

Blue Earth

160

海と地球の情報誌

ISSN 1346-0811
2019年4月発行
隔月年6回発行
第31巻 第2号
(通巻160号)



Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

海洋・地球・生命の 統合的理解への挑戦 Part 2

ロストワックス精密鋳造法で
チタン合金製の耐圧容器をつくる

海水由来の塩素が
マントルに大量貯蔵されていた



1 **特集**
**海洋・地球・生命の
統合的理解への挑戦
Part 2**

26 **Aquarium Gallery**
桂浜水族館
赤い目をした臆病なやつら——アカメ

28 **JAMSTEC生まれの種たち**
ロストワックス精密鑄造法で
チタン合金製の耐圧容器をつくる
渡 健介
海洋工学センター 海洋戦略技術研究開発部
海洋観測技術研究開発グループ 技術副主任

32 **BE Room**
Information
『海と地球の情報誌Blue Earth』は
電子版にリニューアルします

裏表紙 **Pick Up JAMSTEC**
海水由来の塩素が
マントルに大量貯蔵されていた

海洋・地球・生命の 統合的理解への挑戦 Part 2

2014年度に開始した第3期中期計画が、
2019年3月で終了した。
JAMSTECではこの5年間、
「海底資源」「海洋・地球環境変動」
「海域地震発生帯」「海洋生命理工学」
「先端的掘削技術を活用した総合海洋掘削科学」
「先端的融合情報科学」
「海洋フロンティアを切り拓く研究基盤」という
7つの課題を掲げ、研究開発を進めてきた。
前号に引き続き、それぞれの課題における
取り組みと成果を特集する。

全球海洋観測網を展開し、海洋における変化の実態を正確に把握

取材協力

河野 健

本部 研究担当理事補佐
地球環境観測研究開発センター 研究開発センター長
北極環境変動総合研究センター 研究センター長

「温暖化の進行など、地球の環境はすでに大きく変化しています。地球環境はこれからどうなるのか、将来を正しく予測することが求められています」と河野 健さんはいう。「将来予測には、地球環境の変化の実態を正確に把握し、その原因やメカニズムを明らかにすることが不可欠です。そのために私たちは各国と協力して全球海洋観測網を構築し、観測を行ってきました」

地球温暖化は、人間活動で放出された二酸化炭素(CO₂)などの温室効果ガスによって大気中に熱が蓄えられることによって起きる。なぜ海洋観測なのだろうか。「環境変化を把握するには、もちろん大気、海洋、陸域、すべての観測が必要です。そのなかで海洋は、大気の1,000倍もの熱容量を持つ最大の熱吸収源であり、CO₂の大きな吸収源でもあります。海洋による熱やCO₂の吸収量が変化すれば温暖化が加速するなど大きな影響が出るため、海洋の観

測がとても重要なのです」

全球海洋観測網は、主に船舶、漂流フロート、係留系による観測で構成されている。特徴の異なる観測方法を組み合わせ、広大な海洋の統合的・継続的な観測を実現しているのだ。JAMSTECは、エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象が発生する太平洋とインド洋の赤道域、沈み込みが起きている南極海、温暖化の影響が顕著に表れる北極海などで観測を行っている。また、北西太平洋では海洋環境変化が生態系に与える影響を調査している。

「海洋は広く、また大気よりゆっくり変化するので、1研究機関による数年の観測で分かることは限られています。ここでは、もう少し広く長い期間の観測から分かってきたことを紹介します」と河野さん。「まず、海洋に吸収され蓄えられている熱の量を正確に見積もることが可能になり、海洋の貯熱量が増加していることが分かりました」。貯熱量の見積もりには、アルゴフロートが活躍した。アルゴフロートは、水深2,000mまでの水温と塩分を10日置きに自動で観測し、データを人工衛星経由で送信する。2000年からフロートの投入が始まり、現在はおよそ30カ国が参加し、約4,000台が稼働中だ。「空間的・時間的に満遍なく、15年以上にわたって継続的に観測したからこそその成果」と河野さんはいう。

また、「太平洋全体で深層の水温が上昇している

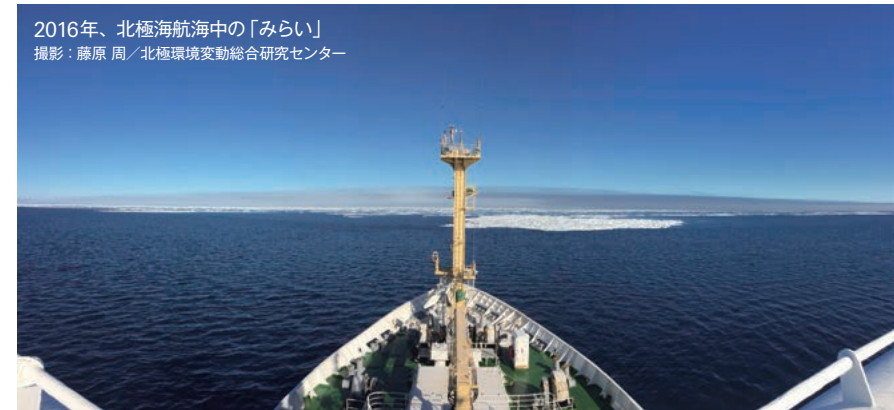
ことが分かりました。海洋の温暖化が海底まで達しているのです」と河野さん。1990年代に世界海洋循環実験(WOCE)のもとで、大陸間を縦横断する測線で海面から海底まで船舶による高精度観測が行われた。2000年以降にWOCEの測線を再観測し、結果を比較することで約20年間における水温変化が明らかになったのだ。そして、観測とシミュレーションを合わせた解析から、太平洋深層の水温上昇は南極海での沈み込みが弱まったことが原因であると突き止めた。さらに、水深4,000mまでの水温と塩分を観測可能な深海用プロファイリングフロートDeep NINJAによる観測から、南極海での沈み込みによって形成される底層水が2011年以降、急速に減少していることが分かった。南極底層水の減少は40～50年後に太平洋深層の水温上昇として表れると予測されていることから、今後の監視が不可欠だ。

さらに、海洋全体でどのくらいCO₂を吸収したのかを定量的に求めることに成功し、この10年間で吸収量に大きな変化がないことが分かった。海洋による大気中のCO₂濃度の上昇抑制効果は続いている。「ただし」と河野さんは続ける。「海洋がCO₂を吸収し続けることで海洋酸性化が進行し、生物に影響を及ぼすことが危惧されています」

海水にCO₂が溶けると、水素イオンが増えてpHが低下する。海水が弱アルカリ性から中性に近づくことから、酸性化と呼ばれる。そのような環境では炭酸カルシウムの飽和度が低下し、生物が炭酸カルシウムの殻や骨格をつくりにくくなってしまうのだ。「私たちは、マイクロX線CT画像法を開発し、生物の殻や骨格の炭酸カルシウム密度を数値化することに成功しました。酸性化の影響を定量評価できる初めての方法です。そして、すでに酸性化の影響で生物の炭酸カルシウム密度が減少している海域があることが明らかになりました」

酸性化の進行の監視も必要だが、海洋の現場観測で使えるpHセンサーには精度が不十分が高価で複雑なものしかなかった。そこで、2015年に国際コンペティション「Wendy Schmidt Ocean Health XPRIZE」において企業と共同開発し、値の正確さ部門で3位となったpHセンサーを北極海仕様で改良し、観測を行う計画が進んでいる。

「海水の減少など環境が急変している北極海の観測が、ますます重要になります」と河野さん。JAMSTECは1998年から、海洋地球研究船「みらい」などによって海水が後退した夏の北極海で観測



2016年、北極海航海中の「みらい」
撮影：藤原 周／北極環境変動総合研究センター



「みらい」から南極海に投入されるDeep NINJA。2012年12月、南極アデリー海岸沖。溶存酸素計測機能付きのDeep NINJAによる観測も行われている。
撮影：内田 裕／地球環境観測研究開発センター

