしまう、といったことが起きます」と飯沼さんは説明する。そこで飯沼さんらは、海底下構造探査のデータに基づく弾性率が不均質な構造や地形を反映した新しいモデルを開発し、地殻変動データからプレート境界の固着・すべりを正確に描き出す研究を始めている。

新モデルと連続リアルタイム観測でプレート境界の近未来を予測する

南海トラフのDONETの水圧計や掘削孔で観測した地殻変動の連続リアルタイム観測データと、新しいモデルによる地殻変形シミュレーションを組み合わせることで、プレート境界の固着・すべりをリアルタイムで把握することが可能になる。さらに断層をすべらせようとする力と断層強度を推定して、断層の固着・すべりの近未来の状態を予測し、観測データの結果で答え合わせをしながら予測条件を絞り込んでいくことで、精度の高い近未来予測を実現できると期待される。

「たとえば、ある領域で小さな地震が起きた後、人が感じるような地震波を出さずにゆっくりとすべる領域が広がり、本震を起こす固着領域へ到達して巨大地震が起きる可能性が指摘されています。どこでゆっくりすべりが起きているか正確に知り、それが固着領域へ近づいていくかどうか近未来を予測することで、巨大地震の発生時期を判断するための情報を発信していきたいと思います。そのためにはまず、プレート境界の固着・すべりの普段の状態を正確に把握し、その上で、普段とは異なる状態を検出できるようにする必要があります」

昭和には、東南海地震の2年後に南海地震が起きたが、1854年には、安政東海地震のわずか1日半後に安政南海地震が起きた。「たとえば東側だけで巨

大地震が起きたとき、西側の固着している領域を特定して、次に起き得る地震の規模を推定します。さらに、東側の巨大地震の後、ゆっくりすべりの領域の広がり方を予測することで、西側の巨大地震が近づいているかどうか判断する情報を提供できるようにしたいと考えています」

南海トラフでは巨大地震に伴い、巨大津波が発生する。JAMSTECでは防災科学技術研究所と共同で、DONETを活用した即時津波予測システムを構築し、すでに和歌山県や三重県、香川県などが導入している。さまざまな規模の津波によるDONET観測点での水圧値と各地の津波高さ・浸水のパターンを何種類もあらかじめ計算しておき、地震が起きたときにDONETの水圧計で観測したデータと似ているパターンを選び出し、ある地域が何分後にどれだけ浸水するのかという、防災に役立つ情報を即時に発信するものだ。「現在の予測システムは、従来のモデルを用いたものです。現実に近い構造や地形を反映した新しいモデルにより地震が起きたときの海底の地殻変動をより正確に再現することで、津波の予測精度を向上させることができます」

日本海溝や千島海溝で次に起きる地震を探る

巨大地震が発生した後、地震ですべったプレート境界がさらにゆっくりとずれ動き続ける「余効すべり」が起きる。飯沼さんらは、海底地殻変動データとシミュレーションを組み合わせ、2011年の東北地方太平洋沖地震の後に起きた余効すべりの分布を高分解能で描き出す研究も行っている。

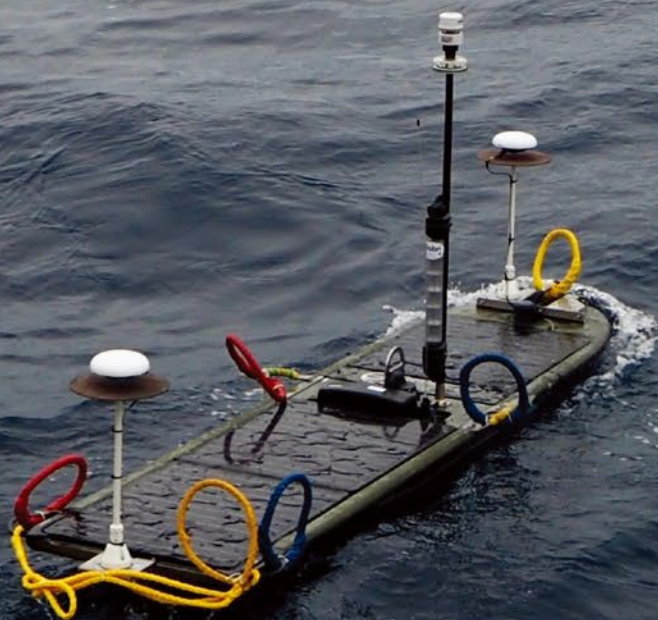
「海底地殻変動データからプレート境界の余効すべりを知るには、海洋プレートの下のマントルの動きも考慮する必要があります」

地震時に海洋プレートが大きく動くことにより、その下のマントルの粘性が大きく下がり、沈み込みの方向へゆっくりと動く。「海底の地殻変動はそのマントルの動きの影響も受けるからです。ただし、私たちが地震活動の予測のために知りたいのはプレート境界の動きです。海底地殻変動データからマントルの動きを差し引くことができるモデルを開発して、余効すべりが起きている領域と、起きていない領域の分布を調べました」

その結果、日本海溝北部で1896年に起きた明治三陸地震（M8.2）や、その西側で1968年に発生した十勝沖（三陸沖北部）地震（M7.9）の震源域のプレート境界はしっかりと固着していることを飯沼さんらは明らかにした。「これらの領域では、依然として巨大地震を起こすリスクがあることが分かったのです」

