

海と地球の情報誌

Blue Earth

152

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

ISSN 1346-0811
2017年12月発行
隔月6回発行
第29巻 第6号
(通巻152号)



気候変動を 予測して 先手を打つ

マンガン酸化細菌を利用して
レアメタルを回収

「ちきゅう」の保守整備

超スロースピードで生育する
海底下の微生物

超スロースピードで 生育する微生物群を 海底下2kmの 石炭層で発見

近年の科学掘削調査によって、海底下には広大な生命圏が存在することが分かってきた。海底下に生息する微生物の量は、海中の生物量に匹敵すると見積もられている。海底下微生物の多くが地球表層の生命とは系統的に大きく異なり、特異な進化を遂げたものであることも明らかになっている。しかし、海底下微生物の栄養源や生育の速さについては、よく分かっていなかった。

そこで、海洋研究開発機構（JAMSTEC）高知コア研究所地球深部生命研究グループの諸野祐樹さんたちは、アメリカのカリフォルニア工科大学と共同で、2012年に地球深部探査船「ちきゅう」を用いた統合国際深海掘削計画（IODP）第337次研究航海「下北八戸沖石炭層生命圏掘削調査」によって青森県八戸の沖合約80kmの海底下から採取された地質試料に含まれる微生物について、詳細な分析研究を行った。具体的には、海底下約1.6kmから採取された泥岩層と約2kmから採取された石炭層の試料を、「ちきゅう」の船上ラゴにて無酸素状態でガラス瓶に入れ、炭素（¹³C）・窒素（¹⁵N）・水素（²H）の安定同位体で標識されたメタノール、メチルアミン、アンモニウムイオン、重水を少量ずつ添加し、泥岩層試料は37℃、石炭層試料は45℃と現場の環境に近い温度で暗所に放置した。

30ヵ月後、ガラス瓶のなかのメタンと二酸化炭素について、炭素と水素の安定同位体組成を測定。すると、メタンと二酸化炭素は¹³Cに富むものに変化していた。これは、微生物が¹³Cで標識さ

れたメタノールやメチルアミンを取り込んで分解・消費し、メタンや二酸化炭素を産生する代謝を行っていることを示している。

またすべての試料から0.3～1.2μm（1μmは1,000分の1mm）の微生物細胞を検出。微生物1細胞あたりの元素組成を超高空間分解能二次イオン質量分析器（NanoSIMS）で測定したところ、¹³Cで標識されたメタノールやメチルアミンに由来する炭素を取り込んでいる細胞や、¹⁵Nで標識されたメチルアミンやアンモニウムイオンに由来する窒素を取り込んでいる細胞が確認された。この結果は、海底下微生物が泥岩層や石灰層に含まれるメタノールやメチルアミンなどのメチル化合物から生育や生命機能の維持に必要な栄養・エネルギーを獲得する機能を持つことを示している。

さらに、微生物1細胞あたりの窒素と水素の全量と、30ヵ月間に微生物が取り込んだ¹⁵Nと²Hの量の割合から、細胞すべての元素が置き換わる、つまり細胞の数が倍になるのにかかる倍加時間を推定したところ、最速でも数十年から数百年かかることが分かった。またゲノムDNAの解析から、それらの多くが約2000万年前の陸域の森林土壌や浅海の堆積物環境に由来する固有の地下微生物であることが確認された。

これらの研究から、下北八戸沖の海底下約2kmの石炭層に生息する微生物が、地層中に含まれるメチル化合物などの有機成分を利用しながら超スロースピードで生育し、地質学的時間スケールをかけて、石炭や天然ガスといった炭化水素資源の形成プロセスに重要な役割を果たしていることが明らかになった。

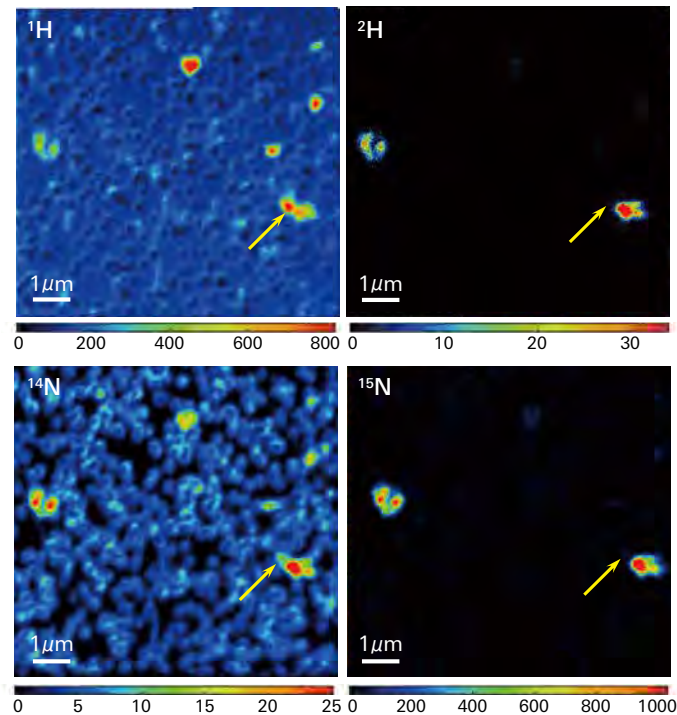
しかし、海底下微生物はどのようなメカニズムで生命機能を長期間維持するのか、その生息可能限界はどこにあるのか、過酷な地下環境で生命の進化や環境適応は起きているのか、といった問いに対する答えは依然として不明のままである。そうした科学的命題を解明すべく、2016年にはIODP第370次研究航海「室戸沖限界生命圏掘削調査：T-リミット」が行われ、現在、採取された地質試料の分析研究が進められている。

（取材協力：稲垣史生 海洋掘削科学研究開発センター 研究開発センター長代理／高知コア研究所 研究所長代理）



地層試料から検出された微生物細胞の走査型電子顕微鏡写真

海底下約2kmの石炭層で採取され、¹⁵Nで標識されたメチルアミンと²Hで標識された重水を添加し、45℃で30ヵ月間放置した試料から検出された微生物細胞の元素組成イメージ。NanoSIMSによる測定で、色が青から赤に近づくほど多くの元素が存在することを示す。一部の微生物は²Hや¹⁵Nを取り込んでいることが分かる。矢印は、¹Hと¹⁴Nで構成されるが²Hや¹⁵Nを取り込んでいない（右の画像では見えない）不活性な細胞である。



「ちきゅう」船上にてガラス瓶に無酸素条件下で封入された、海底下約1.6kmの泥岩層と海底下約2kmの石炭層の試料。各種安定同位体で標識された物質を添加し、泥岩層試料は37℃、石炭層試料は45℃で30ヵ月間放置した。



1 **Close Up**
超スロースピードで
生育する微生物群を
海底下2kmの石炭層で発見

2 **特集**
気候変動を予測して先手を打つ

18 **Aquarium Gallery**
いおワールドかごしま水族館
ユウユウ、海へと帰る
——ジンベエザメ

20 **私がIODPで解きたい謎**
保守整備によって「ちきゅう」の
安全な運航を支える
志賀義弘
地球深部探査センター 技術部
技術第1グループ 技術副主幹

24 **JAMSTEC生まれの種たち**
マンガン酸化細菌を利用して
レアメタルを回収する
井町寛之
深海・地殻内生物圏研究分野 海底資源研究開発センター
地球生命工学研究グループ 主任研究員

加藤真悟
次世代海洋資源調査技術研究開発プロジェクトチーム
成因研究ユニット 海底資源研究開発センター
資源成因研究グループ 特任研究員

菊池早希子
次世代海洋資源調査技術研究開発プロジェクトチーム
成因研究ユニット 海底資源研究開発センター
資源成因研究グループ ポストドクトラル研究員

28 **Marine Science Seminar**
真核微生物の研究から
「燃えているような充実感」を得る
矢吹彬憲
海洋生物多様性研究分野 研究員

32 **BE Room**
Information
『Blue Earth』定期購読のご案内

裏表紙 **Pick Up JAMSTEC**
海洋プレートの“化石”
オマーンオフィオライトのコアを
「ちきゅう」で集中解析

気候変動を予測して先手を打つ

猛暑や豪雪、干ばつや豪雨などの普段とは異なる気候は、農業や医療など、さまざまな面で大きな影響をもたらす。世界各地の気候に影響を及ぼすエルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象などの気候変動現象に関して、海洋研究開発機構（JAMSTEC）アプリケーションラボは世界最高水準の精度で予測できる技術を持っている。

その予測技術を生かしてアプリケーションラボでは、猛暑や大雪などの予測に向けた取り組みが行われているほか、マラリアの警戒システムを構築するプロジェクトなど医療への応用も進められている。先手を打つべく進められている研究や取り組みを紹介しよう。

取材協力 アプリケーションラボ

スワディヒン・ベヘラ

ラボ所長

野中正見

気候変動予測応用グループ グループリーダー

土井威志

気候変動予測応用グループ 研究員

ベンカタ・ラトナム

気候変動予測応用グループ 主任研究員

森岡優志

気候変動予測応用グループ 研究員

山崎 哲

気候変動予測応用グループ 研究員

池田隆美

気候変動予測応用グループ 特任研究員

地球画像：NASA-Goddard Space Flight Center,
data from NOAA GOES

気候変動の予測は、熱帯の海で発生する 現象が鍵を握る

取材協力 スワディヒン・ベヘラ
アプリケーションラボ ラボ所長

「世界各地の猛暑や厳冬、あるいは干ばつなどといった普段とは異なる気候を予測する上で、エルニーニョ現象やラニーニャ現象、インド洋ダイポールモード現象など、熱帯の海で発生する気候変動現象は非常に重要です」と語るのは、アプリケーションラボのスワディヒン・ベヘラさんだ。

エルニーニョ現象やラニーニャ現象は太平洋の熱帯域で発生する。南アメリカのペルー沖では、普段は東風によって海面近くの温かい水は西の方へ吹き寄せられる。暖水が吹き寄せられて温かくなった海域では上昇気流が発生し積乱雲が発達しやすい。一方で太平洋の東側では、運ばれていった水を補うように、深層から冷たい水が湧き上がる。

エルニーニョ現象のときには東風が弱まるために、暖水を西に吹き寄せにくくなる。そのためペ

ルー沖の海水温が普段よりも温かい状態になり、積乱雲ができる場所も東に移動する。ラニーニャ現象のときには東風が普段よりも強まる。海水温の高い場所がより西に移り、積乱雲ができる場所も西に移動する。

熱帯太平洋ではほかにも「エルニーニョもどき現象」「ラニーニャもどき現象」と呼ばれる現象も知られている。エルニーニョもどき現象のときには、熱帯太平洋の東部と西部で海水温が低くなり、中部で高くなる。一方、ラニーニャもどき現象のときには、中部で海水温が低くなり、東部と西部で高くなる。

インド洋の熱帯域で海水温が変動する現象がインド洋ダイポールモード現象だ。普段はインド洋の東側に暖水があり、そこで上昇気流が発生して積乱雲がつくられる。南東風が強く吹いて温かい水が西側に移動しインド洋の東側が普段より冷たくなる現象を「正のインド洋ダイポールモード現象」という。逆に暖水が平常時よりもさらに東側に寄せられる現象を「負のインド洋ダイポールモード現象」という。

さらに大西洋の熱帯域でも「大西洋ニニョ現象」が知られている。普段吹いている南東風が弱まって、大西洋の中央から東寄りの海域の水温が高くなる現象だ。

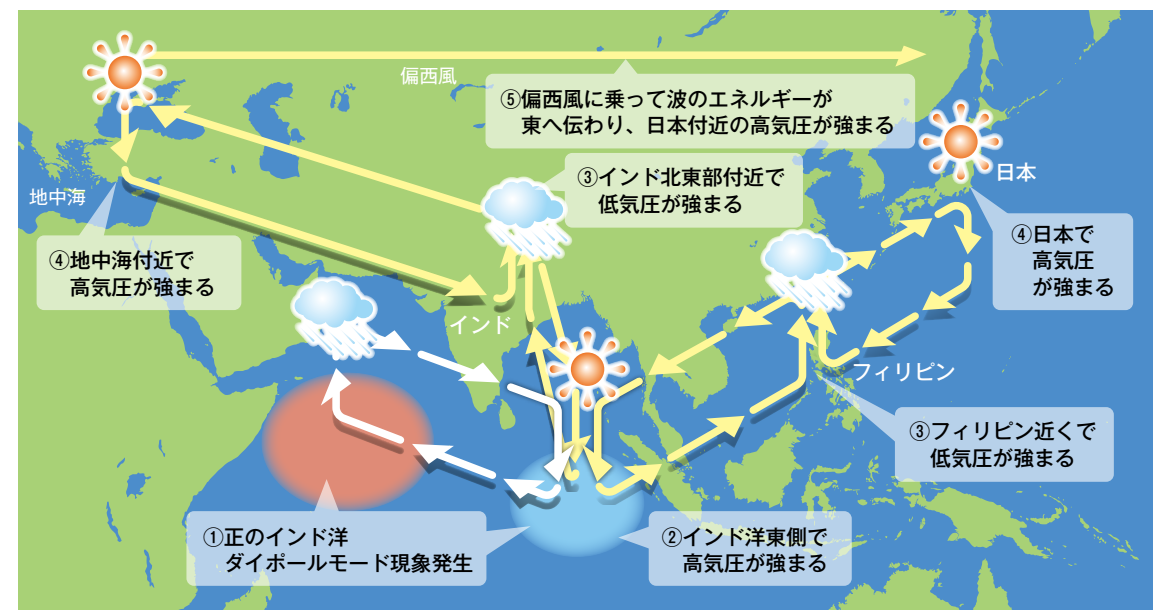
これらの現象が起きると、その影響が大気を通じて伝わっていき、世界各地に異常な天候をもたらすことがある。これを「テレコネクション（遠隔影響）」と呼ぶ。たとえば日本では、エルニーニョ現象が起

きた年は冷夏・暖冬になり、ラニーニャ現象が起きた年の夏は猛暑、冬は厳しい寒さになる傾向がある。また正のインド洋ダイポールモード現象が起きた年の夏も猛暑になることが多い。エルニーニョもどき現象のときには、西日本が乾燥する。

数ヵ月から1年を超えるような、季節をまたぐ気候変動を予測するときに、鍵を握るのは海だ。大気と比べると海は、一度温まると冷めにくい（熱容量が大きい）ので、大気に比べて海の温度はゆっくりと変動する。そのような海の変動が気候変動に影響するのだ。

「季節をまたいで起きる現象は、竜巻や台風などのような気象現象に比べて、その影響がより長期間続きます。洪水や干ばつなど水の管理の問題のほか、農業や医療の問題など、さまざまな分野に影響します。数ヵ月前からそれを予測することができれば先手を打って対策を取ることも可能になります。そのような意味でも、季節をまたぐような時間スケールの気候変動現象を予測することは重要なのです」とベヘラさんはいう。

「アプリケーションラボでは以前からこれらの気候変動現象の予測についての研究を進めてきており、エルニーニョ現象やラニーニャ現象では1年以上前に、インド洋ダイポールモード現象では少なくとも数ヵ月前に、信頼性の高い予測ができる技術を持っています」。そのような技術をもとに、アプリケーションラボでは農業や医療など別分野への応用にも取り組んでいる。