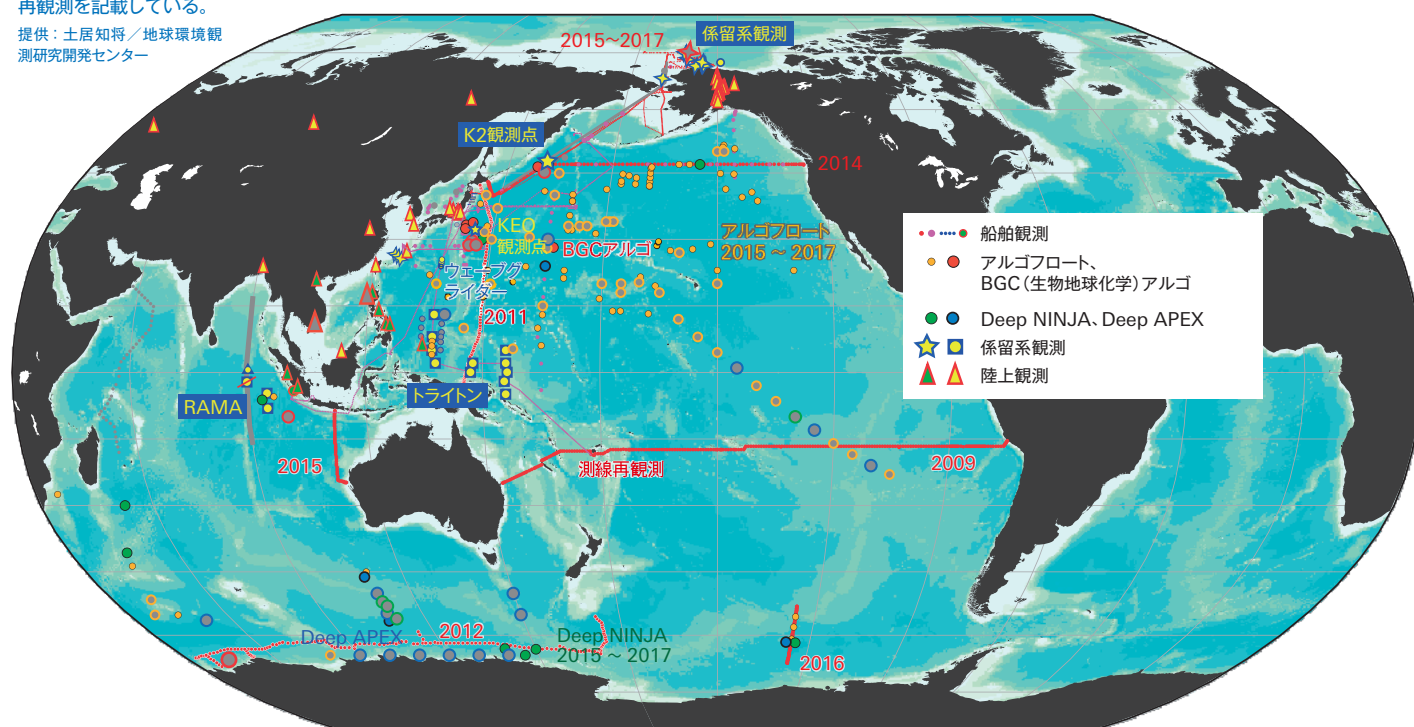
を継続してきた。「北極海の将来予測には、海水融解域で起きるさまざまな現象を観測してきた私たちの知見が役立つでしょう」。2017年には、北極圏国などで構成される北極評議会の作業部会が取りまとめる環境評価報告書の執筆者にJAMSTECの研究者が選ばれている。河野さんは、「北極海を横断し、海面から海底まで高精度での観測が必要」とも指摘する。海水の下を自律的に航行し観測を行う海中ドローンの開発にも取り組んでいる。

自動化は、環境変動観測における大きな課題である。「あらゆる環境の変化を常に正確にモニターしていることが理想」と河野さん。現在は船舶でしか高精度に観測できない溶存酸素や栄養塩、クロロフィルなどについても漂流フロートや係留系へ搭載できるセンサーの開発を進めている。

「JAMSTECは高精度な海洋観測ができる数少ない研究機関として世界から認められています。それは、積み重ねてきた実績と信頼があるからです」と河野さんはいう。現在実施中の20カ国からの70を超える研究機関が参加するYMC(海大陸研究強化年)プロジェクト(2017～2020年)でもリーダーシップを発揮している。「全球海洋観測網の一翼を担い、維持できている。それ自体が、環境変動研究における大きな成果であり、非常に重要なことなのです」

JAMSTECが実施した全球規模の海洋観測

2014～2018年度の観測、およびこの10年間に実施したWOCE測線の再観測を記載している。
提供：土居知将／地球環境観測研究開発センター



CO₂排出量、人間活動の影響、ブラックカーボンの動態……、物質循環の実態が見えてきた

取材協力

金谷有剛

地球環境観測研究開発センター
研究開発センター長代理
地球環境観測研究開発センター
地球表層物質循環研究グループ グループリーダー
北極環境変動総合研究センター
北極化学物質循環研究ユニット 主任研究員

地球表層には大気、海洋、陸があり、熱や水とともに、さまざまな物質がその間を巡っている。そうした物質のなかには、二酸化炭素（CO₂）やメタン（CH₄）、エアロゾルなど地球環境に影響を与えるものもある。「どの物質が、どこでどれだけ発生し、どのように輸送され、どこにどれだけ蓄積・吸収され、地球環境にどのような影響を与えるのか。それを知ることが、環境変動のメカニズムを理解し、将来を予測するために不可欠です」と金谷有剛さんは語る。

2013年、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の「第5次評価報告書」が発表された。世界の科学者たちによる温暖化研究の最新成果をまとめたものだが、金谷さんは「第5次評価報告書では、物質循環に関わる大きな謎がいくつか残されたままになっていました」と指摘する。「私たちは、2021年発表予定の第6次評価報告書に向け、それらの謎を解き明かすための研究を進めてきました。謎の1つは、東アジアにおけるCO₂収支の整合性です」

中国、日本、韓国、モンゴルを含む東アジアにおいて、1990年代末から2010年ごろにかけて陸域生態

系によるCO₂吸収量が年0.56PgC（PgC：炭素換算でペタグラム。1Pgは10億トン）増加しているという推定が発表された。中国が行った植林による吸収効果の表れだとも考えられる。一方で、社会経済統計値に基づいて推定されている中国のCO₂排出量は不確実性が大きいという報告がある。「私たちは2016年、社会経済統計に基づく東アジアにおけるCH₄排出量は過大評価されていて、実際は推定より約41%も低いことを明らかにしています。CO₂排出量の推定にも疑問を感じ、検証することにしました」

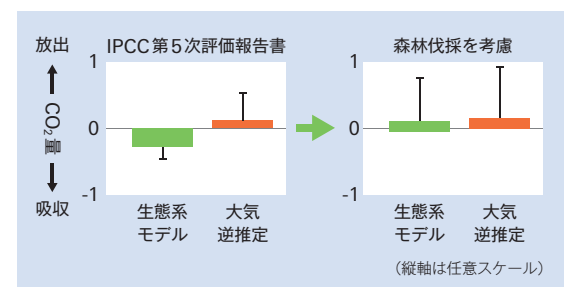
CH₄の解析結果を用いて補正を行い、東アジアにおける2002～12年のCO₂排出量の増加は年1.0PgCにとどまると、2017年に発表した。社会経済統計に基づく排出量は、年0.5PgCも過大評価されていた。その差は、日本の排出量の年0.35PgCより大きい。そして、独自に開発した精度の高い大気化学輸送モデルを用いて大気中CO₂濃度の観測データから逆推定を行い、ビデオを巻き戻すようにして大気中のCO₂が陸や海にどれだけ吸収されてきた結果なのかを解析したところ、衝撃的な結果が得られた。「陸域生態系によるCO₂吸収量は伸びていなかったのです。排出量増加の誤った仮定が導き出した幻といえるでしょう」と金谷さん。「この手法を用いてCO₂の収支を地域ごとに正確に把握することで、地球温暖化の将来予測の精度が向上します。さらに、温暖化対策のための国際的な枠組みである『パリ協定』のもと、CO₂排出量を適正に管理し、植林など対応策の効果性を正しく評価することにも役立ちます」

大気中に放出された人為起源のCO₂の約3割は、陸域生態系に吸収されている。地域ごとのCO₂収支は、植物の光合成による吸収量と、植物と土壌中の微生物の呼吸による放出量の差し引きで決まり、生態系モデルから推定する方法と、大気から逆推定する方法がある。第5次評価報告書では、2つの方法で求めたCO₂収支の符号が、熱帯アジアなどいくつかの地域で逆になっていた。生態系モデルでは、炭素循環に関わる各プロセスを計算してCO₂収支を求める。「CO₂収支の符号が合わないのは、生態系モデルでこの地域の実態が考慮されていないからではないかと考えました」と金谷さん。そこで、森林伐採など土地利用の影響を組み込んだ新生態系モデルをつくり、CO₂収支を推定した。すると、新生態系モデルの推定と大気逆推定の符号が一致した。CO₂収支には土地利用の変化など人間活動の影響が無視できないことを明確に示した結果である。

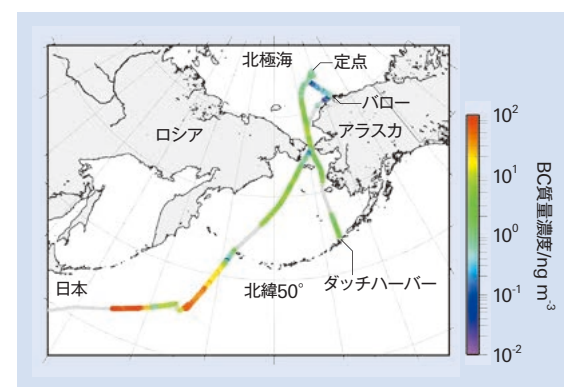
温暖化の進行によって陸域生態系のCO₂収支がどう変化するか、よく分かっていない。JAMSTECではアラスカやシベリアの森林地帯でも観測タワーを使ったフィールド調査によって、CO₂収支の変動を監視している。ただし、観測できる範囲には限りがある。広範囲を観測できる人工衛星データの利用が今後の課題だ。