ウェーブグライダーで海底地殻変動を捉える

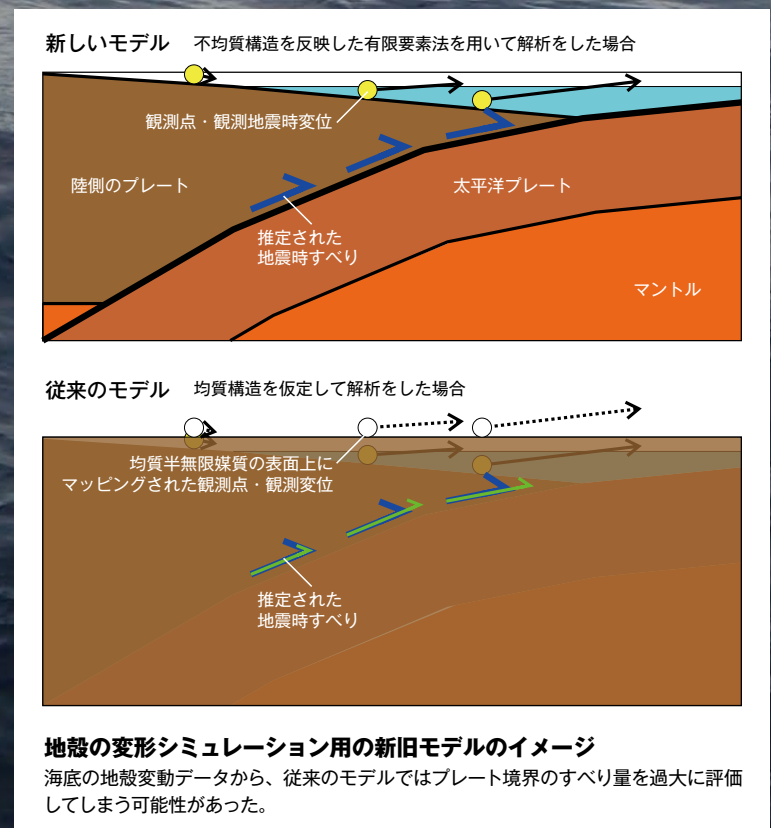
飯沼さんは、ウェーブグライダー（自律型海洋プラットフォーム）で、海底地殻変動を観測する取り組みも進めている。10 11ページで紹介したようにGNSS A方式では船を運航させるため観測頻度が限られる。「海底に設置された基準点を無人のウェーブグライダーに巡回させて、まずは明治三陸地震の震源域、さらに十勝沖地震の震源域の海底地殻変動を観測して、新しいモデルによるシミュレーションと組み合わせることで、これらの海域の巨大地震・津波に備えるための研究も進めていく計画です」



海底地殻変動を捉えるウェーブグライダー

2019年7月に北三陸沖で試験観測を行い、船と同等の誤差で海底に設置された基準点の位置を計測することに成功した。

撮影：北海道大学 大國真子 准教授



巨大噴火と地球内部を探る新研究

取材協力 上木賢太 海域地震火山部門
火山・地球内部研究センター
地球内部物質循環研究グループ
技術研究員

なぜそこに火山があるのか

海域地震火山部門の火山・地球内部研究センターでは、火山活動と地球内部を統合的に理解する研究を進めている。

火山は、地下の岩石が溶けたマグマが地表に噴出して形成される。日本周辺の火山は、プレートの沈み込みによってつくられたものだ。海洋プレート上部にある岩石は海水を取り込む。その後、地球内部へ沈み込み圧力が高くなると岩石中の水分が絞り出されてマントル内を上昇。マントルの岩石に水分が加わることで融点が大きく下がり、岩石が溶けてマグマができる。そのマグマが地表に噴出して火山をつくるのだ。

「ただし、太平洋プレートが沈み込む北海道や東北地方には火山がありますが、同じフィリピン海プレートが沈み込んでいても、九州には火山があるのに対し、四国には火山がありません。私は、同じ沈み込み帯でも火山があるところとないところでは何が違うのか、なぜそこに火山があるのかに興味を持ち、岩手山や秋田駒ヶ岳などの東北の火山、そして草津白根山などを中心に調査研究を行ってきました。さらに世界各地の火山の岩石の化学組成を解析して比較するとともに、さまざまな条件でマグマ生成のシミュレーションを進めています」と上木さん。

沈み込み帯で火山ができるかどうかのポイントの1つは、プレートの年齢と沈み込む角度だと上木さんは説明する。「年齢の若いフィリピン海プレートは、薄くて熱く浮力が高いので浅い角度で沈み込むため、四国の地下では岩石が溶ける温度の深度に達しません。一方、年齢が高く厚く冷たい太平洋プレートは火山ができるのにちょうどよい角度で沈み込み、東北地方の地下100～150kmに達して水が放出されてマグマがつくれ、火山ができると考えられています」

鬼界カルデラで巨大噴火の謎に迫る

地下にたまった大量のマグマが一気に放出されることで円形の陥没地形（カルデラ）が形成されるケースもある。「その1つが、鹿児島の南にある7,300年前に噴火した鬼界カルデラです。その噴出物の体積（マグマ量換算80km³）は、富士山の宝永噴火の110倍以上、20世紀最大規模といわれるフィリピンのピ

ナツボ山の噴火（1991年）の16倍だと推定されています。その火山灰は東北地方まで及び、火砕流に埋もれた鹿児島県南部は約600～900年間、照葉樹林が回復せず、ススキなどしか生えなかったという調査報告があります」

さらに9万年前には日本史上最大規模の阿蘇カルデラの噴火が発生。マグマ量換算で600km³もの噴出物が日本全国に降り積もり、北海道でも10cmほどの火山灰層が確認されている。

巨大噴火による大量の火山灰は、交通やライフライン、経済活動に大きな被害をもたらす。また、ピナツボ山の噴火によるちりが地球全体を覆って日射を遮り、地球全体の平均気温を下げて全世界に影響を与えたことも知られている。

「カルデラをつくるような巨大噴火も、準備段階から噴火へ至るまでの期間は100年間ほど短いかもかもしれないという研究が、最近発表されています。しかし、阿蘇や鬼界カルデラが起こした巨大な噴火は、近代的な技術により観測されたことはありません。そのため巨大噴火に至るプロセスはよく分かっていません。それを探るために、JAMSTECでは鬼界カルデラの研究調査を始めました。私はまず、海底から採取した岩石を分析して、7,300年前の巨大噴火

鬼界カルデラの縁（外輪山）にある薩摩硫黄島



鬼界カルデラの海底から採取した岩石
(2019年11月、「かいいい」による鬼界カルデラの調査より)

で、どれくらいの期間にどれだけの量の噴出物が放出されたのかなど、カルデラ噴火の基本情報を得るところから着手していく計画です」

海底で地球ニュートリノを捉え、地球内部を直接観測する

上木さんらは、数十年後を見据えた新しい研究の検討も始めている。

東北大学は岐阜県神岡鉱山の「カミオカンデ」跡にニュートリノ観測装置「カムランド」を建設し、観測を続けている。「カムランド」は2005年、地球ニュートリノを世界で初めて観測することに成功した。地球内部のマントルや地殻に存在する放射性元素のウランやトリウム崩壊によって反ニュートリノが放出される。それが地球ニュートリノだ。