テレコネクションの例（正のインド洋ダイポールモード現象）
正のインド洋ダイポールモード現象が発生すると、東南アジア経由の“近道ルート”と、地中海経由の“遠回りルート”の2つのルートで、日本付近の高気圧が強められ、猛暑になる傾向にある。

気候変動予測の研究に新たな視点をもたらした沿岸ニ－ニヨ現象

取材協力 土井威志

アプリケーションラボ 気候変動予測応用グループ 研究員

エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象は、大洋スケールの現象だ。一方で、「沿岸ニ－ニヨ現象」「沿岸ニ－ニャ現象」という、大陸の西岸で局所的に発生する現象が近年になって発見された。大陸西岸域の海水温が高くなるのが沿岸ニ－ニヨ現象、逆に海水温が低くなるのが沿岸ニ－ニャ現象だ。そのような現象は、オーストラリア大陸西岸沖合やアフリカのダカールやナミビアの沖合、北アメリカのカリフォルニアの沖合などで発見されている。

オーストラリア大陸西岸域で海水温が異常に高くなる現象は「ニンガルー・ニ－ニヨ現象」と呼ばれ

ている。2011年、南半球での夏の時期に、オーストラリアの西岸域の海水温が過去に例がないほど異常に高くなり、海の生態系や農業などに大きな被害をもたらした。このときの現象をきっかけとして、ニンガルー・ニ－ニヨ現象の研究がスタートした。

土井威志さんはニンガルー・ニ－ニヨ現象が予測可能であることを2013年に示した。「コンピュータを使った過去再予測実験の結果を観測データを使って検証することで、過去30年間で発生したニンガルー・ニ－ニヨ現象が予測できるかどうかについて調べました。その結果、ラニーニャ現象と連動して発生するニンガルー・ニ－ニヨ現象については、およそ半年前からニンガルー・ニ－ニヨ現象の発生を予測できることが明らかになりました」と土井さん。オーストラリア西岸域にはルーウィン海流という

暖流が熱帯域から南に向かって流れている。ラニーニャ現象が発生すると、熱帯太平洋の西部の海水温が高くなる。温められた太平洋の水が、ルーウィン海流に乗ってオーストラリア西岸域までやって来る。それをきっかけとして、大気と海洋の相互作用によって、水温がさらに高まったり、高いまま維持されたりする状態が続くようになるという。

「ラニーニャ現象やエルニーニョ現象は半年以上前からでも予測できる場合がほとんどです。そのようにすでに予測できるものと連動して発生するのは予測がしやすいのです」と土井さん。「ニンガルー・ニ－ニヨ現象はラニーニャ現象と連動して発生するタイプのほかに、ラニーニャ現象とは関係なく局所的に発達するタイプがあります。局所的なタイプは、ラニーニャ現象のような大きな現象の助けを借りずに発生するため、少なくとも現状では予測が難しいです」

沿岸ニ－ニヨ現象が発生すると、海水温が変化するので、漁業への影響やサンゴの白化などが起きることがある。その影響は海にとどまらない。「沿岸ニ－ニヨ現象は降雨にも影響するので、洪水や干ばつなどにも関連します」と土井さん。「沿岸ニ－ニヨ現象を海だけの現象だと限定せず、海と大気の現象として研究し、予測につなげることが大事だ

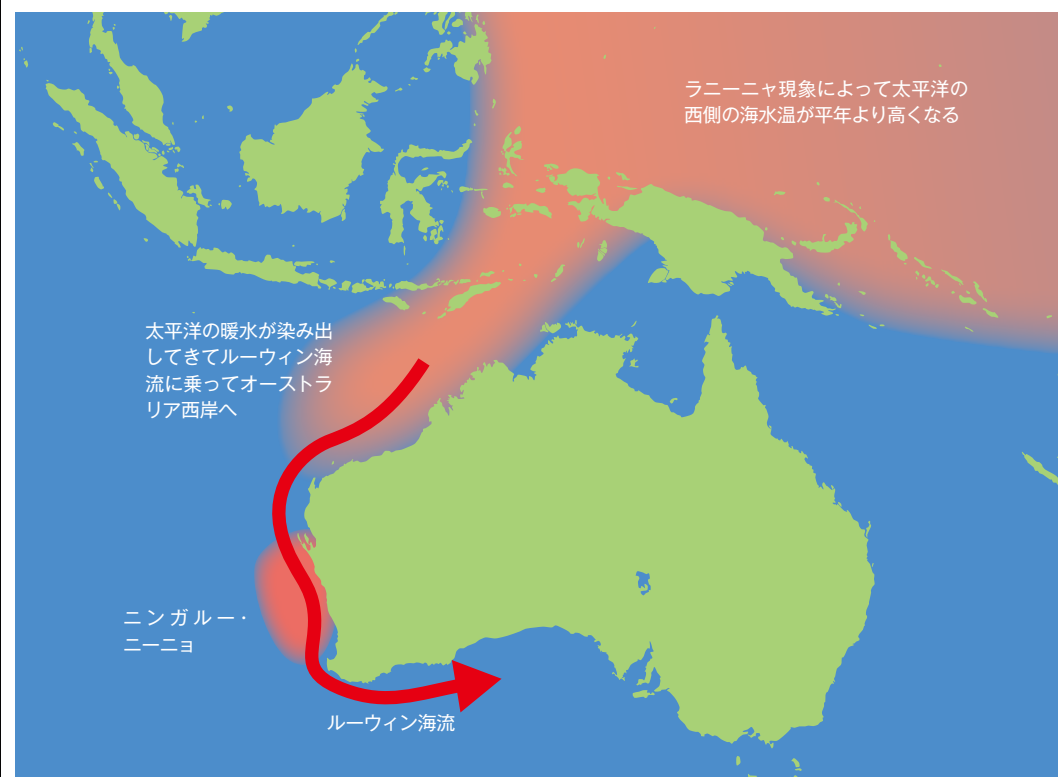
と考えて私たちは研究を進めています」

従来、オーストラリア西部での降水量の予測は非常に難しかったのだが、近年頻発し始めたニンガルー・ニ－ニヨ現象の存在を考えると、降水量予測もしやすくなったと土井さんは続ける。「局所的な現象である沿岸ニ－ニヨ現象によって、気候変動予測の研究に新たな視点がもたらされたといえます」。ニンガルー・ニ－ニヨ現象に関して、今後は予測精度を高めていくとともに、ニンガルー・ニ－ニヨ現象によって起きる自然災害に対する早期警戒システムの構築を図るべく、研究を進めていきたいという。



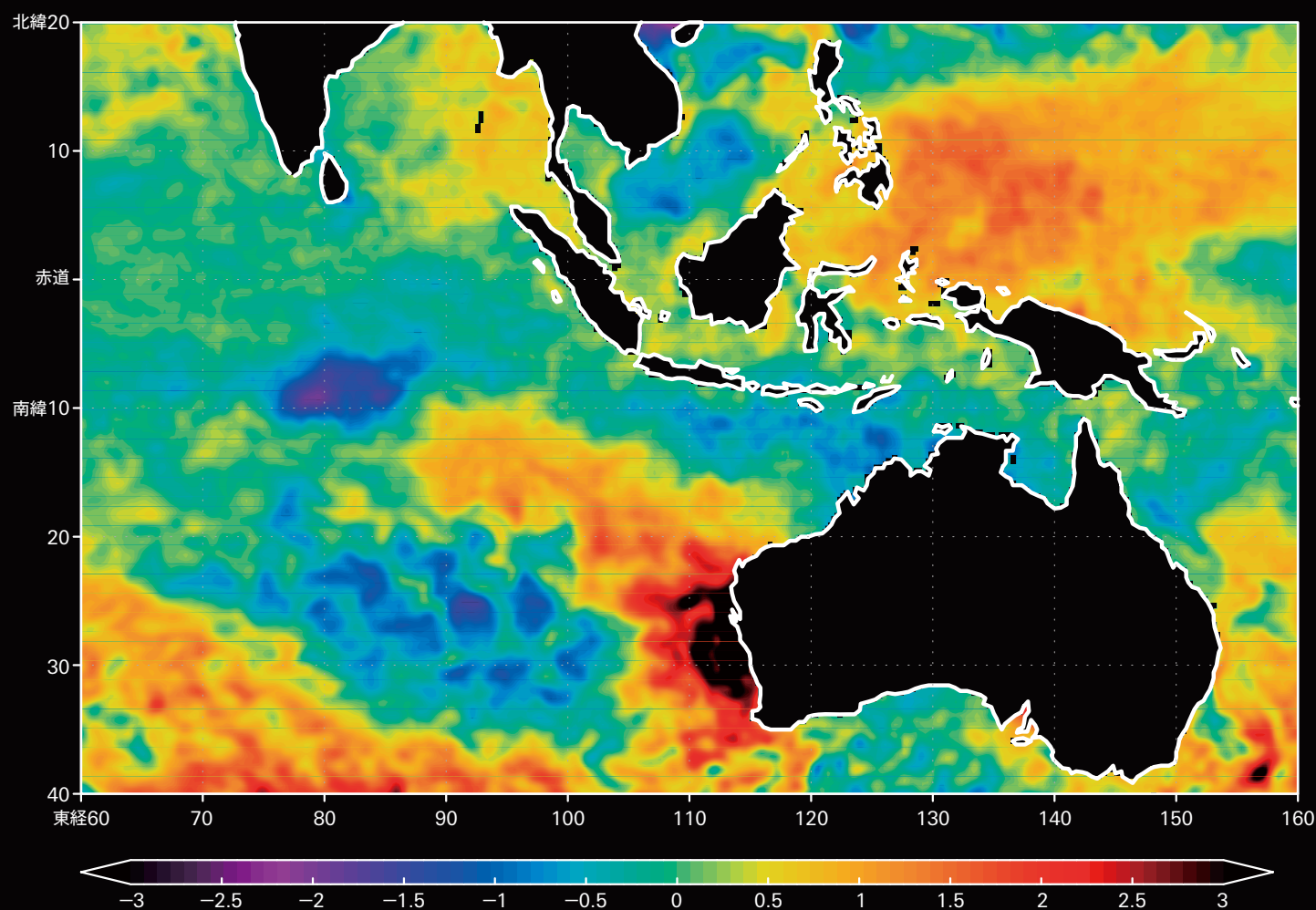
世界各地の沿岸ニ－ニヨ／ニ－ニャ現象

沿岸ニ－ニヨ現象は現在、北アメリカ大陸西岸のカリフォルニア・ニ－ニヨ／ニ－ニャ、オーストラリア大陸西岸のニンガルー・ニ－ニヨ／ニ－ニャ、アフリカ大陸西岸のダカール・ニ－ニヨ／ニ－ニャ、ベンゲラ・ニ－ニヨ／ニ－ニャが発見されている。そのほとんどは2010年代に発見された。



ラニーニャ現象の影響で発生するニンガルー・ニ－ニヨ現象

ニンガルー・ニ－ニヨ現象には、ラニーニャ現象と連動して発生するタイプと、ラニーニャ現象とは関係なく局所的に起きるタイプがある。ラニーニャ現象が発生すると、熱帯太平洋西部の海水温が平均より高くなる。温かい水がオーストラリア大陸北西部のあたりに染み出してくる。その温かい水が大陸西岸の暖流ルーウィン海流に乗って南下していき、大陸西岸沖の海面水温が高くなる。



2011年2月のオーストラリア大陸周辺の海面水温の平年値からのずれ

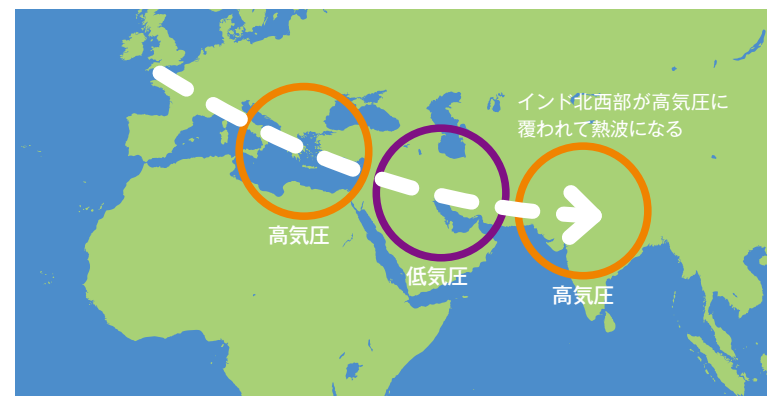
このとき、オーストラリア大陸西岸の海域の海面水温が異常に高くなり、平年よりも3℃近く温まった。水温のこの異常な高まりをきっかけとして、ニンガルー・ニ－ニヨ現象の研究が活発になった。

インドと日本での猛烈な暑さは、熱帯の海の現象が原因か？

取材協力 **ベンカタ・ラトナム**
アプリケーションラボ 気候変動予測応用グループ 主任研究員
森岡優志
アプリケーションラボ 気候変動予測応用グループ 研究員



2015年5月に発生した熱波の際、暑さのためにゆがんでしまった道路。インド・ニューデリーで撮影された写真である。©EPA=時事



インド北西部で熱波になる場合
北大西洋の上空で発生したブロッキングの影響で、そこからインド方面へ高気圧と低気圧が交互に発生する。インドが高気圧に覆われて熱波が生じる。



インド南東部で熱波になる場合
東南アジア近辺の低気圧とその南にある高気圧により西風が生じ、引っ張られるようにインドでは内陸部から暑い風が吹く。それにより熱波になる。

インドでは熱波による死者が大きな社会問題となっている。たとえば2003年の熱波では3,054人も死亡者が出た。2015年に発生した熱波でも2,248人の死亡者が出た。

「インドで熱波が発生しやすいのは夏ではなく、インドモンスーンが始まる前の3月から6月にかけてです」とベンカタ・ラトナムさんは語る。6月以降はインドモンスーンが始まって大量の雨が降るため気温が下がるのだ。

インドの気象局の定義によれば、熱波は45℃以上の状態である。「インドでは暑い時期に40℃になることは普通です。しかしそこからさらに5℃高くなるのは異常な値なのです。熱波は短いときで数日、長いときで15日ほど続きます」とラトナムさん。

これまでも熱波の発生と死者数の関係に関する研究などはあったが、熱波そのもののメカニズムはよく分かっていなかった。そのメカニズムを知るべく、ラトナムさんは研究を行った。

ラトナムさんは、インド北西部の広い領域と、南東部の小さな領域の2つの場所に焦点を当てて研究を進めた。まず1982年から2013年までの過去30年間に於いて、毎年3月1日から6月30日までに、最高気温が平年より5℃高くなった日がどれくらいあったのかを調べた。その結果、北西部では30年間で19回、南東部では30年間で13回、非常に強い熱波が発生していた。

ラトナムさんは、インドに熱波をもたらす大気の変動がどこからやって来るのかを検討し、次のようなシナリオを考えるに至った。まず北大西洋の上空で大気のブロッキング現象（12～13ページ参照）が発生する。その影響で、インドの方に向かって高

気圧と低気圧が交互に波のように発生する。そのときインドの上空では高気圧が発達するために、インド北西部で熱波が生じるというシナリオだ。

一方、南東部の熱波に関しては「東南アジア近辺の西太平洋に発生する低気圧の影響で、インド南東部に大陸内部からの熱風が吹いてくることが熱波の原因ではないかと考えています」とラトナムさん。海よりも陸の方が温まりやすく、暑い時期になると海に比べて陸の方が気温は高くなる。陸から海に向かって風が吹くと、温度の高い大気が内陸から運ばれてくるため、暑くなる。