ブラックカーボンの動態も第5次評価報告書で残された謎の1つである。ブラックカーボンは、ディーゼルエンジンの排気ガス、まきの不完全燃焼、森林火災などによって発生し、北極にも運ばれている。海氷や積雪に沈着すると、表面が黒くなって反射率が低下する。その結果、氷や雪の融解が進み、温暖化が加速する可能性が指摘されている。しかし、ブラックカーボンの輸送シミュレーションでは、モデルによってアジアなどの排出地域から北極などの遠距離まで届くかどうかには大きな違いがあり、その影響を予測することが難しかった。

そこでブラックカーボンの動態を正確に捉えるため、国立極地研究所、JAMSTEC、北海道大学を中心に2015年から実施している「北極域研究推進プロジェクト（ArCS）」のもとで、海洋地球研究船「みらい」による高精度測定を実施。「雨によって大気から取り除かれていく除去率が高く、遠くまで運ばれるブラックカーボンは、第5次報告書での推定より少ないことが分かってきました」と金谷さん。またJAMSTECが2009～15年に実施した長崎県五島列島の福江島での大気成分観測とその解析から、ブ



熱帯アジアにおけるCO₂収支。IPCC第5次評価報告書において、生態系モデルではCO₂吸収、大気逆推定ではCO₂放出と、符号が逆だった。森林伐採を考慮した新生態系モデルではCO₂放出となり、大気逆推定と符号が一致した。



「みらい」による航路上のブラックカーボン（BC）質量濃度の観測結果。北緯50度以南では、質量濃度が高めである。ユーラシア大陸から排出されたブラックカーボンである可能性が高い。北極海での質量濃度は低い。灰色の線は、自船の影響を受けている可能性が高いためデータを示していない。

JAMSTECにおける地球表層の物質循環研究の概要
大気、陸域、海洋を循環するさまざまな物質の動態を捉え、気候や生態系への影響を明らかにして、将来を正しく予測することを目指している。



モデルシミュレーションデータ同化

温暖化した地球の予測精度を高め、社会科学や観測研究との連携を推進

取材協力

河宮未知生

統合的気候変動予測研究分野 分野長
気候モデル高度化研究プロジェクトチーム
プロジェクト長

2013年、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）は、温暖化研究の最新成果をまとめた「第5次評価報告書（AR5）」を発表した。それを受けて、2015年に国連の気候変動枠組み条約の締約国会議で採択された「パリ協定」では、産業革命前からの気温上昇を2℃より十分に抑えるとともに、1.5℃上昇を抑える努力を継続する、という目標が掲げられた。2016年、パリ協定が発効。2018年には、IPCCが「1.5℃特別報告書」を発表した。

1880～2012年の間に地球の平均気温は、すでに0.85℃上昇したことが観測されている。1.5℃上昇を抑えるという目標を達成するには、人類は今後、二酸化炭素（CO₂）など温室効果ガスをどれくらい排出することが許されるのか。

「AR5では、現在の年間排出量の2～3年分と予測していました。しかし『1.5℃特別報告書』では予測精度が向上し、10～20年分は排出が許されると

いう研究結果が発表されました。AR5の2～3年分では1.5℃という目標は実現不可能でしょう。しかし10～20年分ならば、2050～60年に向けて排出量をゼロに近づけていくシナリオを描くことができます。1.5℃という目標は困難だが不可能ではない。それが『1.5℃特別報告書』の最も重要なメッセージだと私は受け取りました」。河宮未知生さんはそう解説する。

温暖化抑制の目標を達成するために人類に許されるCO₂排出量を予測するには、温暖化した地球で森林や海の生態系などがどのように変化し、人類が排出したCO₂を陸や海がどれだけ吸収するかを計算して将来の大気中のCO₂濃度を導き出し、気温上昇を予測する必要がある。「以前は、人類が排出するCO₂のうち陸や海が吸収する量を単純なモデルで見積もり大気中のCO₂濃度を導き出していました。CO₂が海へ溶け込む化学的な過程や光合成によるCO₂吸収といった生物活動もモデルに取り込んで将来の大気中のCO₂濃度を精密に計算し、人類が排出するCO₂量と温暖化の関係を予測する地球システムモデルの開発が、21世紀に入り各国で始まりました」

JAMSTECでは、地球システムモデル「MIROC-ESM」の開発を進めてきた。その予測結果が「1.5℃特別報告書」にも反映されている。

現在では、世界で十数種類の地球システムモデルの開発が進められている。冒頭で紹介したように、その予測精度が温暖化防止の取り組みに大きな影響を与える。予測精度をさらに向上させるには、陸や海のCO₂吸収量や温暖化に関連する要因を包括的にモデルに組み込む必要がある。

JAMSTECでは、世界に先駆けて河川から海への物質移動を取り込む研究を行った。温暖化により降水量が増えれば、河川から海へ流れ込む肥料などの栄養分の量が増え、海の生物生産量や光合成によるCO₂吸収量も変化するはずだ。「JAMSTECには、そのような研究に欠かせない大気や海洋の物理や化学、生態系の専門家が集結しています。鉄分が海洋の生物生産量に特に影響を与えることが知られています。大気中の微粒子によって鉄分が陸から海へ供給されます。その過程もMIROC-ESMに取り込みました」

「人類が排出するCO₂量と温暖化の関係を予測するMIROC-ESMの開発により、経済活動と温暖化の関係や、温室効果ガスの削減コストなどを社会科学と連携して研究することが、この10年でできるよう

になりました」と河宮さんは指摘する。

温暖化により、台風などの気象現象がどのように変化するかを予測することも、防災や社会・経済活動にとって重要だ。JAMSTECでは全球雲解像モデル「NICAM」の開発も続けてきた。

MIROC-ESMのベースとなる気候モデル「MIROC」では、地球大気を水平方向に約100km四方の粗い解像度で区切り、100年後といった長期の温暖化予測を行う。その解像度より小さなスケールで起きる雲や台風などの気象現象は、経験則に基づくパラメタリゼーションという方法で計算する。

一方、NICAMは大気を水平方向に1辺が14km～800mの三角形の格子に区切り、大気の運動や雲の成長、雲種同士の相互作用などを物理法則に基づき計算することが大きな特徴だ。現在の地球大気の数値と温暖化した地球の海面水温の推定値を与えることで、温暖化した地球の大気状態を計算する。「NICAMの計算により、温暖化した地球では、同じ中心気圧の台風でも強風域が1割ほど拡大する可能性があることが分かりました。2017年に発表したその研究結果は、多くのメディアで取り上げられ、大きな注目を集めました」

「解像度の高い予測ができるNICAMは、観測研究と直接連携できます。2017年に行われたマッデン・ジュリアン振動（MJO）の国際観測研究プロジェクトが象徴的です」。MJOとは、熱帯の巨大な積乱雲群と相互作用する大気の流れの分布が、30～60日の周期で東向きに地球を1周する現象だ。MJOは全世界のさまざまな気象現

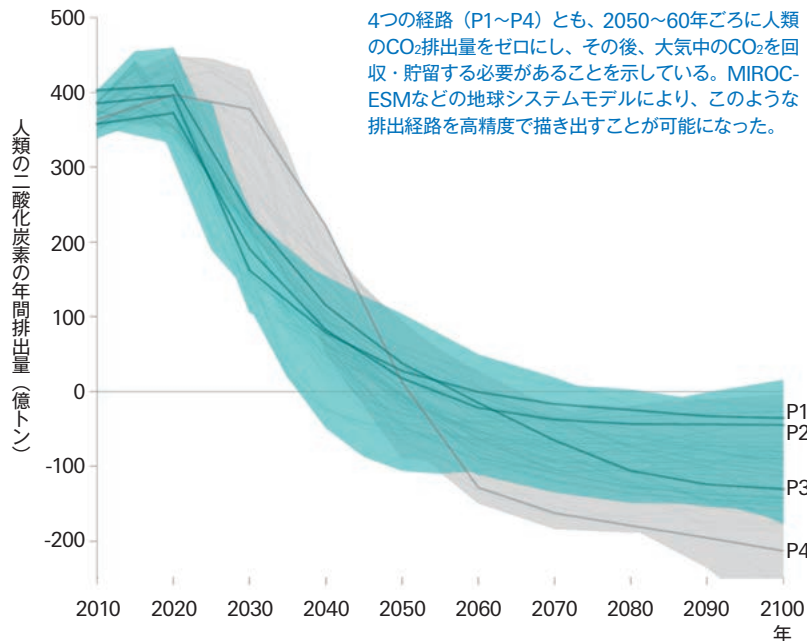
象に影響を与える。日本にやって来る台風の一部もMJOの影響で発生したものだ。「観測地点は限られています。観測データをNICAMに与えて、観測する日のMJOの全体像を描き出し、観測計画を調整しながら研究を進めたそうです」

モデルによる予測と現場で観測を行う両分野の研究者が集結していることもJAMSTECの大きな特徴だ。「JAMSTECでは近年、北極の観測にも力を入れています。モデルによる予測でも、海水域の変動予測や、海水域の減少により雲が増え北極の温暖化を促進することを指摘するなど、MIROCを用いて北極研究に貢献しています」