「地球内部のマントルは、これまで地震波が伝わる速度や電気伝導度で調べられてきました。地球ニュートリノは、マントルを直接探る第三の方法になると期待されています」

地球は約46億年前に微惑星が衝突・合体を繰り返して形成された、と考えられている。地球内部の地熱は、地球が形成されたときの微惑星の衝突エネルギーと、放射性元素の崩壊によるものだ。その地

熱がマントル対流やプレート運動、火山活動などのエネルギー源となっている。

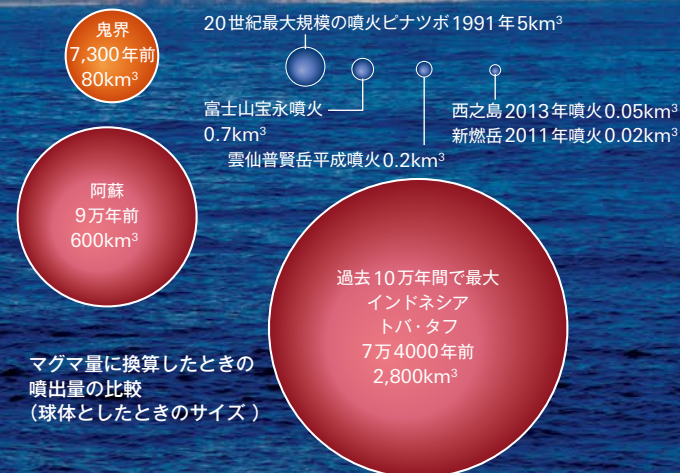
「地表へ放出される地熱の約半分が放射性元素の崩壊によるものと考えられます。地球ニュートリノは、地球内部の熱源からの直接の信号です。地球ニュートリノにより地球内部にあるウランとトリウムの量と割合が分かります。それは、地球をつくった材料である微惑星の組成を推定する重要な情報にもなります」

ウランとトリウムは地殻に多く存在している。「マントルからの地球ニュートリノを観測するには、地殻起源の信号を取り除く必要があります。私はこれまでの岩石の研究を応用して日本列島の地殻起源の地球ニュートリノ量を推定する研究を行い、この研究に貢献しています」

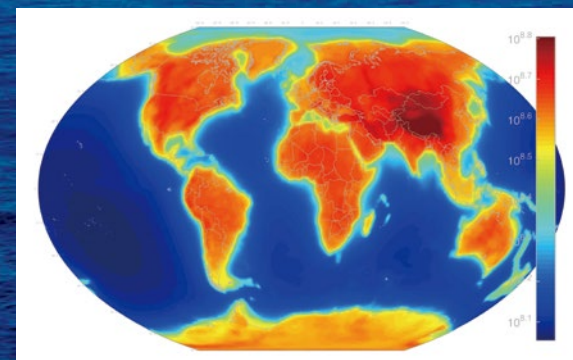
原子力発電所からも反ニュートリノは放出されるため、地球ニュートリノでマントルを探るには、原子力発電所から遠く、地殻の薄い海底での観測が望まれる。「JAMSTECの海洋技術を駆使して、それを実現するための検討を東北大学と共同で始めました。直径10mほどの装置を海底に設置して半年間ほど地球ニュートリノを観測し、次の観測地点に移動できるようにしたいと考えています。複数地点の海底で地球ニュートリノの観測を行うことで、マントルを三次元で描き出すことができます」

JAMSTECの岩森 光さん（海域地震火山部門 招聘上席研究員）らは、東半球と西半球ではマントルの化学組成が異なることを明らかにした。地球ニュートリノにより、それを検証できるかもしれない。

地球ニュートリノの新研究は、地球内部と火山活動の理解を進展させるとともに、人類に新しい地球像をもたらすに違いない。



地表で観測される地球ニュートリノの強度分布



出典：S. M. Usman et al., Scientific Reports, 5,13945 (2015)

初生マグマから惑星地球の謎を解き、災害の軽減へ貢献する

取材協力 田村芳彦 海域地震火山部門 専門部長（上席研究員）

大陸は海から誕生した

地球の表面を覆う地殻は、安山岩を主成分とする厚い大陸地殻と、玄武岩を主成分とする薄い海洋地殻から成る。火星や金星の地殻はすべて玄武岩が主成分で、地球以外に大陸地殻を持つ惑星や衛星は見つかっていない。大陸地殻があることが地球という惑星の大きな特徴だが、その大陸地殻がどのようにつくられたのかは大きな謎だ。

2013年以降、小笠原諸島の西之島では、安山岩質のマグマが噴出し続けている。田村さんらは西之島周辺の海底で岩石を採取・分析し、「大陸は海から誕生した」という新説を提唱した。

「これまで安山岩が確認される場所は大陸でした。従って“大陸は大陸でできる”というのが定説でした。ただし、大陸で採取される安山岩は、一度できた岩石が再び溶けて固まったものです。一方、マントルが溶けて最初にできるものを初生マグマと呼びます。安山岩質の初生マグマができるには、プレートの沈み込みによるマントルへの海水の供給と、薄い地殻下の低圧環境が必要だ、というのが新説の趣旨です」と田村さんは説明する。

伊豆・小笠原海溝では、フィリピン海プレートの下に太平洋プレートが沈み込みマントルに海水が供給されて初生マグマが生まれ、地表へ上昇して伊豆・小笠原諸島の海域火山島が形成された。しかし現在の伊豆諸島の地殻は30～35kmと厚いため、そ

の地殻下の高圧環境では玄武岩質の初生マグマしかできない。一方、西之島を含む小笠原諸島の地殻は15～20kmと薄く、その地殻下の低圧環境では安山岩質の初生マグマができる、と田村さんらは考えている。さらに田村さんらは、小笠原の土曜海山やニュージーランドの北に位置するケルマディック諸島の調査を行い、この新説の検証を進めている。