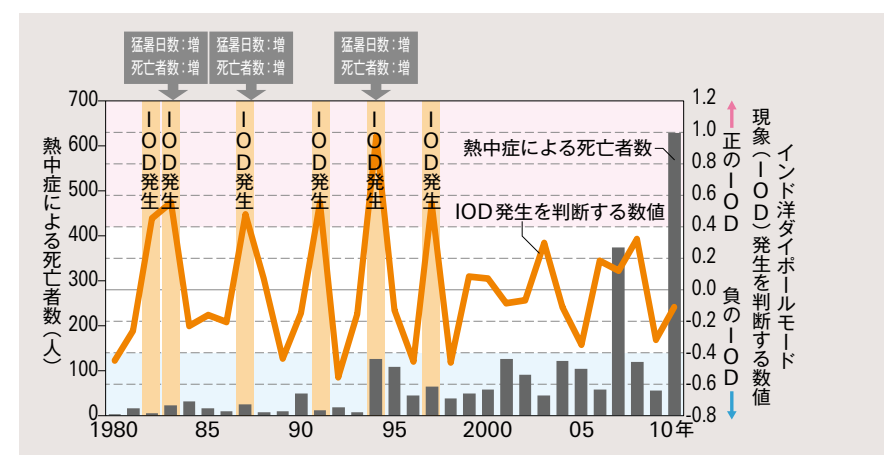
現在は、インドの熱波の予測に向けてシステムを開発している段階だ。その際、まず全球の気候モデルで予測する必要があるという。「インドの熱波はエルニーニョ現象が発生した翌年に発生しやすい傾向がある」とラトナムさん。「北大西洋でのブロッキングもエルニーニョ現象の影響で生じている可能性があります。全球のあらゆるところに、熱波の大本の原因になっているものがある可能性があります。全球の気候モデルでなければ、インドの熱波の予測はできないと考えています」。その後、より細かいメッシュで区切ったモデルをつくり、詳細な熱波予測をしていくことが目標だ。

予測が可能になった場合、「インドの気象局に情報を提供したり、JAMSTECのウェブサイトに掲載したりするなどして情報提供したい」とラトナムさんはいう。それにより熱波によって大きな被害を受けやすい路上生活者を木陰に誘導するなどして死亡者を減らすことが可能になるだろうと、ラトナムさんは期待する。

一方、日本では例年、熱中症の患者は5月ごろから出始め、死者数は7月から8月にかけて最も多くなる。関東地方の熱中症による死者数を見ると、1994年を境に増え始めた。特に2010年は突出しており、600人以上が熱中症で亡くなった。

熱中症の危険度を表すものとして「暑さ指数（WBGT）」がある。これは気温のほかに湿度などの効果も取り入れた指標だ。気温と同じく「℃」で表され、28℃を超えると熱中症の危険度が増すといわれている。

「WBGTと熱中症による死者数が必ずしも相関しているわけではないように見えたことから研究を始めた」と森岡優志さんはいう。調査を進めると、死者数に関しては湿度よりも気温との関係が強いことが分かった。「さらに調べていくと、気温が



熱中症による死者数、猛暑日数、インド洋ダイポールモード現象との関係

35℃を超える猛暑日が多いほど、熱中症による死者数が増えることが分かりました」

猛暑日の日数は年によって増減する。ではその増減はなぜ起きるのか。1994年は正のインド洋ダイポールモード現象が、2010年はラニーニャ現象が発生した年だった。森岡さんらは熱帯の気候変動現象に着目した。

森岡さんらが、過去30年間で、インド洋ダイポールモード現象やラニーニャ現象が発生した年と猛暑日の数との相関を調べたところ、正のインド洋ダイポールモード現象は30年間で6回発生しており、そのうち3回で日本が猛暑になり、熱中症による死者数も増えていたことが判明した。「わりと高い確率で、正のインド洋ダイポールモード現象が発生すると熱中症による死者数が増加することが示唆されました」と森岡さん。

ラニーニャ現象に関しては、インド洋ダイポールモード現象ほどの強い関係は見られなかったというが、少なくとも2010年についてはラニーニャ現象の発生が日本での猛暑、ひいては熱中症の死者数の増加に関係しているだろうと森岡さんは指摘する。

将来的には、7月から8月にかけて猛暑日がどれくらい出現しそうかを予測することが重要だと森岡さんはいう。「平年に比べて猛暑日が多いことが分かれば、行政側でも備蓄を増やしたり、救急車の搬送の準備などに役立てたりすることができます。もちろんWBGT指数による予測も大事です。それと同時に、極端なケースとして、こういう情報も、対策を考える上で参考にできるような仕組みが必要だと考えています」

日本近海の水産業や気候に影響——黒潮 続流の変動は予測できるか？

取材協力 野中正見

アプリケーションラボ 気候変動予測応用グループ
グループリーダー

黒潮は南から北上してきて、日本列島の南岸を流れる海流だ。房総半島のあたりからは東へと向きを変え、日本列島から離れていく。日本列島から離れた後の流れは「黒潮続流」と呼ばれている。黒潮続流は毎年同じ場所を同じ強さで流れるわけではなく、年によって向きや強さが変動する。

野中正見さんは、その黒潮続流に注目して研究を進めている。「黒潮続流は、北太平洋全体の気候にも影響します。西部北太平洋は非常に重要な漁場でもあります。そこの海の様子を理解する、そして可能であれば予測することは、気候を理解する面からも、水産業などの産業的な面からも非常に重要です」

黒潮続流の変動を予測する鍵となるのが、北太平洋で冬に現れるアリューシャン低気圧だ。アリューシャン低気圧は強くなったり弱くなったりと変動する。それに伴って、アリューシャン低気圧の南側を流れる偏西風が変動することで北太平洋の中央付近で大きな波がつくられる。

野中さんらは、アリューシャン低気圧が変動して海に波が生じた状態を海洋モデルのなかで再現して計算を行った。その結果、北太平洋の中央付近で生じた波が3年ほどかけて日本付近までやって来て、黒潮続流が変化することが明らかになった。「その波の様子を見ることで、3年ほど先までの黒潮続流の予測ができることが分かりました」と野中さん。

ただし、それで黒潮続流がすべて予測できるようになるかというと、そうではない。「海の変動は基本的に風によって生じるのですが、黒潮やメキシコ湾流のような強い流れには、風で押される力が一定でも、勝手に変動する予測不可能な成分があることが昔から知られています。予測不可能な成分が大きいほど予測は困難になります」。そこで野中さんたちは黒潮続流について、勝手に変動する成分がどれくらい大きいのかを調べる研究も行った。

野中さんらは、スタート時の条件をほんの少しだけ変えて、まったく同じ風の変動を与えた3つの数値実験を行って比較をした。その結果、「アリューシャン低気圧の変動によって変動する成分と、黒潮続流のなかで勝手に変動する成分とが、ほぼ半々という結果になりました。黒潮続流の年々の変動

は、半分は予測ができそうなのですが、残りの半分は本質的に予測できないことが分かったのです」

このような予測不可能な成分がある場合、「アンサンブル予測」と呼ばれる手法が有効だ。これは初期値にわずかなばらつきを与えて多くの数値予測を行い、それらの平均値などから確からしい結果を予測するものだ。大気にも予測不可能な成分があり、アンサンブル予測は天気予報などでは以前から利用されてきた。台風の予報円もアンサンブル予測の一例だ。

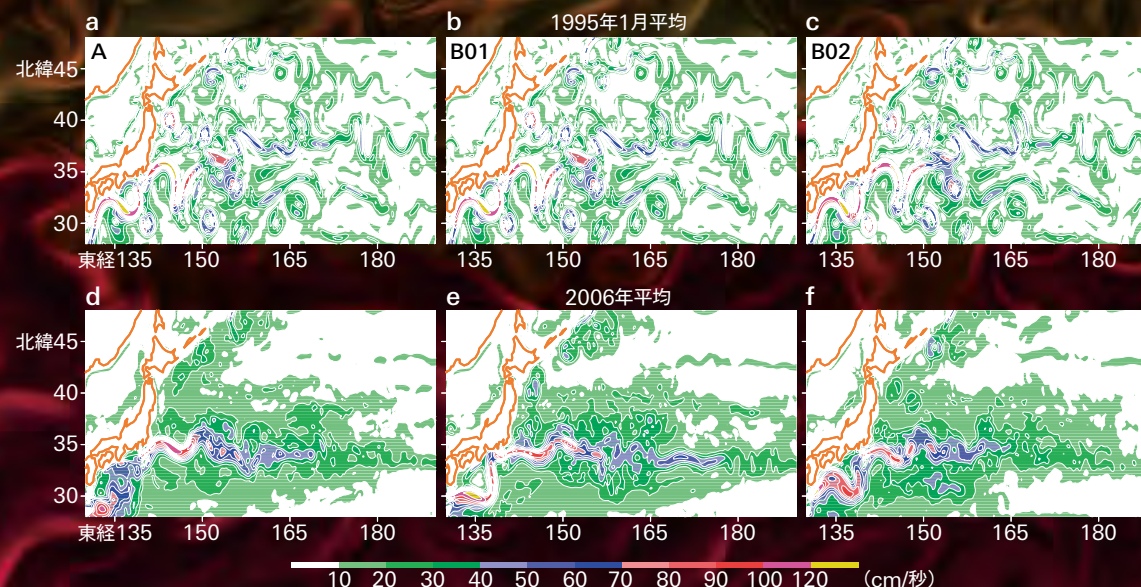
黒潮続流の予測について、今後はアンサンブル

予測が重要になると野中さんはいう。大気に比べて現象のスケールが小さく、また計算量が膨大になることもあって、海洋ではアンサンブル予測はこれまで行われてこなかった。「2015年に3世代目の地球シミュレータが稼働し始めましたが、それによりようやく海洋でのアンサンブル予測が可能になりました」と野中さん。

将来的には黒潮続流の変動予測が、水産業などに生かされていくことも視野に入れている。「それに向けてまずやるべきことは、アンサンブル予測を毎年コンスタントに行って結果を検証していくこと」だと野中さん。「検証を続けてある程度予測が可能になった段階で、社会に向けて情報を発信していくことになると思います」

条件をわずかに変えた3つの数値実験

初期状態がほぼ同じで（上段）、大気の状態を同じにしたにもかかわらず、黒潮続流の速さや、東側への広がり方が大きく異なるものになった（下段）。勝手に変動する成分のために、このようなことが生じる。



海洋モデルで再現した海面水温と海流の強さ

房総半島あたりから東へ流れていく強い海流が黒潮続流である。色相は海面水温を表し、明るいところほど流れが速いことを表している。
画像提供：アプリケーションラボ 佐々木英治、地球情報基盤センター 松岡大祐

上空10kmで発生するブロッキングから 日本のお大雪を予測する

2014年2月8日、雪の降る横浜市内の様子。
©iStock.com/Aduldej

取材協力 山崎 哲

アプリケーションラボ 気候変動予測応用グループ 研究員

「ブロッキングとは簡単にいうと、高度約10kmで発生する巨大な高気圧のようなものです」と語るのは山崎哲さんだ。高度約10kmの上空には偏西風が吹いている。その偏西風が吹く領域でブロッキングが発生すると、偏西風が非常に大きく蛇行する。偏西風が東風になったり、風が2つに分かれたりすることもあるという。

「ブロッキングは、1週間から10日間ほど維持される性質があります」と山崎さん。一般的に移動性の低気圧や高気圧は、1週間もかからずに西から東へ通過していく。しかしブロッキングが存在することで、たとえば低気圧がゆっくり進んで普段より多く雨や雪をもたらしたりすることがある。「ブロッキング自体が大雨や大雪を降らせたりすることはありませんが、さまざまな異常気象に関係していることが分かっています」

ブロッキングは5,000kmものスケールになるこ

とがある非常に巨大な現象だ。それに対して降水をもたらす積乱雲などは10kmほどのスケールで、ブロッキングとはかなり大きさが異なる。実際、ブロッキングが起きたときに、どのようなプロセスを経て降水現象につながるのかはよく分かっておらず、山崎さんはそのプロセスを解明すべく研究を進めている。「プロセスを理解することが、異常気象の早期予測につながると考えています」と山崎さん。

2014年2月、関東地方で2度大雪が降った。このとき大雪をもたらしたのは、関東地方の南の海上を通過した低気圧（南岸低気圧）だ。このときは1週間の間を空けて2つの低気圧が同じようなコースを通過し、それぞれで関東に大雪を降らせた。

「2014年2月は、初旬から中旬にかけて日本の東側でブロッキングが発生していました」と山崎さん。連続して雪が降ったことがブロッキングに関連しているのではないかと考えて研究をスタートした。ブロッキングが発生した事例と、関東地方で大雪が降った事例を過去50年にわたって調べた結果、

「ブロッキングが発生していると、低気圧が移動するときに日本の太平洋側のへりを通るコースを移動しやすいことが分かりました」と山崎さん。ブロッキングがあると、低気圧が似たようなコースを通らざるを得なくなり、そのときに雪や雨が降りやすくなることが分かったのだ。「雨になるか雪になるかは、高度約2km以下くらいの低高度の寒気がどこまで南下しているかによって決まります。ブロッキングの位置が少しずれているだけで、日本への寒気の入りやすさが変わることも分かりました」

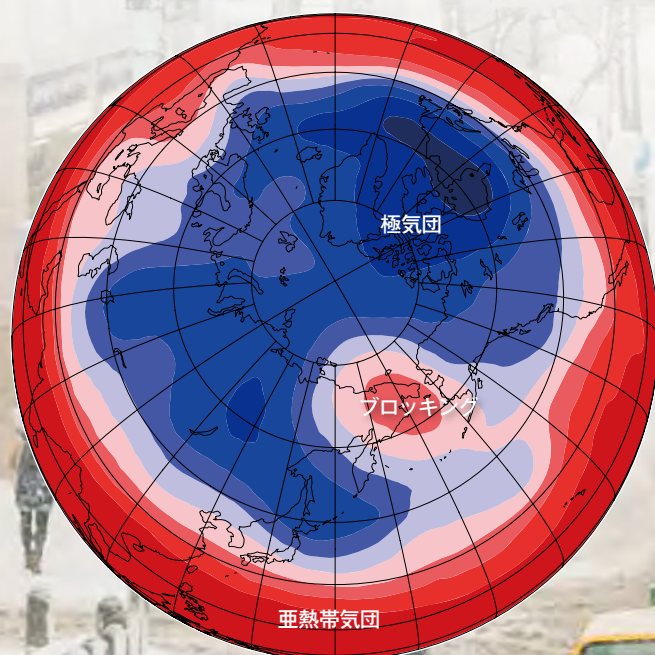
山崎さんはその後、日本海側での大雪とブロッキングとの関係についても研究を行っている。「ブロッキングが日本の北あたりで発生すると、日本海側で大雪になりやすくなる傾向が見られました」

例年、大陸にあるシベリア高気圧から日本海に向けて冷たい風が吹き、日本海で水蒸気を得ながら日本列島に到達し、日本海側に雪をもたらす。日本の北あたりで発生したブロッキングがシベリア高気圧に影響を及ぼし、日本海に吹いてくる風の吹き方や強さが変化する。それによって雪の降り方のパ