IPCCは今後、「陸域の土地利用や生態系」「海洋と雪氷圏」の2種類の特別報告書を取りまとめ、2021年に「第6次評価報告書（AR6）」を発表する。それらの報告書に社会科学や観測研究と連携したMIROC-ESMやNICAMによる研究成果が盛り込まれる予定だ。

1.5℃以内を実現するためのCO₂排出経路
(IPCC「1.5℃特別報告書」より)

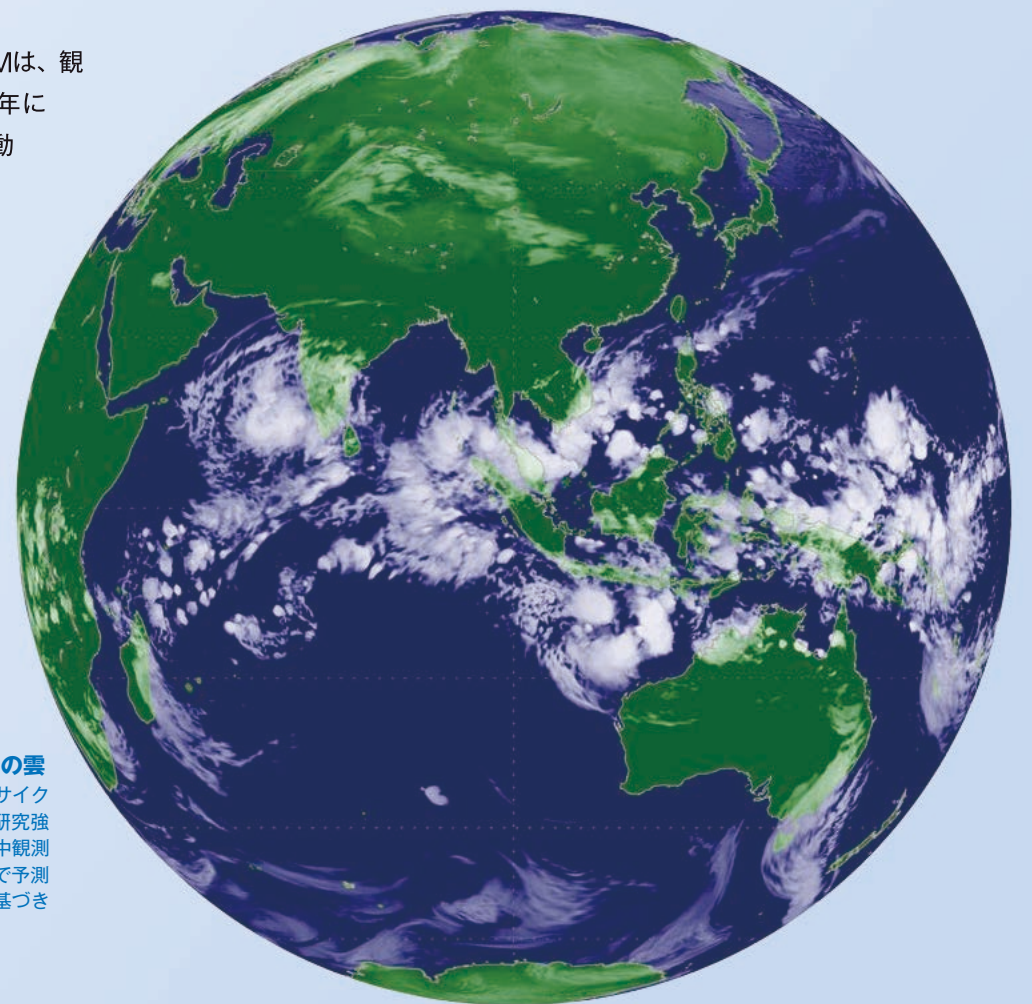
4つの経路（P1～P4）とも、2050～60年ごろに人類のCO₂排出量をゼロにし、その後、大気中のCO₂を回収・貯留する必要があることを示している。MIROC-ESMなどの地球システムモデルにより、このような排出経路を高精度で描き出すことが可能になった。



NICAMで予測された2017年12月2日の雲

MJOに伴う雲活動の活発化やインド洋上でのサイクロンの発生が捉えられている。YMC（海大陸研究強化年）のインドネシア・スマトラ島における集中観測期間中の雲（外向き長波放射）分布をNICAMで予測した画像。このようなMJOの全体像の予測に基づき観測計画が調整された。

©JAMSTEC/AORI/RIKEN
提供：那須野智江／シームレス環境予測研究分野



気候や海の予測情報を活かし社会に貢献

取材協力

スワディヒン・ベヘラ

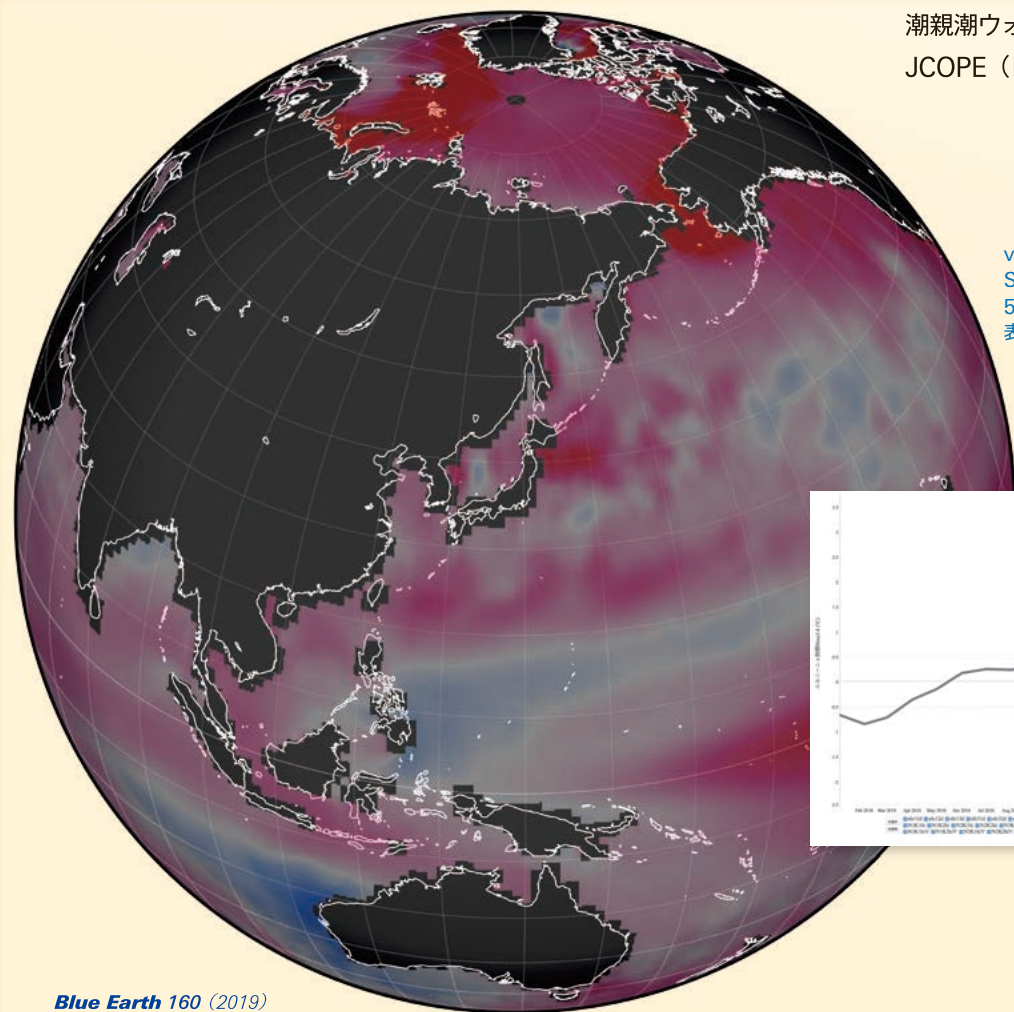
アプリケーションラボ ラボ所長

野中正見

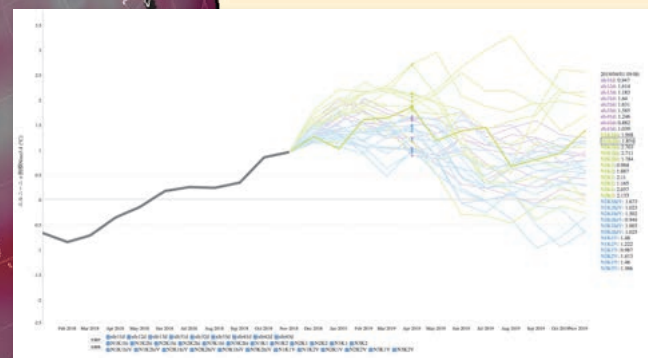
アプリケーションラボ 気候変動予測応用グループ
グループリーダー



南アフリカのザニンマラリア研究所で行われたワークショップ中の様子。2018年2月から4月にかけての、マラリア発生早期警戒システムの構築と、南アフリカ・リンボポ州での殺虫剤噴霧スケジュールについて議論された。



virtual earthでの表示の一例。
SINTEX-Fによる、2019年3月～
5月平均の海面水温偏差の予測を
表示している。



エルニーニョ現象の予測を表したグラフ。
SINTEX-Fでわずかに条件を変えて行った複数
の予測を示している。地図上に示される
のは、これらの情報の平均値である。