「地球には最初、大陸地殻はなく、海が形成され、全域が薄い海洋地殻で覆われていたと推定されています。プレートの沈み込みが始まりマントルに海水が供給されますが、マントル温度が高かったため、深いところのマントルが溶けて玄武岩しかできなかったと考えています。やがて40億年ほど前に、私たちの新説が正しければ、薄い海洋地殻に覆われた初期地球で安山岩質の初生マグマが大量に生成され始め、大陸地殻が急速に拡大していったはずだ」

南鳥島とマントルブルーム

田村さんらは、日本の最東端にある南鳥島の謎を解く新しい研究も始めている。「どうしてこの海域に火山が数多く点在しているのか、大きな謎なのです」

プレート沈み込み帯や中央海嶺で火山がつけられるが、南鳥島の海域はそのどちらでもない。

残された可能性は、ハワイ諸島のようなホットスポットだ。そこには地球深部からピンポイントで熱いマントルが上昇、圧力が下がることでマグマとなり、火山ができる。マントル深部を起源とするホットスポットの位置は動かず、表層の海洋プレートが移動するため、1つの火山の寿命は100万年ほどで、

火山が次々とつくられて列を成す。「しかし、南鳥島周辺の火山は列をつくらず点在しています。さらに、1カ所の火山から噴出年代が100年以上も離れた溶岩が見つかります。典型的なホットスポットでは、それらは説明が付きません」

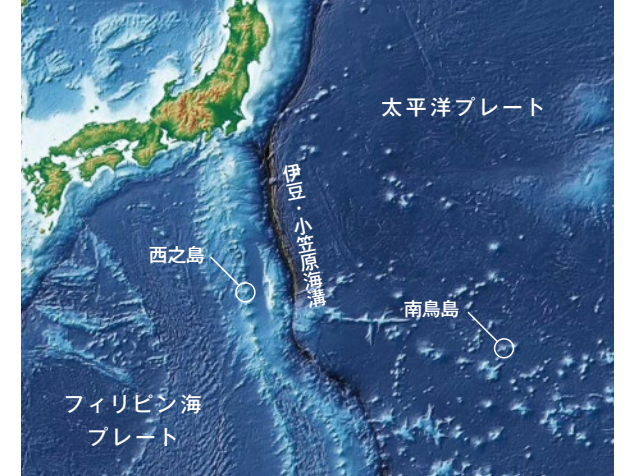
田村さんは、南鳥島周辺がマントルブルームによってつくられた海洋プレートであれば、謎を解くことができると考えている。地球内部では、沈み込んだプレートがマントルの底まで落ち込む冷たい下降流と、マントルの底から上昇する熱い上昇流マントルブルームがあると考えられている。

約2億年前、マントルブルームが地表まで上昇して、太平洋プレートがつけられ始めたのではないかと考えられている。「太平洋プレートは現在、東太平洋中央海嶺でつくられています。そこに上昇してくるマントルに比べて、マントルブルームには、かつて沈み込んだプレートの成分も含まれており組成が多様です。それらが表層で固まってできた海洋プレートには、溶けやすい成分が多く散在しているはずだ」

プレート下のマントル層（アセノスフェア）には、相対的に熱い領域と冷たい領域があると推定される。「海洋プレートが移動して熱い領域の上に来ると溶けやすい成分がマグマとなり、それが上昇して南鳥島などの海底火山をつくります。やがて海洋プレートが移動して冷たい領域の上に来るとマグマはできません。そして100万年以上たって再び熱い領域の上に来るとマグマができて上昇し火山の岩石の一部になります。このようにして、1カ所の火山に100万年以上年代の離れた岩石が存在することになる。また、溶けやすい成分は散在しているので、それがマグマとなって上昇して形成される火山も列にならずに点在すると、私は考えています」

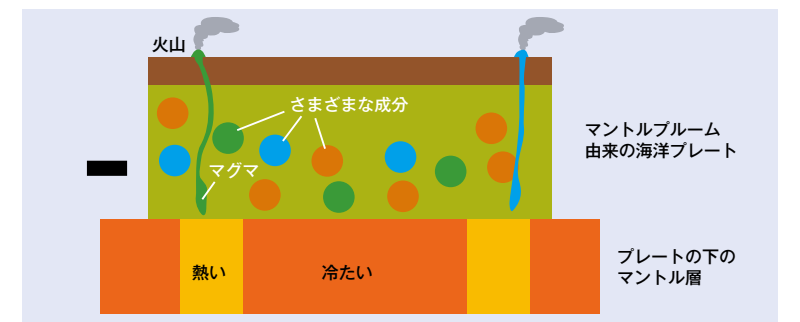
「ただし、それはまだアイデアの段階で、初生マグマを分析して検証する必要があります」と田村さん。「南鳥島周辺の海底はかたいマンガン層に覆われていて、その下の岩石を採取しにくいので、2017年の研究航海では、海底に転がる岩石しか採取できませんでした。それらの元素組成を調べると、ある岩石は沈み込み帯で見られるタイプ、別のものはホットスポットで見られるタイプと、組成は多様性に富んでいました。ただし、転がっている岩石は組成の変質が進んでおり、生成年代についても正確には分かりません」

2019年の研究航海で、田村さんらは南鳥島周辺



南鳥島周辺の海底で採取したマンガン層の下の岩石

南鳥島周辺の火山のでき方のアイデア



のマンガン層の下にある岩石の採取に成功した。「それは初生マグマからできた岩石だと思われます。アイデアを検証するために、南鳥島周辺のさまざまな地点から岩石を直接採取して分析する計画です」