ターンが変化するのだという。

またブロッキング自体が上空の寒気の位置を変えていることも分かったと山崎さんはいう。「ブロッキングがあると、その南側に極からの寒気が張り出すことがあります。その寒気の張り出し方のパターンをブロッキングが決めていることが分かってきました」。日本上空に寒気をもたらされると大気が不安定になる。それによって降水が起こりやすくなるというわけだ。

山崎さんらは、大気の過去の状態を復元したデータを作成できるシステムを開発中だ。「いまのところ過去7～8年ほどの大気状態の復元ができています。それをもっと長期化していき、そのデータを使った過去のブロッキングの予測実験の研究などを行いたいと考えています。将来的にブロッキングが日本に降水をもたらすプロセスが明らかになれば、降雪予測のようなかたちで何らかの情報を出していきたいと考えています」



2014年2月7日の高度10km付近の天気図
亜熱帯気団を暖色、極気団を寒色で示している。亜熱帯気団と極気団の間に偏西風が流れている。亜熱帯気団が、偏西風帯を越えて張り出している部分がブロッキングである。

ブロッキングと関東地方の降水

日本の東でブロッキングが発生すると、低気圧の進路が妨害されて似たようなコースをたどり、関東地方に連続して降雨や降雪をもたらす。



ブロッキングと日本海側のお大雪

日本の北でブロッキングが発生すると、極地方の寒気を引き込んでくる。日本海側で大雪が降る一因となる。



南アフリカでのマラリアの早期警戒システム構築が進行中

取材協力

池田隆美

アプリケーションラボ 気候変動予測応用グループ
特任研究員

スワディヒン・ベヘラ

アプリケーションラボ ラボ所長

マラリアは蚊が媒介する感染症だ。雨が多く高温多湿な地域で多く発生し、最もリスクが高い地域がサハラ以南のアフリカである。

蚊は卵から成虫に育つまで、水中での生活が続くため、雨が多いと数が増える。蚊がマラリアに感染しているヒトを刺すとマラリア原虫が蚊に移り、蚊

の体内で原虫が成長する。その蚊がヒトを刺すことによりマラリア感染は広がっていく。「このサイクルに雨は欠かせません。また気温も重要です。今回は気温、降水量とマラリアの発生率の関係に注目して研究を行いました」と語るのは池田隆美さんだ。

研究対象としたのは、南アフリカ北部のリンボボ州である。南アフリカでは毎年6,000件ほどのマラリア感染の報告があり、リンボボ州は南アフリカのなかでもマラリアが最も多く発生する地域だ。マラリアが年中流行しているモザンビークやジンバブエと接しており、それらの国からの患者流入もあって、

常に大流行の危険をはらんでいる地域だという。

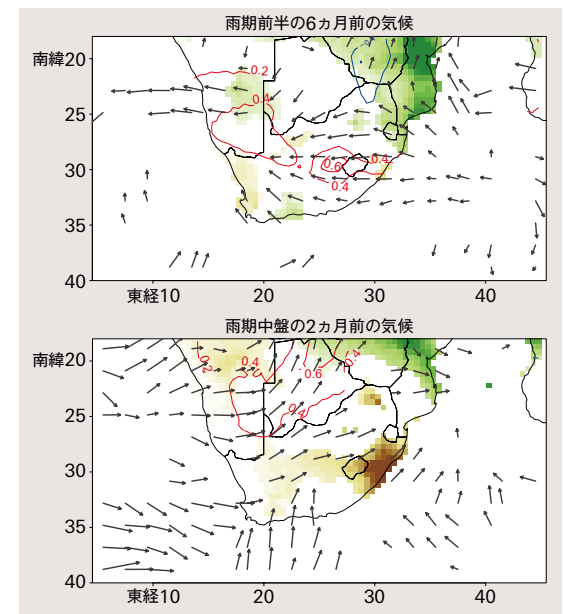
池田さんらはまず、リンボボ州の医療機関から得られた17年間のマラリア患者データを用いて、マラリア発生率の季節分布を調べた。その結果、マラリアは南半球の春である9月に発生し始め、夏の1月に最も流行することが確認できた。

リンボボ州では、9月から翌年5月までが雨期である。池田さんらが、マラリアが多く発生する年の気候条件を調べたところ、雨期前半（9～11月）に発生率が高い年は、南西インド洋から湿った東風が吹きやすく、6カ月前の降水量が平年より増加していた。一方、雨期中盤（12～2月）に発生率が高い年は、2カ月前にモザンビークでの降水量が増加し、気温もやや上昇していた。「雨期前半と中盤の発生では、異なる降水量、そして気温、または風が関わっていることが分かりました」と池田さん。

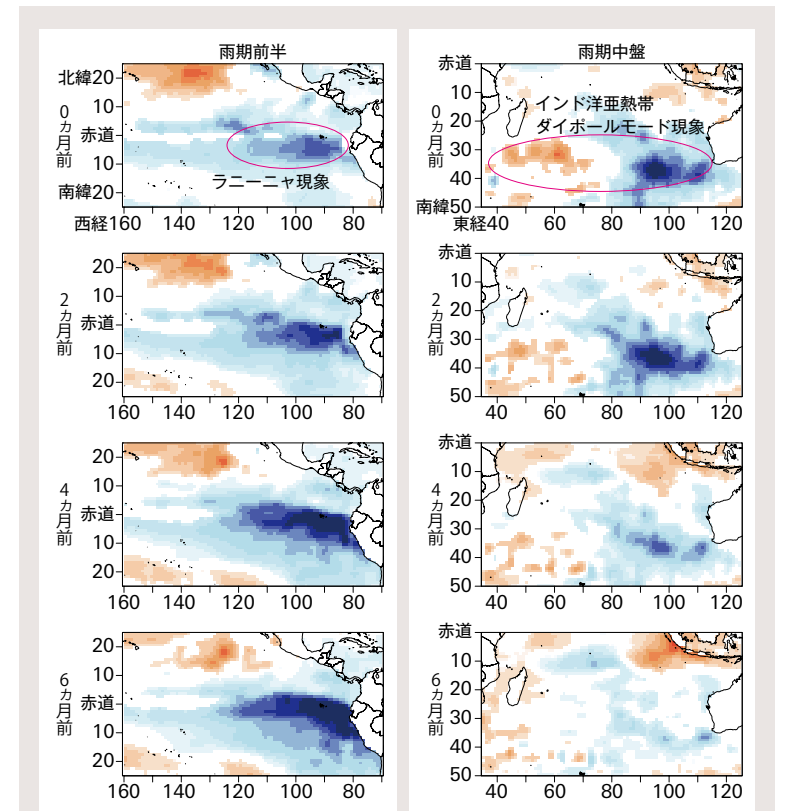
雨期前半にマラリアが多い年には、6カ月前からラニーニャ現象が発生していた。ラニーニャ現象が発生すると、南アフリカには大量の雨が降る。一方、雨期中盤にマラリアが多い年には、2カ月前から正のインド洋亜熱帯ダイポールモード現象が発生していたことが分かった。正のインド洋亜熱帯ダイポールモード現象は、南インド洋の海面水温が南西部で平年より高くなり、北東部で低くなる気候変動現象で、南アフリカでの降水量を増やすことが知られている。「つまりマラリアが発生し始める時期、そしてマラリア発生率が最高値に到達する時期、この2つの時期には異なる気候変動現象が関連していることが分かったのです」

池田さんらは現在、気候変動予測情報をもとにしたマラリア発生率の予測モデルの開発を進めている。「予測したいのは、いつ、どこで、どれくらいマラリアが発生するのかということです」と池田さん。現地の関係者によれば、薬の手配や配布、医療関係者の配置などを円滑に進めるために、3カ月前には予測情報が必要だという。

「どこで発生率が高くなるのかという予測も大事です」と池田さん。対策の1つとして、住居の壁への殺虫剤の噴霧が行われる。9月から3月まで、その作業がずっと行われるのだが、人員が限られているため、殺虫剤の噴霧は順次行われることになる。そのとき殺虫剤をかけるタイミングも重要だ。早過ぎたり遅過ぎたりすると効果が薄れてしまうからだ。「スケジュールは7月に決まります。その時点でいつ、どこで、どれくらいマラリアが発生するの



マラリアが雨期前半（9～11月）に多い年の6カ月前（上）と、雨期中盤（12～2月）に多い年の2カ月前（下）の降水量、気温、海上風の平年との差。緑は降水量が平年より多く、茶色は少ないことを示している。



マラリアが雨期前半（9～11月）に多い年には、ラニーニャ現象が発生していた（左）。一方、雨期中盤（12～2月）に多い年は、正のインド洋亜熱帯ダイポールモード現象が発生していた（右）。海面の色は海面水温の平年との差で、赤は平年より高く、青は低いことを示している。

殺虫剤噴霧の練習場で、担当者が噴霧のやり方を実演している場面。



南アフリカでマラリアを媒介する蚊

予測精度を高め、さらなる社会応用を目指す

スワディヒン・ベヘラ
アプリケーションラボ所長に聞く



撮影：藤牧徹也

Swadhin K. Behera. 1964年、インド・オリッサ州ブパネシュワール生まれ。ベルハンプール大学海洋科学学科卒業後、1986年に同大学大学院修士課程修了。インド気象局、インド熱帯気象研究所で研究者として勤務し、1998年に博士号を取得。1998年来日し、JAMSTEC地球フロンティア研究システムポスドク研究員、2003年よりサプリーダー。2009年よりアプリケーションラボチームリーダーとなり、プログラムディレクター、気候変動予測応用グループグループリーダーを経て、2017年4月よりアプリケーションラボ所長となる。

■アプリケーションラボの研究

——アプリケーションラボの「アプリケーション」とは「応用・実用化」の意味ですね。

ベヘラ：そうです。アプリケーションラボでは、気候変動を中心に研究を行ってきました。これまでの研究で、3ヵ月から6ヵ月先までの気候変動を予測できることが分かってきました。そのような予測情報は、社会的にも有効活用できるのではないかと期待されています。アプリケーションラボでは、そのような期待に応えることを目指して研究を行っています。それに向けて、まずは予測精度を向上させることが必要です。

現在アプリケーションラボには、気候

変動予測応用グループと海洋・大気環境変動予測応用グループという2つのグループがあります。

気候変動予測応用グループでは、気候変動の理解とその予測に関する研究を進めています。主にSINTEX-Fという大気海洋結合大循環モデルを用いて、全球をターゲットとしたシミュレーションをしています。SINTEX-Fの開発は日本だけでなく、ヨーロッパの研究機関とも協力しつつ行っています。エルニーニョ現象などの予測に関してSINTEX-Fは、世界で最も優れたモデルです。

予測精度を高めるには、その背景にある気候変動現象についてきちんと理解す

る必要があります。それはエルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象といった熱帯での現象ばかりではなく、中緯度や高緯度での気候変動現象もあります。そういった1つ1つのプロセスをきちんと理解する必要があります。

——今回の特集では、気候変動予測応用グループの研究を中心に紹介しました。もう一方の海洋・大気環境変動予測応用グループでは、どのような研究が行われているのでしょうか。

ベヘラ：海洋・大気環境変動予測応用グループでは、JCOPE（日本沿岸海洋予測可能性実験）という沿岸海洋のシミュレーションモデルに基づいて、日本近海の海流や水温などの情報を詳細に予測しています。また大気中のエアロゾルや化学物質などといった物質循環の予測も同時に行っています。そういった情報はウェブサイトを通じて公開しています。「黒潮親潮ウォッチ」というページは毎週更新しており、特に漁業関係者の方からのアクセスが非常に多いですね。

JCOPEに潮汐の影響を入れるなど、さらに詳細なシミュレーションをつくって予測精度の向上を目指しています。

■技術革新による研究の進歩

——気候変動の予測にはコンピュータが欠かせませんね。

ベヘラ：天気予報に初めてチャレンジしたのは1922年ごろでした。当時の計算機は手回し式で計算にも時間がかかり、6時間先の予測をするのに1週間かかるほどでした。

天気予報に初めて成功したのは、それから30年ほどたった1950年ごろのことです。当時の大型コンピュータを使って、24時間先の天気予報を、ある程度の精度でもって予測することに成功しました。大型コンピュータの登場という技術革新が予測精度の向上につながったのです。

2002年にも、それに近いことが起きました。JAMSTECのスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」が完成し、動き始めたのです。天気予報では1〜2週間先の予測を行います。私たちが行っている気候予測では、数ヵ月から1年先、さらには10年先を予測します。これを可能にし

たのが地球シミュレータでした。これも技術革新の恩恵です。

——今後も技術革新は続くのでしょうか。
ベヘラ：まさにいま、次の新しい技術革新が起きつつあります。AI（人工知能）です。

1960年代には500kmほどのメッシュで天気の予測は行われていました。その後の技術革新によって、現在では数百mほどのメッシュで計算されています。そうやって出てきたのが、膨大な量のデータをどう扱うのかという問題です。現在はデータがあまりにも膨大なため、研究者が見たい現象が見えにくくなっています。そうした問題を解決してくれるのがAIです。膨大な量のデータから研究者が見たい現象を抽出する、今後はその部分をAIが担うようになるだろうと考えています。

数値予測での予測の数はこれまでは10個ほどでした。最近その数を100まで増やして実験しています。100の予測結果が出てきたとき、そのなかにはよく予測できているものも、あまりよく予測できていないものも混在しています。AIを用いて、よくない予測を除いて、よい予測だけを抽出するようなことも可能になるのではないかと考えています。

AIへの取り組みは始めたばかりで、わが国が掲げる第5期科学技術基本計画（Society 5.0）に貢献していきたいです。

■「フューチャー・アース」との関わり

——アプリケーションラボでは「フューチャー・アース」というプログラムにも関わっていますね。フューチャー・アースとは、

どのようなものなのでしょう。

ベヘラ：フューチャー・アースは、地球環境に関連する国際的な研究プログラムで、国連開発計画が掲げる持続可能な開発目標（SDGs）に貢献しています。私たちが研究しているような気候や海洋などを含む自然科学の側面と、人々の生活や健康などを取り扱う社会科学の側面を併せ持ったプログラムです。

フューチャー・アースのもとで、ヨーロッパやアフリカ、アジアなど地域ごとにそれぞれの活動があります。アジアのフューチャー・アースに貢献している活動の1つとして、SIMSEA（Sustainability Initiative in the Marginal Seas of South and East Asia：南および東アジアの縁辺海の持続可能性イニシアチブ）があります。アプリケーションラボでは、気候や海洋の予測研究を通して、SIMSEAの活動に深く関わっています。

たとえば、SIMSEAの研究の1つとして、高知県南西部にある宿毛湾における海況予測を、海洋・大気環境変動予測応用グループで行っています。宿毛湾では、200mほどの細かいスケールで海の流れや水温を毎時間予測しており、その情報はウェブサイトを通じて地元の関係者に配信しています。

■アプリケーションラボの今後

——アプリケーションラボでは今後、どのように研究を進めていくのでしょうか。

ベヘラ：研究の社会への応用をもっと加速させたいですね。エネルギーや消費電力、水の管理などといったことにもどんどんチャレンジしていきたいと思います。



季節ウォッチ

SINTEX-F季節予測システムの予測結果を用いて、これから先の季節に予測される現象を解説する一般向けのウェブページ。
<http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/climate/>



黒潮親潮ウォッチ

JCOPEによる予測実験と、関連するさまざまな話題を紹介する一般向けのウェブページ。
<http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/kowatch/>