研究成果の社会への応用と情報発信

JAMSTECでは、研究成果の社会応用を進めている。そのなかで、アプリケーションラボ（APL）で取り組んできた南アフリカでのマラリア発生の予測に関するプロジェクトは、ここ数年で大きく進展した。「南アフリカの気温や降雨量などの観測データをはじめ、気候に関するさまざまな情報をもとに、マラリア発生の予測モデルをつくりました」とベヘラさんという。

予測モデルをつくるにあたっては、まずどのような現象が南アフリカの気候に影響するのかを調べた。その結果、南インド洋や南大西洋で発生する亜熱帯ダイポールモード現象や、太平洋の熱帯域で発生するエルニーニョ現象、ラニーニャ現象などが、南アフリカでの降雨に影響することが分かった。「そういった情報を取り込み、機械学習の手法も取り入れて予測モデルをつくったのです」とベヘラさん。現地では間もなく、予測モデルをもとにしたマラリアの早期警戒システムの運用も始まる予定だという。

APLではWEBページを利用した予測情報の外部への情報発信にも、ここ数年力を入れてきた。「黒潮親潮ウォッチ」では、日本周辺の海流予測を行うJCOPE（日本沿海予測可能性実験）による予測実

験のほか、関連するさまざまな情報を発信している。一方「季節ウォッチ」では、SINTEX-F（大気海洋結合大循環モデル）の予測結果をもとに、猛暑や干ばつなど世界の天候異常の予測情報などを発信している。「予測情報を出すとともに、黒潮大蛇行やエルニーニョ現象など何らかの現象が起きたときに、それらの現象の解説も行ってきました」とベヘラさん。

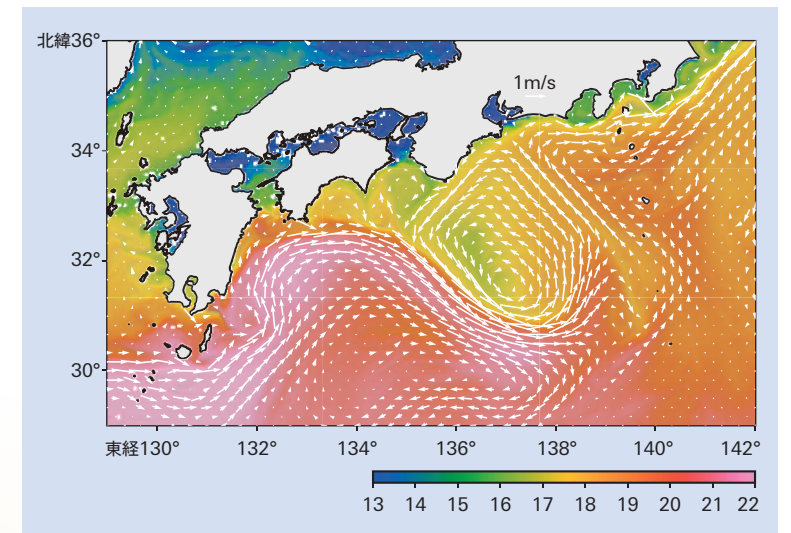
予測やシミュレーションのデータを見やすいかたちで世に出すべく「virtual earth」の開発も行った。海流や風などの状況を地図上に表示するもので、日本周辺だけでなく全球の表示も可能になっている。エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象が発生しそうかといったSINTEX-Fによる予測のグラフも閲覧可能だ。「オーストラリアでは、この情報が農業関係者に使われているようです。また利用者が、表示される数値を使って統計モデルをつくるといったことも可能です」

現象を予測するための基礎研究も重要

現象を予測するには、その現象の発生原因などをきちんと理解することが必要だ。「予測をするとき、鍵になる部分が抜けているとうまくいきません。現象に関する理解が進むと、何が鍵なのかが分かります。鍵が分かることで、その鍵をどう予測につなげていくかを考えることができます」とベヘラさん。

APLでは従来、熱帯の気候変動現象に注目して予測モデルを開発していたが、最近では亜熱帯～中緯度地域まで範囲を広げつつあるという。「インド洋亜熱帯ダイポールモード現象は、マラリアの予測の例のように、すでに応用に利用されています」とベヘラさん。マラリア予測に関しては、南アフリカ南方の海面水温の変動の研究から、予測の精度を改善したり、予測の期間を長くしたりできる可能性も出てきているという。

また近年、「沿岸ニーニョ／ニーニャ現象」という新しい大気・海洋の変動現象が発見された。これはオーストラリア西岸沖や北米カリフォルニア沖、またアフリカ西海岸などで、海面水温が普段より高くなったり低くなったりする現象だ。「カリフォルニア沖とアフリカ西岸の現象はAPLの研究者が発見しました。予測可能性についての研究も行い、一部についてはかなり予測できそうであることも分かってきました」



JCOPEによる予測の例。黒潮大蛇行が示されている。色は海面温度（℃）。

中緯度で特に注目しているのは、海の細かい渦だという。細かい渦がたくさんあると、黒潮や黒潮続流といった強い海流に影響する。「黒潮の存在が低気圧の発達に与える影響についても、ここ数年でかなり分かってきました」とベヘラさん。高解像度化しないと小さな渦は再現できない。小さな渦が再現できなければ黒潮などの強い海流、ひいては黒潮などに影響される低気圧なども再現できない。「現在の気候予測モデルよりも高解像度のモデルを使って予測する必要があり、準備を進めているところです」

予測研究のこれから

「これまで進めてきたことに加えて、AI（人工知能）を使い、さらに予測の精度を改善していきたい」とベヘラさん。AIを使うことで、世界中の気候の関係性も調べたいという。たとえば日本の気候は、熱帯からも北極からも影響を受ける上、偏西風も影響するため、理解することが非常に難しい。「AIを使って大量の情報を解析していくことが非常に重要になっていくでしょう」

大気と海洋を結合して全球の気候予測を行うSINTEX-Fと、日本周辺の海洋に関する予測を行うJCOPEとを結合することも視野に入れている。「現在、JCOPEは海の情報だけを扱っています。JCOPEを海と大気が結合したモデルにしてSINTEX-Fと組み合わせることで、日本周辺の細かい気候予測を精度よくできるようにしていくことが、私たちの中長期的な目標です」

生命の起源をめぐるシナリオに決定打。次は真核生物誕生のシナリオを解く

取材協力

高井 研

本部 研究担当理事補佐
海底資源研究開発センター
資源成因研究グループ 上席研究員
深海・地殻内生物圏研究分野 分野長
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 上席研究員

「海洋生物の多様性について、多様性創出のメカニズムを理解し、維持し、利用していくこと。それが私たちのゴールです」と高井 研さんは語る。ここでは、生物多様性創出のメカニズムの理解を目指した取り組みについて紹介しよう。

「生物多様性には2つある」と高井さん。地球上の生物種数を正確に知ることは難しいが、動物が約870万種、微生物は100億種を超えるという報告もあり、さまざまな環境にさまざまな生物がくらしている。これが、空間的な生物多様性である。もう1つは、時間的な生物多様性だ。現在知られている生物は40億年の歴史の積み重ねで誕生した上でいままで生き残っているものであり、ほかに絶滅した生物もたくさんいる。時間的な生物多様性創出のメカニズムを理解するには40億年に及ぶ生物進化の歴史をひも解かなければならない。

「私たちは、時間的な生物多様性の始まりである生命の誕生と初期進化のシナリオ『JAMSTECモデ

ル』を、前の中期計画のときに提示しています」と高井さん。JAMSTECモデルは、生命は約40億年前に深海熱水活動域で誕生し、超好熱メタン菌や超好熱酢酸菌、超好熱鉄還元菌となり、それらを一次生産者とする持続的始原的生態系を形成して深海底に点在する熱水環境に広がっていた、というものだ。

「次に私たちは、非生命から生命への進化のシナリオを明らかにすることを目指しました。そして、『深海熱水電気化学メタボリズムファースト生命起源説』を提示したのです」

無機物から有機物がつくられ、それを材料にして生命が誕生した。無機物から生命の材料がつくられていく過程を化学進化という。化学進化にはエネルギーが必要だが、そのエネルギー源や化学進化のメカニズムが分かっていなかった。そうしたなか、深海熱水噴出孔周辺で発電現象が自然発生していることを、2017年に発見。電気エネルギーは、さまざまな化学反応を促進できる。さらに、深海熱水噴出孔には触媒能を持つ硫化鉱物が豊富に存在している。また、熱水噴出孔の内部には微小な穴があり、その1個1個が細胞のような役割を果たして化学反応が効率よく進み、つくられた材料も拡散しない。

そのような環境で連鎖的な化学反応が起き、無機物から有機物が次々とつくられ生命の誕生に至った——それが深海熱水電気化学メタボリズムファースト生命起源説である。連鎖的な化学反応によって

生命に必要な物質を合成する過程は、原始的な代謝（メタボリズム）だ。代謝が生命の誕生より先に成立しているので、メタボリズムファーストである。生命の起源についてはさまざまな説があるが、獨創性、革新性、発展性において極めて画期的な説であるとして注目されている。