初生マグマから伊豆大島の噴火過程を探る

海域地震火山部門では、初生マグマの研究を伊豆大島の火山活動の理解に役立て、災害の軽減に貢献する新研究も始めている。

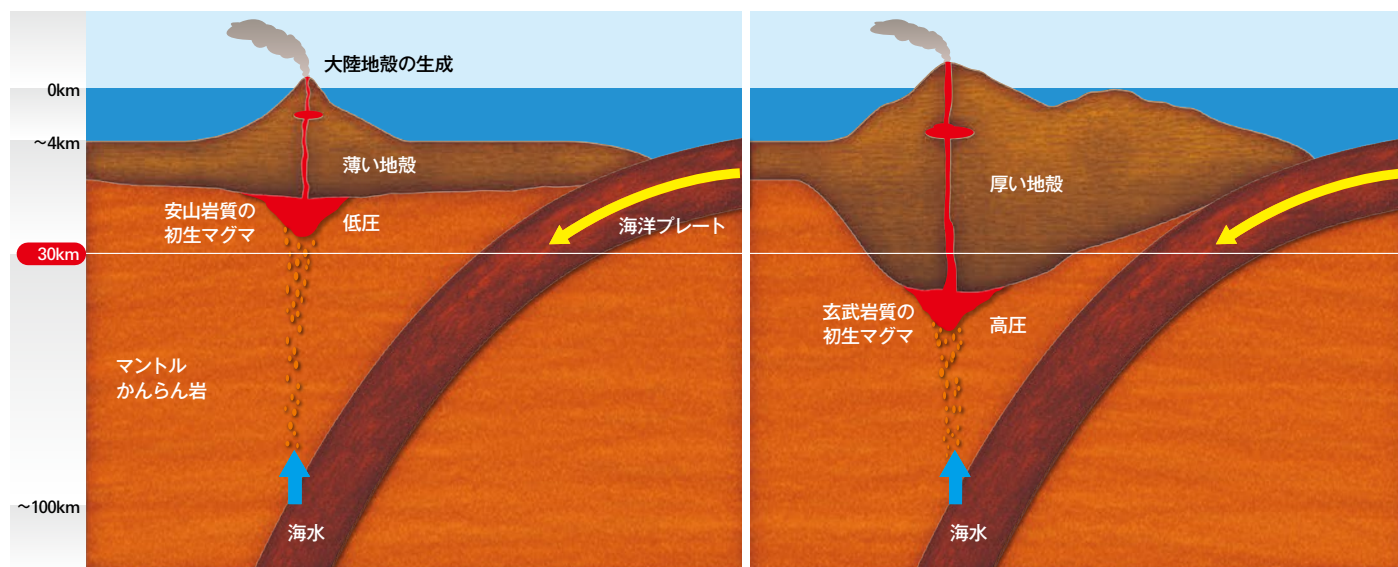
伊豆大島では、深度30～40kmで深部低周波地震が起き、その後、表層で群発地震が発生して火山噴火に至るケースがある。

「深部低周波地震は地殻下で初生マグマができて地殻へ上昇するときに起き、深度10kmほどの地殻内にマグマだまりができる際に群発地震が発生、やがて噴火に至ると考えられます。火山噴火へ至る引き金となる初生マグマ由来の岩石は、伊豆大島周辺の海底ではまだ採取できていません。それを採取して分析を行い、火山噴火へ至る過程や噴火の規模・特徴などを予測するための基礎情報を提供することは、私たちにしかできない役割です」

BE

海から大陸が生まれる仕組み

二酸化ケイ素の比率を見ると、マントルのかんらん岩は約45%、海洋地殻の玄武岩は約50%、大陸地殻の安山岩は約60%と高くなる。安山岩質の初生マグマができるには、プレートの沈み込みによるマントルへの海水の供給と、薄い地殻下の低圧環境が必要だと考えられる。





ヨットレースで海の マイクロプラスチックを調査する

海洋プラスチック汚染が地球規模の環境問題として大きな話題となっている。

しかし、プラスチックごみは広大な海洋に拡散しており、特にマイクロプラスチックに関するデータは不足しているのが実情だ。そのような状況のなか、2019年12月末から2020年1月中旬にかけて開催される「日本ーパラオ親善ヨットレース」で、JAMSTECも協力して海洋に浮かぶマイクロプラスチックの調査が行われることになった。

競技艇や伴走艇に機器を取り付けて、航路上でマイクロプラスチックを採取しようというプロジェクトだ。

調査はどのように行うのか、また科学的な意義は何か、

伴走艇「みらいへ」に乗船し調査を行う

千葉早苗さんに話を聞いた。

日本ーパラオ親善ヨットレースは、横浜とパラオの珊瑚島の間で行われる。写真はパラオのロックアイランド。
©iStock.com/shalamov

観測データが不足している 海のマイクロプラスチック

——マイクロプラスチックとはどういうものですか。

千葉：現在、海洋には大量のプラスチックごみが日々流入しています。そのなかで5mm以下の小さなプラスチックのことを「マイクロプラスチック」と呼んでいます。

大きなプラスチックは海面に浮かんでいるうちに、太陽光の紫外線などによって劣化して細かくなっていきます。また洗顔料や歯磨きにビーズ状の小さなプラスチック粒子が含まれていて、それらが下水を通して最終的に海に流れ込んでいくこともあります。

そのようなマイクロプラスチックは、海に様に分布しているわけではありません。海流の影響を受け、渦のあるところに集まりやすいといわれており、実際に集まっていることが確認されている場所がいくつかあります。たとえばアメリカ西海岸の沖合にある「グレートバシフィックごみパッチ」と呼ばれる場所などです。

——海のマイクロプラスチックの汚染状況はどれくらい分かっているのでしょうか。

千葉：数値モデルによる計算で1950年代以降に海へ流入したと推定されているマイクロプラスチックの量と、観測をもとに見積もった

量との間には大きな差があります。モデルによる推定に対して、観測データは1%しか説明できていません。観測されていない残り99%のマイクロプラスチックは「ミッシングプラスチック（行方不明プラスチック）」と呼ばれています。

行方が分からない理由としては、3つ考えられています。1つは、観測の多くが海表面だけなので、プラスチックが海中や深海に沈んでいるのではないかとということです。また、観測データの多い場所が限られていることも理由の1つです。たとえば日本の南方にあると予測される「西太平洋ごみパッチ」は観測の空白域になっています。もう1つの理由が、観測されているプラスチックの多くが300μm以上



1円硬貨の上にあるのは、神奈川県葉山の海岸で採集したマイクロプラスチック。1円硬貨の右下にあるのは、プラスチックの原料となる樹脂ペレット。
写真提供：中嶋亮太／JAMSTEC