14〜15ページでは南アフリカのマラリアに関するプロジェクトを紹介しました。気候変動予測のシステムは、医療関係以外にも、農業などほかの分野にも拡大させることが可能です。今後はそういったプロジェクトも立ち上げていきたいと考えています。

JAMSTECは国立研究開発法人で、国民の税金を使って研究をさせていただいています。研究内容をきちんと目に見えるかたちで社会に発信することは義務だと考えています。今後もウェブサイトを通じて、これまで以上に予測情報を提供していこうと思っています。また、現在アプリケーションラボのウェブサイトには、「季節ウォッチ」や「黒潮親潮ウォッチ」などの記事を掲載していますが、そういうものを通して、一般の人たちへの啓発活動も行っていきたいですね。

それらのウェブサイトを一般の人により見やすく、より分かりやすくしていく一方で、AIの技術を使った研究など、最新情報も載せていきたいと考えています。 **BE**

アプリケーションラボのメンバー



ジンベエザメは成長すると全長12mを超える世界最大の魚だ。この巨大な魚が、鹿児島県では海岸沿いの道から見えるほどの距離までやって来る。いおワールドかごしま水族館は、鹿児島県をいろいろな人たちに知ってもらおうのがコンセプトの1つ。そこでジンベエザメの展示を決めた。

ただし、水族館最大の水槽の大きさは幅24m、奥行き13m、高さ5m。この水槽で気持ちよく過ごせる魚のサイズは、全長5mくらいまでだ。そこで水族館では、地元の定置網にかかった4mくらいのジンベエザメを入手し、2〜3年たって全長5mほどになったら再び海へ帰す「かごしま方式」という展示方法を2000年から続けてきた。

ジンベエザメの名前は代々「ユウユウ」を継承する。2015年の夏にやって来たユウユウは7代目だ。

7代目から健康管理強化として身体測定のほか血液検査も導入した。4mはジンベエザメとしては小さい方といっても、相当な大きさであることは間違いない。身体測定はジンベエザメに巻き尺を当てて直接測る。測定のために、まずは7代目を訓練した。ジンベエザメが餌を食べるときには立ち泳ぎをする習性を利用し、ターゲットとなる白いプラスチック板を見せたら立ち泳ぎをするように、またダイバーの接近に慣れるように練習を重ねた。わずか1ヵ月のうちに手順を覚え、白いプラスチック板を見ただけで立ち泳ぎを始めた。採血も問題なくできるようになった。ずいぶん学習能力が高いな。そう思った。

血液の成分分析や身体測定の結果から、体調や栄養素と成長の関係などが数値で分かるようになった。まだ1例だけだが、これからのジンベエザメ飼育にとって貴重なデータだ。7代目の残した大きな財産となった。

全長が5m近くになり、いよいよ放流のときを迎え、7代目を野生に返すための準備を始めたのは2017年8月17日のことだ。水族館からトラックで運び出し、港の沖に設置したいけすに放す。ここで海での生活に慣れさせるのだ。いけすに連れてきたばかりのころは色白だった7代目が、次第に野生のジンベエザメ同様に色黒にたくましく見えてきたころ、いよいよ放流となった。輸送容器に入れ、いけすから2時間ほど沖合まで曳航し、ユウユウを放流した。

7代目にはビデオロガー、データロガー、ポップアップアーカイバルタグといった行動記録計が付けられた。ビデオロガーは、7代目の放流で初めて撮影に成功したものだ。放流4日後に切り離され回収されたビデオロガーには、海面近くで口を大きく開け、小型プランクトンを食べている様子が写っていた。ときには大型魚に寄り付く習性のあるコガネシマア

ジの幼魚が並走し、またときにはシイラやキハダの幼魚と出会いながら、大海原を悠々と泳ぐ様子を見せていた。

潮目に差し掛かると、周囲にプラスチックなどのごみの浮遊物が映し出された。餌と見間違えて食べるのではないかとヒヤヒヤしながら見守ったが、きちんと選り分けていた。その姿を見て、ああ、海の環境にも慣れたんだ。先代たちと同じように、7代目も海へと戻れたのだと実感した。

BE

取材協力：土田洋之／いおワールドかごしま水族館 飼育員



飼育試験用に準備した個体が放流されたときの姿。2016年8月8日。右手奥の長方形のものがジンベエザメをいけすから放流場所まで運ぶための容器。右の腹びれ付近に付いているオレンジ色のものがデータロガー。



7代目ユウユウが大海原へと進んでいく。回収されたデータロガーからは、一番深くて水深354m、水温10.4℃のところまで潜り、4日の間、約70%を海面付近で過ごしていたことが分かった。日中は浅い海、深い海を繰り返すV字形の遊泳を行い、夜は水深100m付近に頻りに潜るという日周のリズムを持っていた。



データロガー。姿勢や遊泳速度、体の振動、滞在深度や経験水温が記録される。4日後に自動的に切り離されて回収された7代目のデータロガーには、野生のジンベエザメと同一ような行動パターンが記録されていた。一緒に付けられたポップアップアーカイバルタグは、放流から8ヵ月後に切り離されて海面に浮上し、それまでの回遊経路や滞在深度、経験水温などの情報を人工衛星経由で送信する。

本調査は公益社団法人日本動物園水族館協会の野生動物保護基金助成を受け、2年継続事業として実施されました。

◆ **Information:** いおワールドかごしま水族館
〒892-0814 鹿児島県鹿児島市本港新町3-1
TEL 099-226-2233
URL <http://ioworld.jp/>

私がIODPで解きたい謎

志賀義弘

地球深部探査センター
技術部 技術第1グループ
技術副主幹

しが・よしひろ。1968年、福島県生まれ。
2002年よりJAMSTECへ出向。2006年よりJAMSTEC地球深部探査センター IODP推進室。2011年より現職。

保守整備によって「ちきゅう」の安全な運航を支える

地球深部掘削船「ちきゅう」は、海底下数kmにある巨大地震発生域への大深度掘削を可能にする世界初のライザー式科学掘削船である。

2005年からIODP（統合国際深海掘削計画、2013年より国際深海科学掘削計画）の主力船として活躍している。

「ちきゅう」の安全で効率的な運航を支える保守整備の様子を、地球深部探査センター（CDEX）技術部 技術第1グループ 技術副主幹の志賀義弘さんに聞いた。

中間検査中の「ちきゅう」と志賀義弘さん。
渠底（ドライドックの底）にて。2017年10月。

「ちきゅう」のデータベース構築のためにJAMSTECに

——「ちきゅう」の運用を担うCDEXの技術部に所属されています。どのような仕事をしているのでしょうか。

志賀：「ちきゅう」の保守整備を担当しています。「ちきゅう」には、さまざまな機器が搭載されています。壊れた機器を修理したり、古くなった機器を交換したりするのが、主な仕事です。そうした保守整備は、「ちきゅう」の運用業務を委託している日本マントル・クエスト（株）と協力しながら行っています。

——「ちきゅう」の保守整備には、いつから携わっているのですか。

志賀：保守整備の担当は2011年4月からです。「ちきゅう」には2002年から携わっています。私は以前、コンピュータシステムの会社で石油掘削に関わるデータを管理するデータベースをつくっていました。「ちきゅう」用のデータベースをつくるために、海洋研究開発機構（JAMSTEC）に出向してきたのです。

「ちきゅう」は1999年から基本設計が始まり、2001年4月に岡山県の三井造船（株）玉野事業所で建造が開始されました。

「ちきゅう」と命名されたのは、その年の6月です。そして2002年1月に船体部が完成して進水式が行われ、続いて機器の設置が始まりました。私がJAMSTECに来たのは、ちょうどそのころです。正直にいうと、JAMSTECの存在を知りませんでした。——データベースの構築で大変だったのは、どのようなことでしたか。

志賀：JAMSTECはいくつもの研究船を建造し、運用しています。ほかの研究船にも採取した試料やデータを管理するデータベースがありますから、それを



2017年10～11月に行われた中間検査での志賀さん。アンカーチェーンはすべて巻き出し、点検を行う（上）。アジマススラスタは船体の方向を360度変えることができる推進装置で、6基搭載されている（左）。志賀さんは「ちきゅう」の機器のうち特にエンジンとスラスタの保守整備を担当。右は、1日の作業前の打ち合わせの様子（中央が志賀さん）。

参考につくればいいのか、と思われるかもしれません。しかし、「ちきゅう」とほかの研究船では扱う試料が違います。「ちきゅう」以外の研究船で扱う試料は、主に海水です。堆積物や岩石も採取しますが、海底より上の試料です。一方「ちきゅう」は、海底下を掘削してコアと呼ばれる地質試料を採取します。扱う試料が違うので、必要なデータベースの項目や構造も変わり、ほかの研究船のデータベースを利用することはできないのです。また、科学研究のための掘削は、それまで私が関わっていた石油掘削とは違う点も多々あります。どういうデータベースが必要かを研究者から聞くところから始めなければなりませんでした。IODPでアメリカが運用している掘削船「ジョイデス・レゾリューション」のデータベースも参考にさせていただきました。

苦労して一生懸命つくったものの、研究者からは使いづらい、遅いなど、

いろいろいわれましたね。でも、いまでも使われているということは、いいデータベースだといえるのではないのでしょうか。

デリックのない「ちきゅう」にも乗船

——「ちきゅう」に乗船することもあるのですか。

志賀：「ちきゅう」は、船体部が完成して航海機器が取り付けられた後、2003年春に長崎県の三菱重工業（株）長崎造船所香焼工場に移されました。岡山県玉野から長崎に移される時、私も乗船しています。掘削関連の機器は長崎で取り付けられたので、まだデリック（掘削やぐら）がない状態でした。いまから思うと、貴重な体験ですね。

「ちきゅう」は、長崎で掘削関連の機器が取り付けられた後、全体の性能を確認する海上運転が行われ、2005年7月にJAMSTECに引き渡されました。運用

が始まると、データベースや船内ネットワークを利用する乗船研究者のサポートもするようになりました。そのため、2011年に保守整備の担当になるまでは、ほとんどすべての研究航海に乗船していました。現在は、検査後の試験航海に短期間乗船する程度です。

——ネットワークやデータベースのトラブルは多いのですか。

志賀：運用開始から間もないころは、いろいろなトラブルが起きました。「ちきゅう」での掘削は24時間行われていて、乗船研究者は12時間ずつ交代制で働きます。研究者ではない私のようなスタッフは午前6時から午後6時のシフトで働くことが多いのですが、ネットワークやデータベースに何か問題が発生すれば、寝ているときでも容赦なく起こされます。そんな使い方をするからだよ、と心の中かで思うこともありましたが、とにかく解決しないといけない。淡々と作業して直す。その繰り返しです。

「ちきゅう」の保守整備とは

——保守管理の担当になったとき、どのように感じましたか。

志賀：私は、大学で電子工学を学び、コンピュータエンジニアとして就職し、JAMSTECに出向で来ました。しばらくしてJAMSTECの職員となったのですが、まさか船の保守整備をやるようになるとは、つゆほども思っていませんでした。私と船のつながりは、強いていえば実家が漁師だったということだけ。「ちきゅう」に何回も乗っているとはいえ、航海機器の多くは普段は人が入らないところ、見えないところに置いてありますから、知らないことばかりです。船や航海機器について学ばせてもらうことから始めました。

——保守整備はどのくらいの間隔で行うのでしょうか。

志賀：航海を終えて着岸するたびに、保守整備を行います。安全に航海するために、毎回の保守整備は不可欠です。それとは別に、自動車と同じように船にも定期的な検査が法律で義務付けられています。1年ごとの年次検査、5年ごとの定期検査、そして定期検査と定期検査の間に行う中間検査があります。船の構造、設備、性能などを検査し、基準

に適合した船であることを保証する船級協会という組織があり、「ちきゅう」は日本海事協会に所属しています。定期検査などの際には、日本海事協会の検査官が来て、検査します。

それらの検査に合わせて、さまざまな点検、整備、改良工事を行います。前回の定期検査は2015年でした。そして今回、2017年10月から長崎県の佐世保重工業(株)佐世保造船所で、船底検査と設備工事など中間検査の一部を行いました。

中間検査や定期検査ではドックで水を抜き船底の整備も

——年次検査や中間検査の主な項目は？

志賀：年次検査の対象は安全設備が中心です。具体的には、防火ダンパーや消火器、救命艇、遭難した際に発信されるGMDSSという無線通信システムなどです。

中間検査では、年次検査の項目に船底の検査が加わります。船底を見るためには、ドライドックに船を入れてドック内の水を抜く必要があります。2〜3年たつと、船底には貝が付着して塗装もボロボロになっています。金属の粉や砂を混ぜた水を吹き付けて貝などを除去した後、塗料を塗り直します。船体に書かれている「ちきゅう」という船名もそのたびに書き直しています。

——定期検査についても教えてください。

志賀：船全体の保守整備を行うので、非常に大掛かりになります。エンジンとスラスタも、分解して詳細に検査する開放点検を行います。「ちきゅう」は主エンジン6基と補助エンジン2基を搭載しています。エンジンは4,000時間、8,000時間、1万6000時間ごとに部品を交換しなければいけないと決められています。そこで、各エンジンを計画的に組み合わせて使い、開放検査に合わせてタイミングよく部品を交換できるようにしています。

開放検査で普段開けないところを開け、分解することによって壊れることもあります。「ちきゅう」にはバックアップの掘削船がありませんから、「ちきゅう」が使えなくなれば掘削航海の計画自体が止まってしまいます。エンジンと



2015年の定期検査でドライドックに入った「ちきゅう」(左)。右は塗料を塗り直した後の「ちきゅう」の文字が、まだ入っていない。



船底の洗浄作業の様子と、船底に付着した貝など(右上)。

スラスタの開放点検の前は、やはり不安ですね。分解してすべての部品に問題がない、あるいは修理を行えば安全に航海できる場合は、ほっとします。

「ちきゅう」にはデリックなど掘削に関連した部分があります。掘削部は、アメリカ石油協会(API)の規格に基づいてつくられており、5年ごとにAPIの認定を受けた会社が整備、検査を行うことが義務付けられています。ただし、掘削部の整備、検査のためだけに時間を取ることは難しい。そこで、5年ごとの定期検査に合わせて、掘削部の整備、検査も行っています。具体的には、デリックにある滑車を下ろして非破壊検査をしたり、クレーンのシリンダーを交換したり、海底を掘り進んでいくドリルパイプを回すトップドライブを整備したりします。

——検査はどのくらいの期間がかかるのでしょうか。

志賀：年次検査で1ヵ月、中間検査は2ヵ月、定期検査は3ヵ月くらいかかります。私たちとしては、安全な航海のために保守整備の時間をしっかり取りたい。一方で運用の担当者や研究者たちは、航海に使える時間をできるだけ長くしたい。両者の要望は、どうしても相反します。もちろん整備ばかりしていても意味がありません。整備するのは掘削に使うためですから、うまくバランスが取れるように調整するのも、私たちの仕事です。

トラブルの原因を明らかにし、同じトラブルを起こさない

——「ちきゅう」は2017年で就航13年目です。年々、保守整備は大変になるのでしょうか。



定期検査におけるエンジンの開放点検の様子。部品を取り外し、補修や交換を行う。



掘削部の整備の様子。パイプをつり上げるクレーンや海中に下ろしたパイプを支えるライザーテンショナーのシリンダーは外して整備・交換される(左)。デリックの最上部にあるクラウン・ブロック(固定滑車)も下ろして整備をする(右)。