「深海熱水噴出孔における電気化学反応を再現する装置を用いて、生命の材料をつくり出せるかを確かめ、シナリオの完成を目指しているところです。『JAMSTECの生命起源論』として、『ダーウィンの進化論』のように世界に広めたい」と高井さんは意気込む。「しかも、この研究は地球外の日体における生命誕生の可能性にも広がっていきます」

土星の衛星エンケラドスは、表面を氷で覆われ、その下には液体の海がある。2015年、JAMSTECによるエンケラドスの環境を再現した実験から、エンケラドスの海底では熱水活動が起きていることが明らかになった。地球の生命が深海熱水電気化学メタボリズムファーストで誕生したのであれば、熱水活動が起きているエンケラドスでも生命が誕生している可能性がある。「ぜひエンケラドスの生命探査を実現したい」と高井さん。すでにアメリカ航空宇宙局（NASA）や日本の宇宙航空研究開発機構（JAXA）などの研究者と検討を始めている。

2018年には、初期生命の代謝について大きな発見があった。沖縄トラフの熱水活動域から採取し、生命の起源に近い原始的な系統に属している *Thermosulfidibacter takaii* というバクテリア（真正細菌）のTCA回路（クエン酸回路）を詳しく調べることで得られた成果だ。TCA回路は生命に不可欠な化合物を合成する代謝機構で、有機物を無機炭素から合成する独立栄養生物も、有機物をほかから取り入れる従属栄養生物も持っている。独立栄養生物では反時計回り、従属栄養生物では時計回りで反応が進み、それぞれ酵素群も異なる。ところがそのバクテリアは、独立栄養か従属栄養かによってTCA回路の反応の向きを切り替え、まったく同じ酵素を用いて化合物を合成できるのだ。いままで、そのような生物は報告されていない。

高井さんは、「初期生命が誕生したころの地球は、環境がダイナミックに変動していました。生命が利用できる物質も変化するため、その種類や量に応じて柔軟に代謝を変更していたのでしょう」と解説する。「初期の生命は独立栄養か従属栄養か、長く議論されてきましたが、この発見によって混合栄養



最も祖先的な真核生物である *Ophirina amphinema*

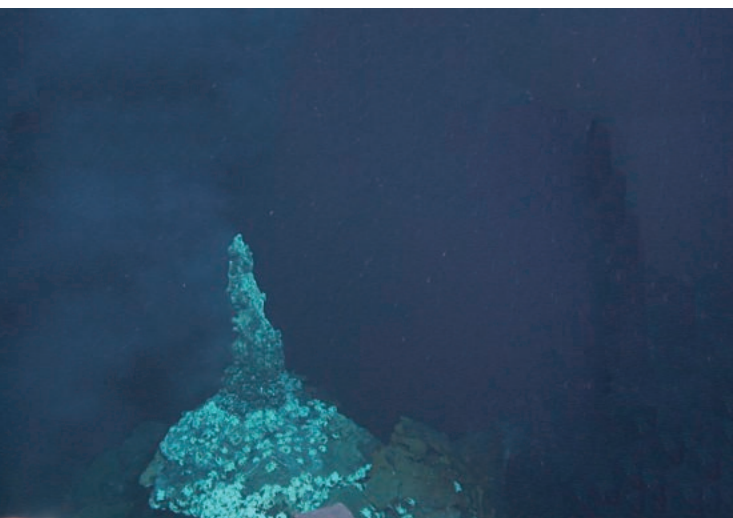
だった可能性が出てきました。それは、深海熱水電気化学メタボリズムファースト生命起源説と矛盾することではありません」

地球生命の40億年の歴史のなかで、生物が大きく姿を変えたイベントが2つある。真核生物の誕生と、多細胞生物の誕生である。JAMSTECでは、真核生物の誕生のシナリオを明らかにする研究も行っている。

40億年前に誕生した生命は、細胞に核を持たない原核生物で、バクテリア（真正細菌）とアーキア（古細菌）という2つのグループがいる。およそ21億年前、細胞に核を持つ真核生物が出現した。真核生物は、バクテリアとアーキアが融合して誕生したと考えられている。「生物種が分化するのではなく、異なる生物種が融合することで多様性を生み出したのです。多様性創出のメカニズムとしてとても興味深い」と高井さん。しかし実は、どちらが取り込み、どちらが取り込まれたのかさえ、よく分かっていないのだという。JAMSTECでは、真核生物に近い原核生物と、原核生物に近い真核生物をすでに発見している。それらを詳しく調べることで、真核生物誕生のシナリオの解明を目指している。

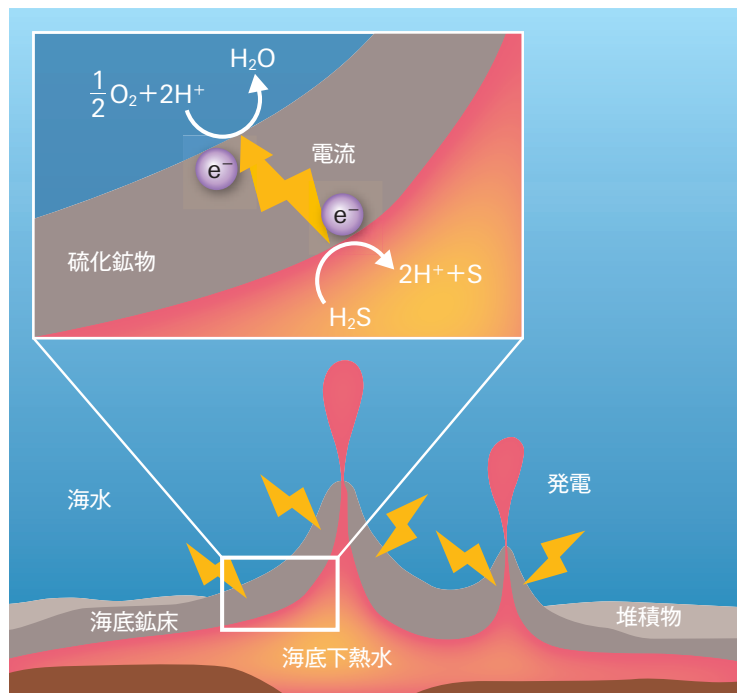
しかし、「生物だけを見ていたのでは、多様性創出のメカニズムは解けない」と高井さんは指摘する。「生物の進化と地球環境の変化は常にリンクしています。真核細胞の誕生にも何らかの地球環境の変化が影響している可能性があります。生物学と地球科学、両方からのアプローチが必要で、それはJAMSTECの得意技です」

発電現象が観測された深海熱水噴出孔。水深1,071mの沖縄トラフ伊平屋北アキフィールドにあるHDSKチムニー。チムニーの高さは約6m。



深海熱水噴出域における自発的な発電現象の概念図

熱水には電子（ e^- ）を放出しやすい硫化水素（ H_2S ）が、海水には電子を受け取りやすい酸素（ O_2 ）が大量に含まれている。熱水噴出孔の主成分である硫化鉱物が電極触媒と導電体として機能し、熱水中の硫化水素から電子を受け取り、海水中の酸素に電子を渡す。この電子の受け渡しによって電流が発生する。



超深海・海溝生命圏とウイルスワールドを発見

取材協力

高井 研

本部 研究担当理事補佐
海底資源研究開発センター
資源成因研究グループ 上席研究員
深海・地殻内生物圏研究分野 分野長
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 上席研究員

空間的な生物多様性についての研究も進んでいる。「私たちは、空間的、つまり環境に応じて生物多様性がどのようにつくられるのかを理解するためには、未知の海洋環境に出掛けていき、まだ見ぬ生物多様性を見つける必要があります」と高井さん。「私たちが注目したのは海溝です。そして、超深海・海溝生命圏の存在を発見し、2015年に発表しました」

世界最深の海はマリアナ海溝チャレンジャー海淵である。マリアナ海溝の調査は1950年代に始まっている。1995年には、初代の無人探査機「かいこう」が1万911.4mに到達し、海底に生息するゴカイやエビ類の映像を撮影した。翌1996年には水深1万898mの海底から堆積物の採取に成功。1万m以深の海底からの堆積物採取は世界で初めてだった。マ

リアナ海溝の海底堆積物には、高圧環境を好むものなど変わった微生物が生息していることが明らかになった。『「かいこう」によるマリアナ海溝到達は、深海研究に革命を起こしました。あの瞬間に世界が変わった」と高井さん。「かいこう」をきっかけとして堆積物中の微生物に関する研究が盛んになった一方で、マリアナ海溝の海水中の微生物についてはほとんど研究されていなかった。「海水は3,000年ほどかけて世界中の海を巡り、かき混ぜられているので、マリアナ海溝といえどもほかと変わらない、と考えられていたのです」と高井さんは指摘する。