のものだからです。それよりさらに細かくなっているもののデータはほとんどありません。

深海でのマイクロプラスチックの分布を知るには、有人潜水調査船や無人探査機を持っているJAMSTECのような研究機関による観測が必要です。一方で、海水面付近での分布を知るには広範囲の観測が必要ですし、また時間的な変化を知るには継続的に観測を行う必要もあります。そういった観測を、研究機関だけで行うことはできません。そこで、継続的な全球観測網を実現するために注目されているのが、民間船を使った観測です。1つはタンカーやフェリーなど民間の商用船を使った観測、もう1つは今回のヨットレースのようなプレジャーボートを使った観測です。

日本ーパラオ親善ヨットレースで行う調査

——パラオ共和国独立25周年と、日本・パラオ外交関係樹立25周年を記念して開催される日本ーパラオ親善ヨットレースに、千葉さんも同行されるそうですね。

千葉：横浜港からパラオまで3,197kmを走り抜くレースで、8艇ほどのヨットが参加する予定です。トラブルが起きた場合などにサポートするため、レースには「みらいへ」という帆船が伴走します。「みらいへ」は全長52.16m、幅8.6mの大型の帆船で、船員13人を含めて合計53人が乗船できます。私は今回、その「みらいへ」に乗船します。

競技艇と「みらいへ」は、2019年12月29日に横浜みなとみらいから出航します。「みらいへ」は2020年1月14日にパラオの珊瑚島に到着予定で、レース艇もそれに前後して到着する予定です。

——マイクロプラスチックの採取はどのように行うのでしょうか。

千葉：「みらいへ」と、競技艇の1艇である「トレッキ一号」に「マイクロプラスチックサンプラー」という機器を設置して採取します。

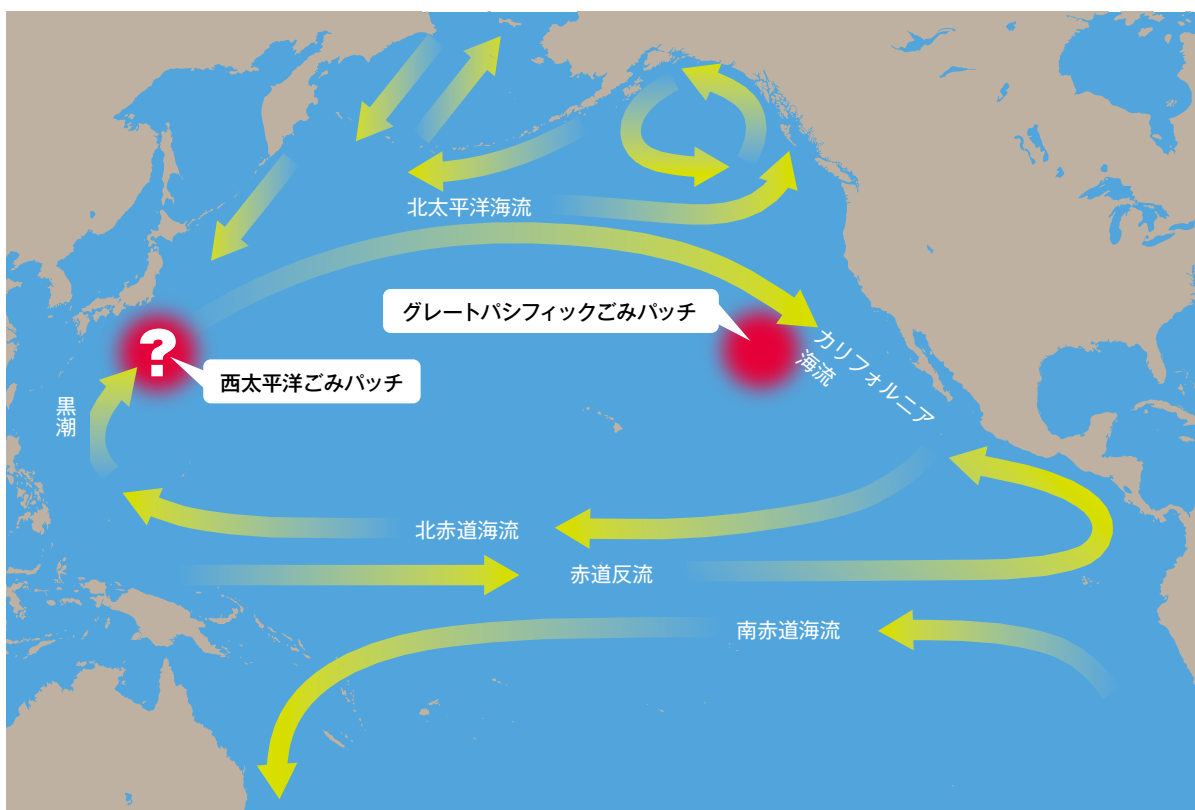
マイクロプラスチックサンプラーのなかに海水を通し、機器内にあるフィルターでマイクロプラスチックを採取します。目合い（網目のサイズ）が300μm、100μm、30μmという3種類のフィルターが入っており、それぞれの目合い以上の大きさのプラスチックを採取することができます。

写真提供：(上) 藤倉克則/JAMSTEC、(下) 新田肇/日本一パラオ親善ヨットレース実行委員会



レースの伴走艇「みらいへ」(上)とレース艇「トレッキー号」(下)

海洋にはマイクロプラスチックが集まりやすい場所が存在する。「グレートバシフィックごみパッチ」では実際に大量のマイクロプラスチックが発見されている。日本列島の南方にある「西太平洋ごみパッチ」にもマイクロプラスチックが大量にあると予測されているが、実際の観測はあまり行われていない。NOAA（アメリカ海洋大気庁）の資料をもとに作成



マイクロプラスチックサンプラーの操作は非常に簡単です。フィルターを1日2回、定期的に交換して袋に入れておくだけです。「みらいへ」では私がフィルター交換などを行います。「トレッキー号」では乗組員の方に交換をお願いします。

2017年から2018年にかけて開催された「ボルボ・オーシャンレース」という世界1周のヨットレースでも、マイクロプラスチックの調査が行われました。データの比較を可能にするために、今回そのとき使用されたのと同じサンプラーを使います。ボルボ・オーシャンレースの航路には南極海など過酷な海況のところも含まれており、さまざまな環境で作動することが実証されています。