志賀：「ちきゅう」として就航してから13年目ですが、船体ができた後に、3年ほどかけて掘削部がつくられました。つまり、船としてかたちになってから15年以上たっています。船の寿命はおおよそ30年といわれます。建造から年月がたつと、部品がなくなって直せない機器が出てきます。この機器はいつまで部品が提供できるかを表にしてあり、部品がなくなる前に周辺機器を含めて新しいものに交換するようにしています。とはいえ、故障などのトラブルは突然起きるので、計画通りにはなかなかいきませんが。

——これまでも、さまざまなトラブルがあったのでしょうか。

志賀：詳しくはお話しできませんが、トラブルはたくさんあります。トラブルが発生したら、応急処置を施したり修理をしたりして正常に運航できるよう

にする。その繰り返しですが、重要なのは、なぜトラブルが発生したのかを明らかにすることです。原因が分らないと、同じトラブルを繰り返してしまいます。修理をするだけではなく、原因を明らかにして対策を取ることが重要です。メーカーで分からないことがあれば、外部の専門家に検証してもらうこともあります。トラブルは必ずあるので、同じ原因のトラブルをなくすようにしています。

ヘリデッキを新しい国際規格に合わせて改修

——2017年の中間検査では大きな改修工事を行ったそうですね。

志賀：ヘリデッキの改修工事を行いました。「ちきゅう」の建造後に定められた新しい国際規格に合うように、ライトの



2017年の中間検査にて、ヘリデッキ改修後の点灯試験の様子。国際規格に適合するように改修を行った。

かたちや位置を変えました。火災検知システムも入れ替えました。火災検知システムはすべての部屋に設置されているので、とても大掛かりな工事になります。しかも火災関係の安全設備を替えるときには、船をデッドシップにしないとイケないのです。

——デッドシップとは？

志賀：船がドックに入っているときも、船員さんたちが船内で暮らしています。しかし、火災検知システムの交換中は動力がない状態、つまり主機、推進軸系、ボイラー、補機が作動していない状態にしなければなりません。また、万一火災が起きたら逃げ遅れてしまいますから、全員が下船します。それをデッドシップといいます。直訳すると、死に船ですね。

2015年の定期検査のときもデッドシップにしました。そのときは食堂の改装をしたのです。食堂が使えないと船に住めませんから。次の2020年の定期検査では空調システムの入れ替えを計画しています。そのときも、デッドシップにする必要があります。

——「ちきゅう」の保守整備という仕事の魅力や面白さはどのような点ですか。

志賀：難しい質問だなぁ。楽しいと思ったことはないですね。常に不安との闘い。研究者の皆さんはそれぞれ研究の目的があつて「ちきゅう」に乗船する。その目的を達成できるように、「ちきゅう」を完全な状態で動かさなければいけない。そのために、私たちは保守整備を淡々とやるだけです。保守整備の仕事は、「ちきゅう」がある限り続きます。



マンガン酸化細菌を利用して レアメタルを回収する

海洋・地球・生命の統合的理解に挑む海洋研究開発機構 (JAMSTEC) では、その研究活動を通じて、社会に貢献するイノベーションの種 (シーズ) が生み出されている。海底下に生息する未知の微生物の研究を行っているJAMSTECの井町寛之さんは広島大学と共同研究を行い、独自技術を使ってマンガン酸化細菌を培養して、工業排水などからレアメタルを回収する技術を開発した。さらに、海底資源である鉄マンガングラストの成因を研究しているJAMSTECの加藤真悟さんや菊池早希子さんと協力してマンガン酸化細菌の生態を解明して、レアメタルの回収効率を向上させようとしている。

取材協力

井町寛之

深海・地殻内生物圏研究分野
海底資源研究開発センター 地球生命工学研究グループ
主任研究員

加藤真悟

次世代海洋資源調査技術研究開発プロジェクトチーム
成因研究ユニット
海底資源研究開発センター 資源成因研究グループ
特任研究員

菊池早希子

次世代海洋資源調査技術研究開発プロジェクトチーム
成因研究ユニット
海底資源研究開発センター 資源成因研究グループ
ポストドクトラル研究員

DHSリアクターで培養された
微生物群とバイオマンガン酸化物

DHSリアクターでマンガン酸化細菌が好む条件で増殖させた微生物群が緑色で光っている。その微生物群に取り囲まれた黒い部分にバイオマンガン酸化物がつくられている。この微生物群のなかにマンガン酸化細菌がいることは間違いないが、特定できていない。

微生物由来のマンガン酸化物に レアメタルを吸着させる

コバルト、ニッケルやプラチナ（白金）などのレアメタルは、産業を支える希少な金属資源だ。21世紀の資源問題を解決するには、廃家電、使用済み蓄電池、めっき加工や鉱山などで発生する排水などから、レアメタルを回収する新しい技術の開発が求められている。既存の回収技術は塩酸や硝酸などの危険物を用いたり、たくさんのエネルギーやコストがかかったりするため、環境に優しく低エネルギー・低コストの回収技術が求められているのだ。

レアメタル価格が高騰した2010年末、井町寛之さんは広島大学の大橋晶良 教授たちと共に、微生物を利用してレアメタルを回収する新技術の開発を始めた。そのために、スポンジに微生物を付着させて上から水を垂らす「下向流懸垂型スポンジ (DHS) リアクター」を利用する。

「DHSリアクターは、長岡技術科学大学で大橋教授が原田秀樹 教授と共に、途上国向けに、微生物で下水を処理するために開発した装置です」。そう説明する井町さんは、原田・大橋両教授の研究室で学んで工学の学位を取得し、その後、助教として研究を続けた。

そして2006年、JAMSTECへ移った井町さんは、海底下の微生物をDHSリアクターで培養する取り組みを始めた。「DHSリアクターは、培養皿などを用いる従来法では培養が難しい微生物でも培養することができるのです」と井町さん。

微生物を利用して、どのようにレアメタルを回収するのか。微生物のなかには、酵素を体外に出して、水や海水に溶けたマンガンイオンを酸化するマンガン酸化細菌が、複数の種類いることが知られている。それらのマンガン酸化細菌は、直径がナノ（10億分の1）メートルサイズの微粒子状のバイオマンガン酸化物をつくる。粒径が小さく単位体積あたりの表面積が大きいバイオマンガン酸化物は、人工マンガン酸化物に比べてレアメタルを吸着する能力に優れている。

井町さんたちは、DHSリアクターのスポンジでマンガン酸化細菌を増殖させてバイオマンガン酸化物をつくらせ、そこにレアメタルを含む水を通し、バイオマンガン酸化物に吸着させて回収する技術を開発することにした。

マンガン酸化細菌の集積培養に成功

マンガン酸化細菌だけを取り出して増殖させる技術は確立されていない。井町さんたちは、DHSリアクターのスポンジにさまざまな種類を含む微生物群を付け、マンガン酸化細菌が生育しやすい環境をつくって増殖させ、ほかの微生物の生育を抑える「集積培養」を行うことにした。

「自然界でマンガン酸化物ができていところは、有機物の濃度が低いことが知られています。有機物の濃度が高いところでは、ほかの微生物が優勢ですが、有機物の濃度が低い環境を実現すれば、マンガン酸化細菌を集積培養できるのではないかと考えました。そこで、活性汚泥あるいは海底堆積物に生息する多種類の微生物群をスポンジに付け、そこにマンガンイオン (Mn^{2+}) とともに、アンモニアやメタンを与えました。多くの微生物はそれらの物質を餌にすることができませんが、それらを餌にするアンモニア酸化菌あるいはメタン酸化菌は増殖して、体外に微量な有機物を放出します。こうして有機物の濃度が低い環境を実現することで、マンガン酸化細菌を集積培養することに成功しました」と井町さん。

広島大学とJAMSTECは、その手法を特許として共同出願した。しかしその手法だけでは、実用化には不十分だった。レアメタル回収に十分な量のバイオマンガン酸化物ができるのに、600日以上かかってしまうのだ。

その問題を解決するために、井町さんたちは、スポンジにあらかじめ人工マンガン酸化物を付着させることで、600日以上を14日ほどに短縮することに成功した。「培養実験をしていると、マンガン酸化物には多くの微生物の生育を抑える働きがあることが分かりました。ただし、マンガン酸化細菌は増殖できます。あらかじめ人工マンガン酸化物を付着させておくと、マンガン酸化細菌が効率よく増殖してバイオマンガン酸化物をつくり出すようになったのです。さらに、わざわざアンモニアやメタンを供給しないでも、下水処理に使った後の廃棄物である余剰汚泥を供給することで、マンガン酸化細菌を集積培養することができるようになりました」

あらかじめ人工マンガン酸化物を付着させて集積培養する手法も、広島大学とJAMSTECは特許として共同出願した。実用化には、ニッケルなら

ば、容量1m³のリアクターで1日あたり1kg以上を回収できる効率が必要だ。広島大学の大橋教授たちは、実験室レベルではその効率をすでに達成している。

微生物が鉄マンガンクラストをつくった!?

広島大学は淡水系、JAMSTECは海水系のDHSリアクターで実験を進めてきた。海水には総量としては膨大な量のレアメタルが含まれている。ただし濃度は非常に低い。そのような低濃度のレアメタルをバイオマンガン酸化物によって回収できる可能性がある。

実際に海底には、さまざまな種類のレアメタルを吸着した鉄マンガンクラストが見つっている。「鉄酸化物やマンガン酸化物はさまざまな元素を吸着する能力を持っていますが、吸着する元素の種類が異なります。鉄マンガンクラストは鉄とマンガン酸化物の凝集体として、コバルト、ニッケル、テルル、白金など多様な種類の元素を大量に吸着しています」と生物地球化学が専門の菊池早希子さんは解説する。

鉄マンガンクラストがどのようにできるのか、その成因を研究している加藤真悟さんや菊池さんたちJAMSTECの研究者は2017年、高知大学、茨城大学、筑波大学と共同で、房総半島の約350km

沖にある拓洋第3海山の水深1,500～5,500mの斜面に、鉄マンガンクラストの一種であるコバルトリッチクラストが広く厚く分布していることを確認した。

これまで鉄マンガンクラストの調査は主に、日本列島から南東に1,800kmほど離れた拓洋第5海山の水深1,100～5,500mの海底で行われてきた。その調査により成因モデルがつくられた。これまで鉄マンガンクラストは偶然に発見されることが多かったが、今回は、成因モデルから拓洋第3海山の斜面全体に厚い鉄マンガンクラスト（コバルトリッチクラスト）が存在していると予測して調査を行い、実際に確認して成因モデルが正しいことを立証したのだ。

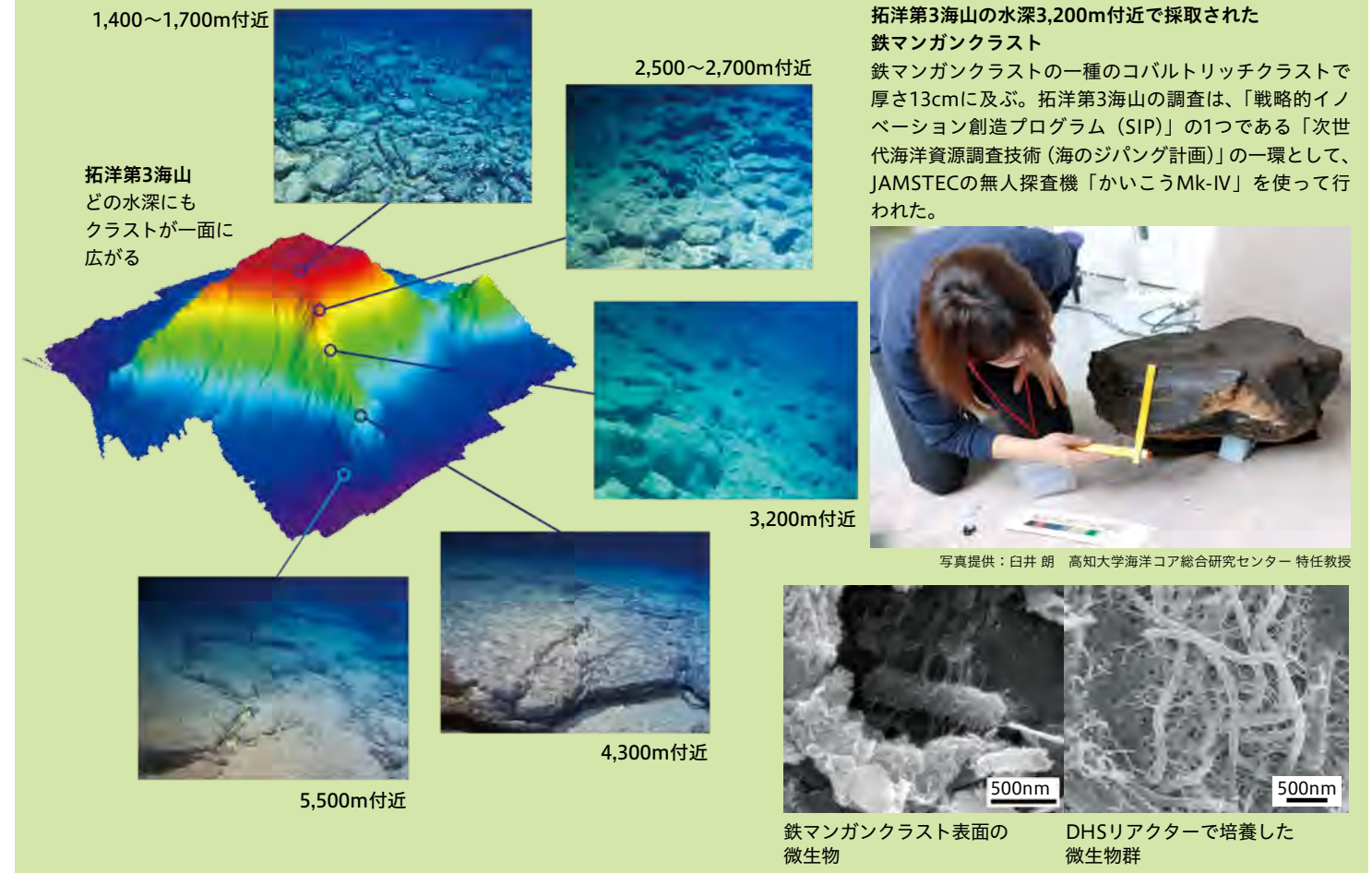
「ポイントは年代の古い斜面です」と加藤さんは説明する。「拓洋第3海山の斜面には厚さ13cmの鉄マンガンクラストも見つかりました。この厚さは北西太平洋で見つかった鉄マンガンクラストで最大級です。鉄マンガンクラストが数mm成長するのに100万年、10cmなら数千万年かかります。マリンスノーなどが降り積もる平らな海底では、鉄マンガンクラストは成長できません。それらが降り積もらない斜面で、しかも、これまで調査してきた拓洋第5海山よりも年代が古い海底を探したのでです」