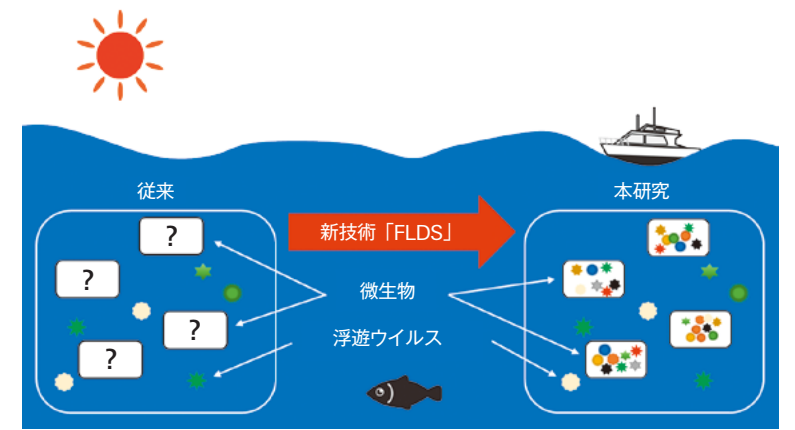
そうしたなか2008年、チャレンジャー海淵の中央部において、海洋表層から海溝底直上の水深1万257mまでの海水試料を大深度小型無人探査機「ABISMO」によって採取。化学解析や微生物・ウイルス数の計測などを行った結果、海溝内の超深海層には、水深4,000～6,000mの深海層とは明らかに異なる微生物群集が生息していることが分かり、2015年に発表された。「海溝には独自の生命圏が存在していたのです。超深海・海溝生命圏は、地震などによる海溝斜面の崩壊に伴って巻き上げられた有機物によって支えられていることも明らかにしまし

た」。その後、日本海溝、小笠原海溝、沖縄トラフ、ニュージーランド北東のケルマディック海溝などでも、超深海・海溝生命圏の存在が確認されている。

超深海・海溝生命圏における生物多様性創出のメカニズムの解明。それが、次の課題だ。「生物多様性創出には、遺伝的な変異と空間的な隔離が必要」と高井さんという。遺伝的な変異によって多様性が生まれるが、集団のなかで交雑が起きれば均一化してしまう。生物多様性の創出には、遺伝的な変異に加え、物理的な隔離が必要なのだ。「遺伝的な変異が起きた個体が分散し、地理的に隔離されて定着し、生物多様性が生まれます。海洋でその鍵を握っているのは海流です。そこで、海流に注目した生物多様性研究を始める準備をしているところです」

さらに高井さんは、「超深海・海溝生命圏の成り立ちを探っていくことで、空間的な生物多様性と時間的な生物多様性を結び付けた、生物多様性創出のメカニズムに統合的に迫ることができる」とも期待している。海溝という空間だけでなく、海流への分散・定着に伴う時間軸も入ってくるからだ。

超深海・海溝生命圏の発見と並んで、大きな進展があったのが、RNAウイルスの多様性についての



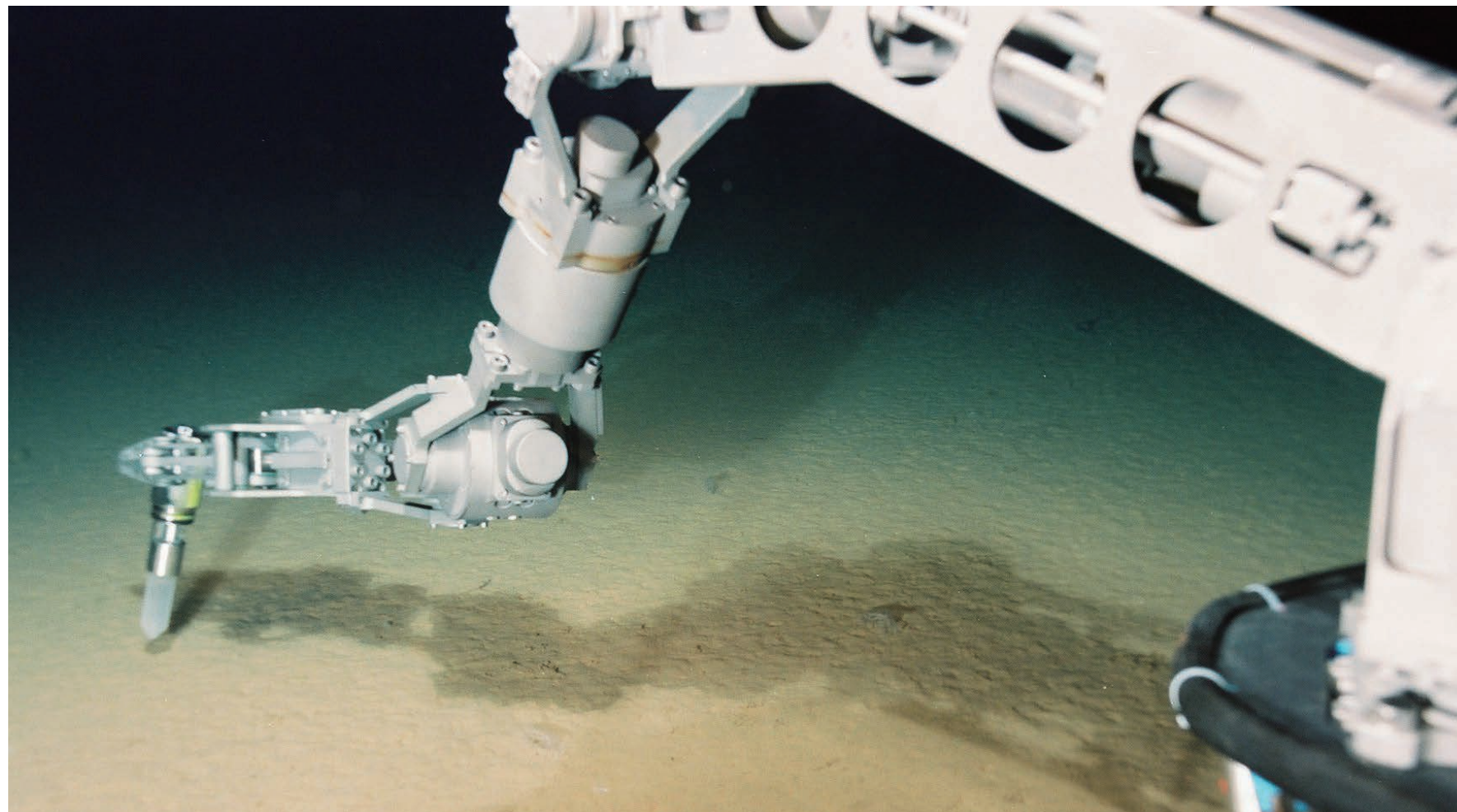
これまでのウイルス多様性解析においては、海水中的の浮遊ウイルスが解析対象とされてきた。FLDSでは、浮遊ウイルスと微生物細胞中のウイルス多様性を解析できる。FLDSによる解析によって、特定のRNAウイルス群についてはそのほとんどが微生物細胞内で共存状態にあることが示唆された。

研究である。ウイルスは、DNAウイルス、RNAウイルス、レトロウイルスに大きく分類される。海洋環境に多様なDNAウイルスが存在することは明らかになっていたが、RNAウイルスについては解析手法が確立しておらず、その多様性については分かっていなかった。そうしたなか、RNAウイルスのゲノムを効率的・網羅的に検出する手法FLDSを開発し、海洋環境におけるRNAウイルスを解析。その結果、多数の新種RNAウイルスを海水中から発見し、さらに多様なRNAウイルスが海洋微生物に感染して共存していることを発見したのだ。「私たちが見逃していた多様性を明らかにした大きな成果です。そして、宿主にダメージを与えずに共存しているウイルスの多さに驚きました。ウイルスというと病原体というイメージが強いですが、その認識を改める必要がありそうです」

開発したFLDS法は、海洋環境におけるウイルスだけでなく、もちろん陸上のウイルスにも利用できる。そして基礎研究だけでなく、公衆衛生や農林畜産業などにおける防疫でも役立つと期待されている。ウイルスが生物と共存できる仕組みが分かれば、ウイルス感染症の予防や治療につながる可能性もある。ウイルスは、次の中期計画の期間で取り組むべき重要な研究テーマの1つである。

近年、生物多様性の維持と持続的な利用が、人類の重要な課題となっている。たとえば、1992年に採択された「生物多様性条約」のもと、生物多様性の観点から重要度の高い海域（EBSA）の選定が進められている。日本近海のEBSAの選定にあたっては、JAMSTECの理事や研究者が選定プロセスに参加し、JAMSTECで得られた知見や成果を根拠に、科学的な議論が行われた。「研究開発活動の積み重ねと成果に対する高い評価があつてこそ、国際的な取り組みへの貢献が可能になります。サイエンスの本道である好奇心に基づく研究と、国際的な取り組みへの貢献。その両方にバランスよく取り組んでいくことが、JAMSTECには求められています」

1996年、マリアナ海溝チャレンジャー海淵、水深1万898mの海底で堆積物を採取する「かいこう」。



深海サンプルの外部提供を開始。深海生物特有の機能を活用したイノベーション創出を加速

取材協力

出口 茂

海洋生命理工学研究開発センター 研究開発センター長

深海は、高圧、低温、暗黒である。そうした極限環境で生きている生物のなかには、特有な機能を持っているものがある。JAMSTECでは、そうした新奇の機能の探索、また深海生物特有の機能を活かしたイノベーションを創出するための取り組みを行ってきた。