——今回の調査は、科学的にはどのような意味があるのでしょうか。

千葉：今回のレースの航路は、観測の空白域である西太平洋ごみパッチの西端を通るので、空白域を埋めることに貢献できます。

また300 μ m以下のマイクロプラスチックのデータを集めることにも科学的な意味があります。マイクロプラスチックの観測の多くは「ニューストンネット」というネットを使って行われています。ニューストンネットとは、海の表層のプランクトンを採取するときにも使われる、目合いが300 μ m、長さが3mほどのネットで、マイクロプラスチックを採取するときには標準的に使われるネットです。

ニューストンネットでは300 μ mより小さなものは採取できません。そのため、先ほども触れましたが、それより小さなマイクロプラスチックの分布がほとんど分かっておらず、ミッシングプラスチックの原因の1つにもなっています。特に100 μ m以下のマイクロプラスチックのデータは非常に少ないので、貴重なデータになるでしょう。

——採取したプラスチックは、どのように分析するのですか。

千葉：フィルターをすべて日本に持ち帰ってから分析します。ポリエチレンやポリプロピレンなど、プラスチックは製品によって種類がいろいろあります。種類やサイズごとに分類し、横浜からパラオまでの航路となった海洋にマイクロプラスチックがどのように分布しているのかを分析します。

ごみパッチに近いところでマイクロプラスチックの密度が高くなるだろうと予想しています。またパラオ周辺よりは日本周辺の方が高いだろうとも予想しています。日本には大都市も多いですし、東南アジアから流れてくるプラスチックも多いからです。そういったことを検証したいと考えています。

——「みらいへ」では普及啓発活動もされるそうですね。

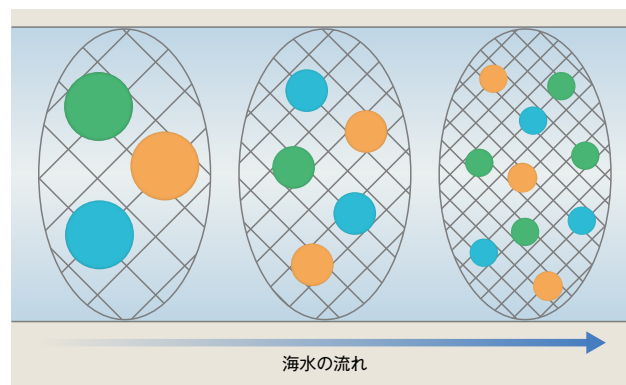
千葉：パラオの子もたちとその家族にも乗船してもらう予定です。観測を見学してもらったり、マイクロプラスチックと一緒に採取されたプランクトンを顕微鏡で観察したり、船のデッキから海面を漂う大型のごみや、さまざまな海洋生物を観察し記録してもらったりといった活動を通じて、プラスチックのみならず、海の魅力や地球環境について広く考えるきっかけになればと思います。

私は2019年の2月までの3年間、イギリスにある国連環境計画（UNEP）世界自然保全モニタリングセンター（WCMC）で、海洋科学の成果を社会につなげる仕事のやり方を学んできました。今回WCMCの科学リテラシーの専門家に「みらいへ」への同乗を依頼しており、「みらいへ」での普及啓発活動について彼女の助けを得ようと考えています。

——どのようにしてJAMSTECが今回のヨットレースに関わることになったのでしょうか。

千葉：実行委員会の方が、海洋プラスチックの問題に着目し、ヨットレースを通じて調査に協力できないかということで、JAMSTECにアプローチしてきてくださったのがきっかけです。

私のところに話が来たのは、2019年の5月でした。それから予算面の手当てをしたり、マイクロプラスチック調査の実績があるボルボ・オーシャンレースのチームと連絡を取ったり、観測機器を購入する手配をしたり、さまざまなことを急ピッチで進めてきました。外



マイクロプラスチックサンプラーでは、目合いの異なる3種類のフィルターでマイクロプラスチックを採取する。



ニューストンネットを使ったマイクロプラスチックの採取の例。写真は2019年8～9月の深海潜水調査船支援母船「よこすか」の航海で行われた採取の様子である。このときの航海では、有人潜水調査船「しんかい6500」による深海でのマイクロプラスチック調査が行われた。
写真提供：中嶋亮太/JAMSTEC

洋で調査を行うにあたっては、さまざまな手続きも必要です。研究者と事務職の方たちとで連携して一生懸命やっています。皆のチームワークのおかげで、実現に向けて進めることができています。

対策の効果を知るには継続的な調査が必要

——今回のような取り組みは今後も続けられるのでしょうか。

千葉：プラスチックごみへの対策として、日本や東南アジアを含む世界の多くの国で、プラスチック製品を減らしたり、生分解性プラスチックに替えたりなど、さまざまな法制化やアクションが進められています。実際に効果があったのかどうかを調べるには、時間的な変化を追う必要があります。そのためには継続的な調査が必要です。

その意味で、同じ航路で同じ時期に繰り返して観測を行うことは大事です。JAMSTECのような研究機関の船舶は、航海によって目的が異なり航路も異なるので、同じ航路で同じ時期に定期的に調査する機会はなかなかありません。一方でたとえば民間のフェリーやタンカーなどの商用船は定期航路を通るので、時系列のデータを得るのに非常に適しています。

また、日本一パラオ親善ヨットレースは、3～4年後にも開催が検討されています。次のレースのときにも同じ調査を行うことができれば、今回のデータと比較して、法制化やアクションに効果があったのかどうかについて検証できます。

ボルボ・オーシャンレース*でも、次回2021～22年に開催されるレースで同様の調査を行うことを計画しています。そのほかのプレジャーボートや帆船も含め、海洋観測ネットワークができつつあります。そういった観測ネットワークに私たちも加わり、得られたデータや科学的成果を世界の人たちと共有して、全球的な観測網の構築を実現し、国連の持続可能な開発目標（SDGs）14.1「海洋汚染を軽減する」に貢献していきたいと考えています。