鉄マンガンクラスト形成に関わるマンガン酸化細菌の生態を探索

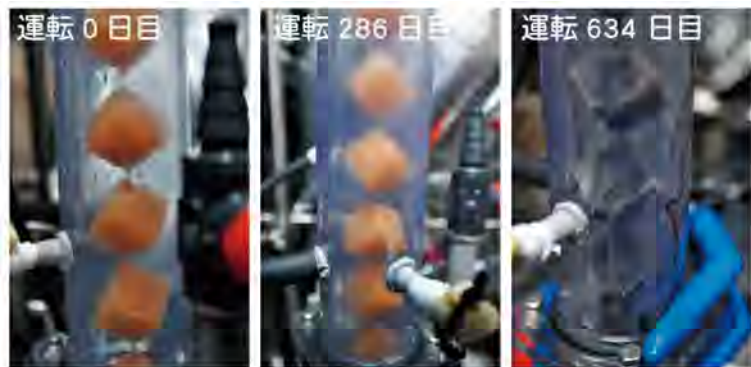
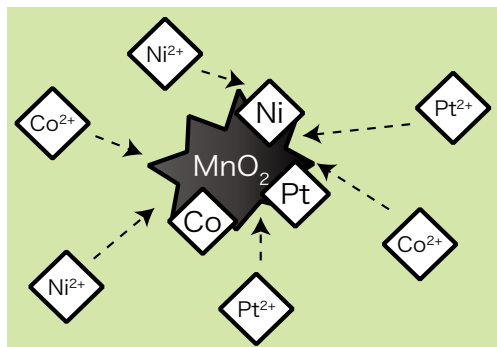
鉄マンガンクラストの成因にはまだ大きな謎が残されている、と微生物学が専門の加藤さんは指摘する。「大気や海洋における一般的な温度や水素イオン濃度（pH）では、水や海水に溶けたマンガニオンが無機的に酸化されるには膨大な時間がかかります。一方、生物がマンガニオンを酸化させる速度は、無機酸化速度の1万倍以上も速いといわれています。ですので、地球表層にあるマンガン酸化物の大半は、生物が関与してできたものだと考えられています。ただし、鉄マンガンクラストの形成にマンガン酸化細菌が関与している証拠は得られていません。鉄マンガンクラストに付着しているたくさんの種類の微生物群から、マンガン酸化細菌を特定できていないのです」

現在では、微生物群から遺伝子DNAを取り出し、その情報（塩基配列）を高速で解読する技術が進展している。そこからマンガンを酸化する酵素の遺伝子を見つけ出し、その遺伝子の持ち主が分かれば、マンガン酸化細菌を特定できる。しかし、それは容易ではないと加藤さんは続ける。

「そもそも、マンガン酸化菌がなぜマンガンを



バイオマンガン酸化物によるレアメタルの回収
マンガン酸化細菌がつくるバイオマンガン酸化物（MnO₂）は、コバルト（Co）やニッケル（Ni）、白金（Pt）など、さまざまな種類のレアメタルの吸着能力に優れている。



DHSリアクターによるバイオマンガン酸化物の形成

スポンジ部分でマンガン酸化細菌を集積培養して、バイオマンガン酸化物をつくらせる。最初に特許出願した手法では、レアメタル回収に十分な量のバイオマンガン酸化物ができてスポンジが真っ黒になるのに、600日以上かかった（写真右）。あらかじめ人工マンガン酸化物を付着させておく手法により、それを14日ほどに短縮することができた。

酸化するのか、その理由は実はまだはっきりと分かっていません。マンガンを酸化するとはまったく予想されていなかった納豆菌の近縁種にも、マンガン酸化細菌がいます。系統的にかなり離れた微生物が、進化の過程でそれぞれ独自に、マンガンを酸化する機能を獲得しているのです。いままでに知られている複数のマンガン酸化酵素の塩基配列を比べてみると、かなり異なります。そのため、遺伝情報だけから未知のマンガン酸化酵素の遺伝子を見つけ出し、その持ち主を特定することはとても難しいのです。私はいま、独自のアイデアで特定を進めているところです。もちろんそのアイデアは秘密です（笑）」

加藤さんや菊池さんは、拓洋第3海山で採取した鉄マンガンクラストに付着していた微生物群を、DHSリアクターで培養する実験を進めている。そこからマンガン酸化細菌を特定できれば、その生態を解明していく計画だ。

「誕生したばかりの初期地球の海洋や大気には酸素はなかったと考えられています。やがて光合成を行う微生物の誕生によって酸素が大気や海に放出されました。すると海中に溶けていた鉄イオンが酸化して海底に堆積して、巨大な縞状鉄鉱層を形成したと考えられています。そのような生命

と地球の共進化に興味を持って研究を進めています」と菊池さん。

加藤さんは、「鉄マンガンクラストも微生物がつくり出したものであることを証明して、微生物のすごさを示したいですね」と語る。

「これまで、海洋性のマンガン酸化細菌の研究はほとんど行われていません。どんな餌や環境が好きなのか、その生態が分かれば、DHSリアクターでさらに効率よくマンガン酸化細菌を集積培養してバイオマンガン酸化物をつくらせ、レアメタルの回収効率を向上させることができるでしょう。それにより、海水中の薄い濃度のレアメタルも効率よく回収して資源問題の解決に貢献したいと思っています」と井町さんは展望を語る。

地球や生命への好奇心を原動力にして、井町さんたちはイノベーションの種を芽吹かせようとしている。

BE

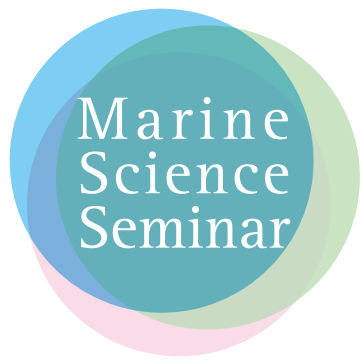
特許情報

- 金属の回収方法及び回収装置（特許第5736592号）
- マンガン酸化細菌の集積培養方法、バイオマンガン酸化物の生成方法、金属の回収方法及び微生物群集（特開2016-168029）

【問い合わせ先】
JAMSTEC イノベーション推進課
chizai@jamstec.go.jp

【JAMSTECシーズ集】
JAMSTECの最先端の研究や技術開発から生まれた、さまざまな分野に及ぶ特許を下記のWEBサイトで紹介しています。





真核微生物の研究から「燃えているような充実感」を得る

地球情報館公開セミナー 第205回（2016年12月17日開催）

矢吹彬憲 海洋生物多様性研究分野 研究員

カビとヒトは似ている！？

私の研究対象は真核微生物です。生物は、原核生物と真核生物に大別されます。原核生物は細胞内に核を持たず、生命の設計図であるDNAがむき出しの状態です。真核生物では、DNAは核のなかに収められています。私たちヒトは真核生物です。ヒトのようなたくさんの細胞から成る多細胞の真核生物に対して、単細胞の真核生物を真核微生物といいます。私は、真核微生物を材料にして真核生物にどう進化が起きて、どのように多様化していったのかを研究しています。

なぜ研究者をやっているのですか？と聞かれることがあります。「燃えているような充実感」を味わえるからです。これは『あしたのジョー』の主人公、矢吹ジョーの言葉です。矢吹つながりで、タイトルにも使わせていただきました。

私が真核微生物に興味を持ったのは、オピストコンツという生物群を知ったことがきっかけです。図1は、さまざまな真核生物が進化的にどのような関係にあるかを模式的に描いた系統樹です。オピストコンツには、真菌、ヌクレアリア、襟鞭毛虫、イクチオスポリア、後生動物が含まれています。真菌はカビやキノコの仲間の総称、後生動物は多細胞の動物の総称です。ヒトも後生動物です。大学の講義でオピストコンツを知り、衝撃を受けました。カビとヒトはまったく似ていないではないか！と。

しかし、細胞骨格やミトコンドリアの内膜の構造、鞭毛の数などを見ると、オピストコンツのメンバーの細胞は、互いによく似ているのです。ヒトの細胞に鞭毛はない、と反論があるかもしれませんが、ところが、ヒトの精子と原始的な真菌であるツボカビの遊走子は、ほぼ同じかた

ちをしています。個体の姿はまったく違いますが、ある時期の細胞はよく似ているのです。共通した遺伝子の特徴があることも知られています。これらの理由から、後生動物と真菌が近縁であり同じ生物群に入ることは間違いないとされています。こうしたことを知り、真核生物の進化はとても面白いと思いました。

細胞の構造を見ると進化が分かる

カビとヒトは、似ていないようで似ています。逆に、似ているようで似ていない生物もあります。たとえばノリとワカメです。ノリは紅色植物門紅藻亜門ウシケノリ綱アマノリ属、ワカメは不等毛植物門褐藻綱ワカメ属です。どちらも海藻で一見すると姿もよく似ているように思えますが、系統的には近縁ではありません（図1）。細胞の構造がまったく違うのです（図2）。ノリの細胞では、葉緑体は2重膜に包まれ細胞内に独立して存在しています。ミトコンドリアの内膜は板状です。一方、ワカメの細胞では、葉緑体は4重膜に覆われ最も外側の膜は小胞体に連結し、ミトコンドリアの内膜は管状です。こうした違いは、ノリとワカメの誕生の道筋の違いによるものです。

ノリもワカメも光合成を行います。光合成を行う生物は葉緑体を持っています。葉緑体はもともとシアノバクテリアという単細胞の原核生物でした。十数億年前に生息していた真核微生物はシアノバクテリアを食べていました。食べられたシアノバクテリアは通常消化されてしまいましたが、消化されずに共生体として機能するものが現れ、葉緑体になったとされています。最初にシアノバクテリアを取り込んだ真核微生物の直接の子

皆さんは、海洋研究開発機構（JAMSTEC）で働く研究者にどのようなイメージをお持ちでしょうか？新しい知見で人類の抱える問題を解決したいと思っている志の高い人たちでしょうか？自分の好きなことをしているストレスフリーの気楽な人たちでしょうか？私の研究である「真核微生物を材料にした真核細胞の進化」に関する成果を紹介しながら、私自身がどのようなことに悩み、そして興奮し充実感を得てきたかを語ることで、研究者、そしてJAMSTECを身近に感じていただければと思っています。



やぶき・あきのり。1983年、神奈川県生まれ。金沢大学理学部生物学科卒業。筑波大学大学院生命環境科学研究科構造生物学専攻博士課程修了。博士（理学）。日本学術振興会特別研究員(PD)を経て、2013年より現職。専門は進化原生生物学。新規原生生物の探索とその系統分類学的研究および真核生物初期進化の解明に取り組んでいる。

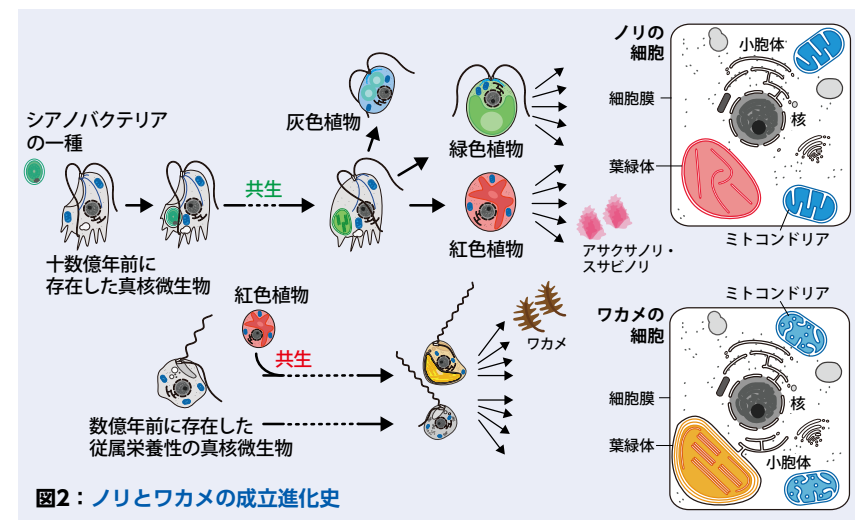
ば共生になります。寄生と共生の境界が分かれば、寄生虫によって引き起こされる病気の予防や治療にも役立つでしょう。そのなかで発見されたユニークな特徴、たとえば特殊な代謝経路や遺伝子発現の仕組みなどが理解できれば、微生物のより効果的な応用利用につながる可能性も開けます。

ですが、一番の理由は自分が知りたいからです。謎を最初に解明して歴史に名を刻みたい、みんなからすごい！といわれたい、という邪な気持ちや承認欲求もないわけではありません。しかしより単純に、不思議だ、知りたい、という気持ちに支えられて研究をしています。

ハインパクトな新種を探す

生物の近縁関係を知るには、分子系統解析を行います。さまざまな生物の遺伝子の塩基配列を読み取り、比較します。遺伝子配列が似ているほどその生物同士は近縁であると考えられ、その情報をもとに近縁な生物同士が線で結ばれた分子系統樹をつくることができます。線が分かれる位置から分岐の順序も分かり、比較する生物と遺伝子の数を増やしていけば、より詳細な分子系統樹になります。

私は、新しい生物を見つけて解析することで分子系統樹に新たな枝を追加する、という研究をしています。新たな枝が加わることで、分岐関係が不明瞭だった部分が明瞭になる場合があります。近縁関係が不明であった2つの生物群の中間に位置する生物が加わることで、3つが互いに近縁であることがはっきりしたりするのです。そのような生物は進化を理解する上で有用な情報を持



孫とされているのが、灰色植物、緑色植物、そしてノリを含む紅色植物です。そのためノリの葉緑体は、シアノバクテリアの細胞膜とそれを取り込んだ真核微生物の食胞に由来する膜、合計2枚の膜に覆われているのです（図2上）。

一方、数億年前に生息していた真核微生物は紅色植物を食べていました。食べられた紅色植物が真核微生物のなかで共生し、葉緑体として機能するようになったのです。紅色植物を取り込んだ真核微生物が多様化し、不等毛植物が生まれ、ワカメが誕生しました。そのためワカメの葉緑体は、紅色植物の葉緑体を覆っていた2重膜に、紅色植物の細胞膜とそれを取り込んだ真核微生物の食胞に由来する膜が加わり、合計4枚の膜に覆われているのです（図2下）。

このように、細胞の構造から生物がどのように進化してきたかが分かります。

真核生物の進化を研究する理由

葉緑体ができただけの基本的な流れは正し

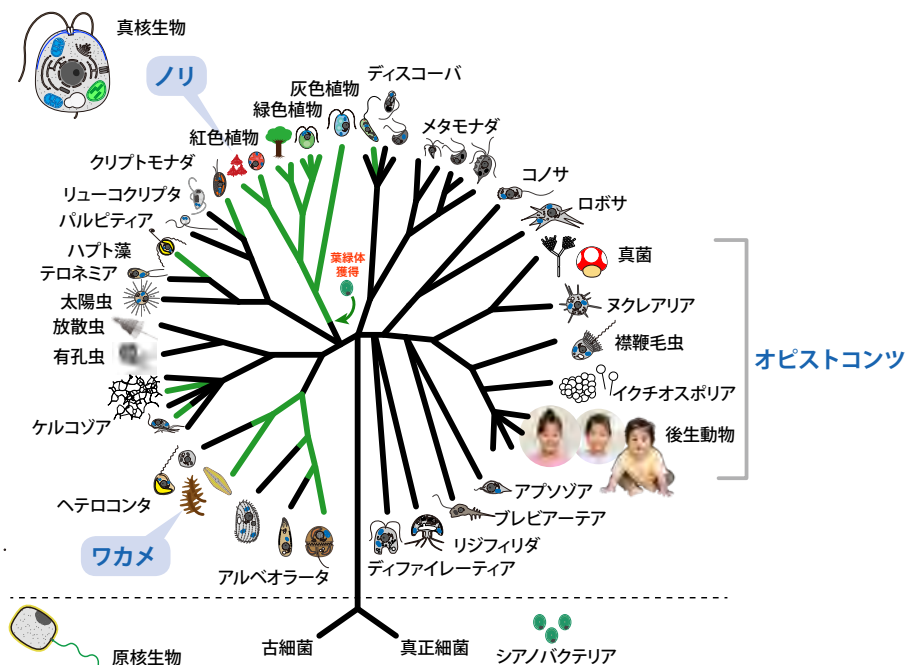
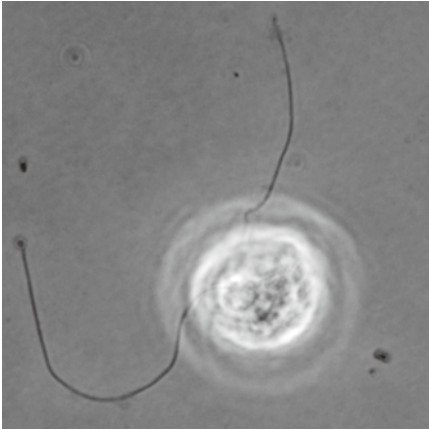