BE

（文：岡本典明／ブックブライト）

* ボルボ・オーシャンレースは、次回から名称が変更されることになっている。

Pick Up
JAMSTEC

「しんかい6500」 30歳おめでとう！

2019年11月28日、有人潜水調査船「しんかい6500」の30歳の誕生日を、特製のケーキでお祝いしました。中間検査工事中のため、外皮、浮力材などが外された珍しい姿での記念撮影です。1989年11月28日に造船所からJAMSTECへ引き渡されてから30年、潜航回数は1,500回を超えています。これまで何度も改造・改修を行い、常に進化してきましたが、写真に見える耐圧殻は誕生したときのままです。「しんかい6500」特集ページでは、歴史や性能、パイロットの素顔まで、そのすべてを紹介しています。
(<http://www.jamstec.go.jp/shinkai6500/>)



賛助会 (寄付) 会員名簿 2019年12月15日現在

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

株式会社IHI
株式会社アイケイエス
株式会社アイワエンタープライズ
株式会社アクト
朝日航空株式会社
アジア海洋株式会社
株式会社大野回漕店
株式会社アルファ水工コンサルタンツ
株式会社安藤・間
いであ株式会社
株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所
伊藤忠テクノソリューションズ
株式会社
潮冷熱株式会社
株式会社エス・イー・エイ
株式会社エヌイーシー
株式会社SGKシステム技研
株式会社エヌエルシー
株式会社NTTデータCCS
株式会社NTTファシリティーズ
株式会社江ノ島マリナーコーポレーション
株式会社MOLマリナー
株式会社MTS雪氷研究所
株式会社OCC
岡本硝子株式会社
株式会社オキシーテック
沖電気工業株式会社
海洋エンジニアリング株式会社
海洋電子株式会社
株式会社化学分析コンサルタント
鹿島建設株式会社
株式会社カネカ
川崎汽船株式会社
川崎近海汽船株式会社

川崎重工工業株式会社
川崎地質株式会社
株式会社環境総合テクノス
株式会社キュービック・アイ
共立インシュアランス・ブローカーズ
株式会社
共立管財株式会社
極東貿易株式会社
株式会社さんでん
株式会社熊谷組
クローバテック株式会社
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KSP
KDDI株式会社
京浜急行電鉄株式会社
鉱研工業株式会社
株式会社構造計画研究所
神戸ペイント株式会社
広和株式会社
株式会社COAST
国際石油開発帝石株式会社
国際ビルサービス株式会社
コスモ商事株式会社
株式会社コノエ
株式会社コルコ科研
五洋建設株式会社
株式会社コンボン研究所
相模運輸倉庫株式会社
佐世保重工業株式会社
三洋テクノマリナー株式会社
三和化成工業株式会社
株式会社シーエス・ユアテクノロジ
株式会社シーフロアコントロール

株式会社JSP
JX石油開発株式会社
JFEアドバンテック株式会社
株式会社JVCケンウッド
静岡市
シチズン時計株式会社
シナネン株式会社
清水建設株式会社
清水港振興株式会社
シモダフランチ株式会社
ジャパンマリナーユニテッド株式会社
シュルンベルジェ株式会社
株式会社昌新
株式会社商船三井
鈴与株式会社
セイコーウッチ株式会社
株式会社清友農材センター
株式会社関ヶ原製作所
石油開発サービス株式会社
石油資源開発株式会社
セコム株式会社
セナーアンドバーンズ株式会社
株式会社ソリッド・ソリューションズ
株式会社ソルトン
損害保険ジャパン日本興亜株式会社
ダイキンMRエンジニアリング
大成建設株式会社
ダイハツディーゼル株式会社
大陽日酸株式会社
有限会社田浦中央食品
株式会社竹中工務店
株式会社地球科学総合研究所
中国塗料株式会社
中部電力株式会社

株式会社鶴見精機
株式会社帝國機械製作所
株式会社テザック
寺崎電気産業株式会社
株式会社寺本鉄工所
電気興業株式会社
東亜建設工業株式会社
東海交通株式会社
洞海マリンシステムズ株式会社
東京海上日動火災保険株式会社
東京製綱繊維ロープ株式会社
株式会社東京チタニウム
東北環境科学サービス株式会社
東洋建設株式会社
株式会社東陽テクニカ
株式会社東和製作所
トーホーテック株式会社
トビー工業株式会社
新潟原動機株式会社
西芝電機株式会社
株式会社ニシヤマ
日油技研工業株式会社
株式会社日産電機製作所
ニッスイマリン工業株式会社
日鉄エンジニアリング株式会社
日東電工株式会社
株式会社日放電子
日本アキュムレータ株式会社
日本アドバンステクノロジー株式会社
株式会社日本インテリジェントビジネス
日本エヌ・ユー・エス株式会社
日本海工株式会社
日本海洋株式会社
株式会社日本海洋科学
日本海洋掘削株式会社
日本海洋計画株式会社
日本海洋事業株式会社
一般社団法人日本ガス協会
日本軽金属株式会社
日本サルヴェージ株式会社
日本水産株式会社

日本電気株式会社
日本ベントマリン株式会社
日本マントルクエスト株式会社
日本無線株式会社
日本郵船株式会社
野村建設株式会社
株式会社ハイドロシステム開発
濱中製鋼工業株式会社
ハリマ化成株式会社
東日本タグポート株式会社
日立造船株式会社
深田サルベージ建設株式会社
株式会社フグロジャパン
株式会社フジクラ
富士ソフト株式会社
富士通株式会社
富士電機株式会社
古河機械金属株式会社
古河電気工業株式会社
古野電気株式会社
松本徽章株式会社
マリメックス・ジャパン株式会社
株式会社マリン・ワーク・ジャパン
株式会社マルト
三鈴マシナリー株式会社
三井E&S造船株式会社
株式会社三井E&Sマシナリー
三井住友海上火災保険株式会社
三菱重工業株式会社
三菱スペース・ソフトウェア株式会社
三菱造船株式会社
三菱電機株式会社
三菱電機特機システム株式会社
株式会社森京建築事務所
ヤンマー株式会社
株式会社ユー・エス・イー
郵船商事株式会社
横河電機株式会社
株式会社落雷抑制システムズ
株式会社ラジアン
株式会社ロボット



JAMSTEC 国立研究開発法人
海洋研究開発機構
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