図1：真核生物の系統樹

図5：ツクバモナス
(*Tsukubamonas globosa*)
筑波大学の池で発見し、新種として記載した真核微生物の光学顕微鏡写真。2本の鞭毛を持つ。



っている場合が多く、ミッシングリンク生物として発見が期待されています。

私はそんなハイインパクトな真核微生物の探索を続けてきました。そして2006年、太平洋のパラオで見つけたのです(図3)。それは知られている真核微生物とは違う姿をしていたので新種に違いないと考え、詳しく調べました。

その真核微生物は、葉緑体はないものの、細胞骨格が原始的な緑色植物に似ていました。6個の遺伝子を使った分子系統解析でも緑色植物と近縁であることが示唆されました。最初にシアノバクテリアを取り込んだ真核微生物の生き残りか

もしれないと思い、まずはバルピトモナス(*Palpitomonas bilix*)と名付けて論文発表しました。その後で遺伝子の数を増やして分子系統解析を行い、大々的に発表しようともくろんでいました。しかし現実はそんなに甘くありませんでした。

157個の遺伝子を用いて系統的位置を解析すると、バルピトモナスはクリプチスタというグループのなかで最も祖先的な生物であることが判明しました(図4)。シアノバクテリアを共生させた最初の真核微生物ではなかった。でも1属1種で1亜門を構成している生物でした。ヒトは、脊椎動物門哺乳綱霊長目ヒト科ヒト属ヒ

ト種です。哺乳綱より上の階級の新種です。今世紀最大の発見とはいえませんが、バルピトモナスの発見は気持ちを高ぶらせてくれる成果でした。

最近、スイスの研究者が250個の遺伝子を使って真核生物全体の分子系統解析を行いました。その結果、バルピトモナスを含むクリプチスタは、最初にシアノバクテリアを取り込んだ真核微生物と近縁か、その子孫である可能性が示唆されています。バルピトモナスのゲノムを解析することで、葉緑体そして植物細胞の成立に関する知見が得られるかもしれません。引き続き研究を進めています。

筑波大学の池からも新種を発見

茨城県にある筑波大学の池からも気持ちが高ぶるような真核微生物が見つかりました。鞭毛が2本あり、それを動かしてグルグル回っていました(図5)。これまで見たことがない細胞運動なので、新種の期待が高まりました。

細胞骨格を調べると、エクスカバータという生物群に属することが分かりました。エクスカバータには細胞に捕食のための溝があり、真核生物の祖先は同様の構造を持っていたと考えられています。エクスカバータの新種は、最も祖先的な真核生物である可能性があり、そこから真核細胞の成立、進化に通じる知見の獲得が期待できます。

早速、分子系統解析を行いました。すると、その生物はエクスカバータのなかで最も祖先的な可能性があるディスコーバというグループに入りました。期待が高まります。さらに細胞内にあるミトコンドリアのゲノムを解析しました。ミトコンドリアは、 α プロテオバクテリ

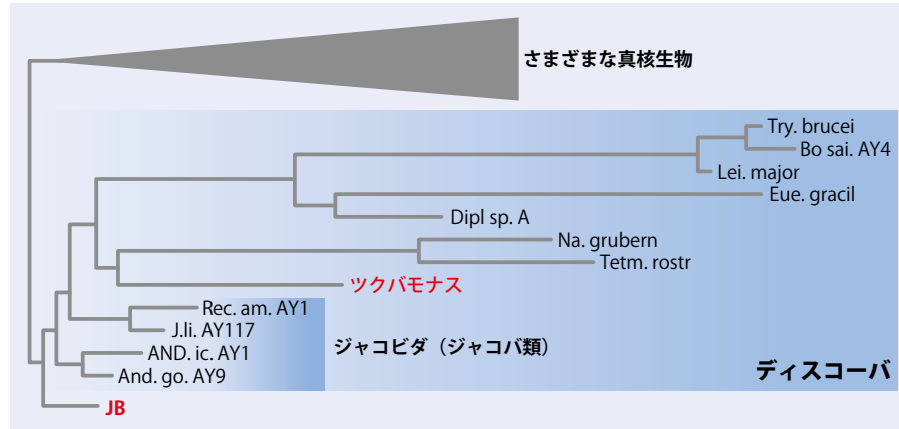


図6：ツクバモナスとJBの分子系統樹上の位置

ツクバモナスはエクスカバータのなかで最も祖先的であるとされるディスコーバというグループに入るが、最も祖先的な真核微生物ではない。JBは、ディスコーバのなかで最も祖先的であるとされていたジャコバ類よりも祖先的な真核微生物であることが分かった。

です。数年後、最も祖先的な真核生物を発見！と発表できるかもしれません。

進化のメカニズム解明に挑む

生物進化のメカニズムの解明は、生物学における最重要問題です。ダーウィンが提唱した適者生存モデルでは、過酷な競争を勝ち抜いてきたものが生き残っていることになります。しかし、このモデルだけでは説明できないことがたくさんあります。どのようにして現在ある多様性が生じたのか、進化を駆動するほかのメカニズムはあるのか、その解明にも挑んでいます。

その研究では真核微生物のヘミスタシア(*Hemistasia phaeocysticola*)に注目しています。この生物は1900年に記載された後、あまり研究がされていませんでした。私たちの分子系統解析によってディプロネマ綱に属するディプロネマ類の新系統であることが判明しました。ディプロネマ類は遺伝子の構造が最も複雑な生物群として知られています。通常、1個の遺伝子はつながった塩基配列としてゲノム上に存在しています。ところが、ディプロネマ類では1個の遺伝子が200塩基くらいずつに断片化し、ゲノム上でばらばらに存在しているのです。ヘミスタシアの遺伝子はさらに細かく、70塩基くらいずつに断片化していることが、私たちの解析から分かりました。

遺伝子部分のDNAはRNAに転写され、その情報をもとにアミノ酸が連なり、タンパク質がつくられます。遺伝子が細分化されてしまうと、転写された短いRNAをつなぎ合わせる必要があります。なぜディプロネマ類では断片化した遺伝子を持つのか、その進化的意義は

よく分かっていません。一方で、ディプロネマ類とヘミスタシアで遺伝子の断片化の程度が異なっているということは、そこに異なる進化圧があったことを示唆しています。おそらくヘミスタシアはより短いRNAを正確に連結する機能が備わっていると考えられます。その機能を明らかにすることで、この一見無駄に思われる仕組みが成立した背景と意味を理解できると思います。そこから、適者生存ではない、明確な優位性がなくても成立する進化プロセスのモデル化ができるのではないかと考えています。

研究者からのお願い

新しいものが見つかる则興奮して、でも大発見ではなかったとがっかりする。また興奮するものに出会って、大発見となり満たされる。さらによいものを見つきたいと頑張り、またがっかりしたり満たされたり。研究者はそんな日々を送っています。若い人たちにはぜひ、研究職を魅力のある職業の1つと考えていただきたいと思います。

生物の進化や多様化プロセスの解明といった研究は、それが分かったとしても人類の繁栄にはなかなか直結しません。しかし、すぐに役立つ研究だけでなく多様な研究があるからこそ、次につながる研究が生まれるのだと思います。基礎研究についても長く温かい目で見えていただけるとありがたいです。

私たちは、自分が知りたいことを研究して満足するだけでなく、その内容を皆さんに知ってもらい、すごい、面白いと共感していただきたいと思っています。これからも私たちの研究に興味を持っていただけると嬉しいです。

図3：バルピトモナス
(*Palpitomonas bilix*)

パラオで発見し、新種として記載した真核微生物。左は光学顕微鏡、右は電子顕微鏡による写真。光学顕微鏡は生きたままの姿を観察できる。電子顕微鏡を用いると細胞の構造などを詳しく観察することができる。

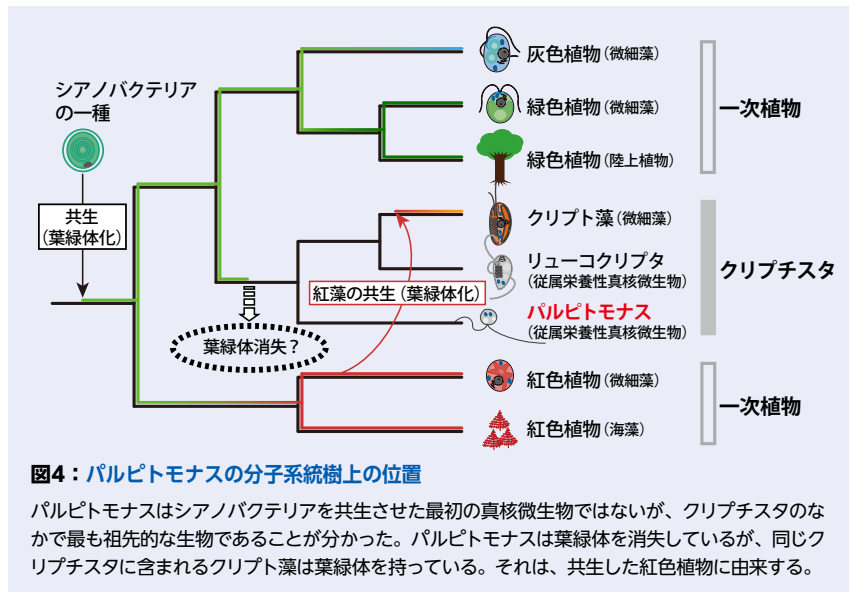
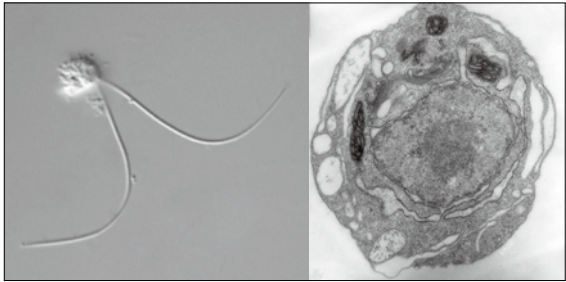


図4：バルピトモナスの分子系統樹上の位置

バルピトモナスはシアノバクテリアを共生させた最初の真核微生物ではないが、クリプチスタのなかで最も祖先的な生物であることが分かった。バルピトモナスは葉緑体を消失しているが、同じクリプチスタに含まれるクリプト藻は葉緑体を持っている。それは、共生した紅色植物に由来する。



第20回全国児童

「ハガキにかこう海洋の夢コンテスト」作品募集中！

JAMSTECでは、全国の小学生を対象としたコンテストを毎年開催しています。テーマは「海」についての「夢」！ハガキサイズの紙いっぱいに、絵やCGや文章で、海の夢の世界をかいてください。入賞者特典として研究船の体験乗船を予定しています。皆さんからのご応募をお待ちしています。

応募締め切り：

2018年1月22日（月）当日消印有効

詳しくは、JAMSTECのホームページをご覧ください。

賛助会（寄付）会員名簿 2017年11月30日現在

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

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

『Blue Earth』定期購読のご案内

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

1年度あたり6号発行の『Blue Earth』を定期的にお届けします。

■ 申し込み方法

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

■ 支払い方法

お申し込み後、振込案内をお送り致しますので、案内に従って当機構指定の銀行口座に振り込みをお願いします（振込手数料をご負担いただきます）。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

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2番地15

海洋研究開発機構 横須賀本部 広報部 広報課

TEL.046-867-9052

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（154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

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



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

国立研究開発法人海洋研究開発機構の事業所

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 沖縄県名護市字豊原224番地3
 TEL. 0980-50-0111（代表）

海と地球の情報誌 Blue Earth

第29巻 第6号（通巻152号）2017年12月発行

発行人 田代省三 国立研究開発法人海洋研究開発機構 広報部

編集人 田村貴正 国立研究開発法人海洋研究開発機構 広報部 広報課

Blue Earth 編集委員会

制作・編集協力 有限会社フォトンクリエイト
 取材・執筆・編集 立山 晃（p24-27）、鈴木志乃（p1、p20-23、p28-31、裏表紙）
 岡本典明／ブックブライト（p2-17）、坂元志歩（p18-19）

デザイン 株式会社デザインコンビビア
 （飛鳥井羊右、山田純一、岡野祐三）

撮影 藤牧徹也（p16）

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。

オマーン掘削プロジェクトによって採取されたオマーンオフィオライト基底部のコア。炭酸塩岩化した変かんらん岩である。1億年前に形成された海洋プレートのマントル部分に相当する。

提供：高澤栄一 教授（新潟大学）

Pick Up
JAMSTEC



海洋プレートの“化石” オマーンオフィオライトのコアを「ちきゅう」で集中解析

海洋地殻とマントルの最上部から成る海洋プレートは、中央海嶺という海底火山で生まれ、移動し、海溝で地球内部に沈み込む。それに伴い水や炭素や熱が、大気・海洋と地球内部との間でやりとりされる。このようなプレートテクトニクスが確認されている惑星は地球だけだ。

地球の特徴である海洋プレートだが、その詳しい構造や性質はよく分かっていない。海洋プレートを知る上で重要な情報をもたらしてきたのが、アラビア半島の東端に広がる「オマーンオフィオライト」と呼ばれる地層である。それは、1億年前にテーチス海でつくられ、8000万年前に陸上に乗り上げた海洋プレートの“化石”だ。

このオマーンオフィオライトを複数地点で掘削する「オマーン掘削プロジェクト」が、国際陸上科学掘削計画（ICDP）のもとで2016年12月から行われている。第1期は2017年3月に終了し、第2期は2017年11月から2018年3月まで行われる予定だ。

第1期では、海洋地殻の中部～下部に相当する地層を3カ所でそれぞれ400m、マントルに相当するオフィオライト基底部を300m掘削し、岩石試料（コア）の採取に成功。全長1,500mに達するコアは日本へ運ばれ、静岡県清水港に停泊中の地球深部探査船「ちきゅう」の船上設備を用いて2017年7月15日から2ヵ月間、24時間体制でさまざまな解析が行われた。得られたデータから海洋プレートの構造や性質を解き明かしていく。

「ちきゅう」は、“生”の海洋プレートを掘削してマントルを採取することを目指している。その実現のためには、海洋プレートの構造や性質を知っておくことが不可欠だ。オマーン掘削プロジェクトは、人類初のマントル掘削につながっていく。