2016年には、D-アミノ酸を好んで食べて増殖する微生物を深海堆積物中から発見。タンパク質を構成するアミノ酸には、左右対称の立体構造を持ったL-アミノ酸とD-アミノ酸がある。生物はL-アミノ酸を圧倒的に多く生産し、一般には豊富にあるL-アミノ酸を好んで食べる。「D-アミノ酸を好むという驚くべき性質は、深海という極限環境で生き残るための生存戦略です」と出口 茂さん。表層でつくられた有機物が沈降してくる途中でL-アミノ酸は優先的に食べられるため、深海の微生物は、比較的残っているD-アミノ酸を食べることができるように適応したと考えられるのだ。近年、D-アミノ酸の一種であるD-セリンが脳の高次機能を制御していることが発見された。D-アミノ酸の利用に関する機能が明らかになれば、さまざまな応用の可能性がある」と期待されている。

「過酷な環境で生きていくために生物が獲得した

生存戦略は、産業的にも大きなポテンシャルがあります。しかし、これまで研究成果を十分に社会還元できていませんでした」と出口さんは指摘する。では、どうすべきか。「私たちは、深海に行き、サンプルを持ち帰ってこることができます。一方で、製品開発などの産業化は本職ではありません。そこで、JAMSTECの特徴である深海サンプルを企業や大学などの研究機関に提供し、オープンイノベーション体制で産業化を目指すべきだと考えました」

JAMSTECがこれまで深海から採取してきた堆積物は、冷凍保存されている。深海堆積物の外部提供を2014年から試験的に行ってきた。堆積物には、さまざまな微生物が含まれている。そのなかから有用機能を持つ微生物を見つけ、産業応用につなげてもらうのが狙いだ。「当初、深海サンプルの希少性をアピールしたのですが、企業の反応はいまひとつでした。学術的には世界初、世界唯一というのは重要です。しかし、学術的に価値のある微生物が、産業的に価値があるとは限らないのです」と出口さん。その後、アピールのポイントを変えた。「高圧・低温・暗黒の深海に生きる微生物にはこういう特徴があるから、こういう特有の機能を持っている可能性があると紹介すると、がぜん、興味を持ってくれるようになりました」

試験提供が好評だったことから、2017年9月、深海バイオ・オープンイノベーションプラットフォームを発足させた。多くの企業では深海堆積物の扱いに慣れていないため、培養技術も併せて提供する。「こういう酵素を持つ微生物が欲しいという要望に対して、この海域の堆積物がいいと提案することもあります。そうしたコンサルティングは、深海を知り尽くしているJAMSTECでなければできません」

深海サンプルから有用な酵素を発見し、産業化に動きだしている例もある。そして2019年度からは、深海微生物株と環境ゲノム情報の提供も開始する。堆積物にはさまざまな微生物が含まれているが、培養できるのは数%に満たないといわれる。JAMSTECには培養に成功した1万以上の微生物株が保存されており、それを使うことで有用機能の探索をすぐに開始できる。膨大なゲノム情報から有用な機能を見つけ出すデータマイニングや、DNA合成技術の発達により、環境ゲノム情報の提供を望む声も多かった。

「深海サンプルの提供と併せて、独自技術の横展開にも力を入れています」と出口さん。基礎研究の

ために開発した技術が、産業界や異なる分野の研究に役立つことがある。それが、横展開だ。

独自技術の横展開の代表例が、出口さんが中心となって開発した高温・高圧ナノエマルジョン技術である。「生命の起源を研究するため、生命誕生の最有力候補である深海の熱水噴出孔の高温・高圧環境を再現する装置をつくったのが始まりです」。深海熱水噴出孔のような高温・高圧環境では、水は超臨界水となって性質が大きく変化し、油と混ざり合うようになる。さらに出口さんは、熱水に巻き込まれた物質は一気に超臨界状態まで加熱されるが、熱水から外れれば瞬で冷却されることに注目。そのとき何か面白いことが起きているのではないかとひらめき調べてみると、高温・高圧の超臨界状態では水と油が分子レベルで完全に混ざり合い、それを急冷するとナノメートルサイズの油滴ができた。

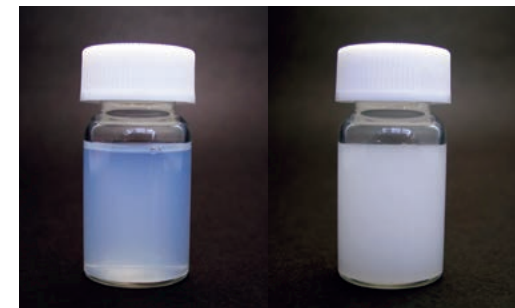
水と油のように溶け合わない液体の一方が、もう一方の液体中に液滴として分散している状態をエマルジョン（乳化）という。液滴の直径をナノメートルサイズにすると新たな機能が発現することからナノエマルジョンが注目されているが、液滴の微細化が難しかった。「私たちの方法を使うと、魔法のように簡単にナノエマルジョンをつくることができます。その技術をMAGIQと名付けました」

エマルジョンは、食品、医薬品、化粧品、塗料などさまざまな産業分野で使用されていることから、MAGIQは大きな注目を集めた。そして、企業と共同でナノエマルジョン製造装置を開発し、2016年から販売を開始。さらに現在、複数の企業と産業用途への応用に向けた共同研究が行われている。また、機能性食品素材の商業生産に向けて製造能力を10倍に引き上げることを目指したスケールアップ実証を企業と共同で進めているところだ。一方で、手のひらサイズの「MAGIQ on a Chip」の開発も行っている。生物由来など希少な試料を用いたナノエマルジョンの製造が可能になると期待されている。MAGIQの始まりである、生命の起源の研究にも使う計画だ。

同位体分析技術とRNAウイルスの網羅的検出技術なども横展開が期待されている。自然界には同じ元素でもわずかに質量が異なるものがあり、それを同位体という。物質に含まれる同位体の比を計測すると、その起源やそれまでのプロセスなどを読み解くことができる。JAMSTECではごく微量の試料でも同位体比を正確に測定することができ、その技術



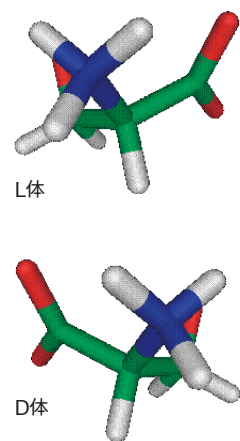
深海バイオ・オープンプラットフォームで外部提供している深海堆積物。



左は、MAGIQで得られた、直径60nmの油滴から成るナノエマルジョン。油滴がナノサイズなので、光の反射が抑えられて透明度が高くなる。右は、直径数μmの油滴から成る通常のエマルジョン。白濁している。

は世界トップレベルだ。同位体分析技術を用いたウナギの完全養殖に向けた餌の開発や、産地偽装の判別など、企業との共同研究が進んでいる。RNAウイルスの網羅的検出技術は、海洋環境中のRNAウイルスを検出する技術として開発された。医学や公衆衛生、農林畜産業にも役立つと期待され、すでに民間企業への技術移転が行われている。

「JAMSTECの基本は、優れた研究を行うことです」と出口さんはいう。「優れた研究であれば、何らかのかたちで社会貢献へとつながっていきます。大切なのは、どこにも負けないカードを持つこと。切り札を持つJAMSTECと、切り札を持つ企業が組むことで、1+1が3にも4にもなる。それこそイノベーションです」



左は、アミノ酸の一種であるセリンのL体とD体。鏡に映るように向かい合った左右対称の立体構造を持つ。右は、L-アミノ酸よりD-アミノ酸を好んで食べて増殖する微生物 *Nautella* 属A04V株の走査型電子顕微鏡写真。

新しいプロセス導入による精緻な

取材協力

高橋桂子

地球情報基盤センター センター長

JAMSTECでは、さまざまな観測データやシミュレーションデータが、日々大量に得られている。「データは、そのままではなく解析しその結果を読み取ることで情報になります。情報が体系化されると知識になり、知識は使えるようにすることで知恵になります。私たちは、海洋地球科学分野のさまざまなデータから情報を生み出し、付加価値を付けた情報や知識として社会に発信し使ってもらうことを目指してきました」と高橋桂子さんは語る。「具体的には、先進的プロセスモデルの研究開発、先端情報創出のための大規模シミュレーション技術の確立、データと情報を統融合する技術開発とそれらの技術によって得られた成果を社会へ発信する、という3つのテーマを掲げました」

データを生み出すためにはモデルが必要である。モデルとは、現象を構成している要素と要素が物理的にどのように関係しているかを数式で表したものだ。数式で表すことで、現象を深く理解でき、またさまざまな条件下での現象の振る舞いを予測でき

る。「これまで考慮していなかった新しい考え方をモデルに導入して新たなモデルを考えることによって、これまで表現できなかった現象を表現できるようになり、また現象のプロセスをより深く理解できたり、予測の精度を向上させたりできます。それが先進的なプロセスモデルの研究開発です」

2016年には、「波しぶきプロセスモデル」を開発。台風に伴う強風域では、海面は大きく乱れ、波しぶきが多量に発生する。波しぶきは、大気と海洋間の熱の交換などを促進すると考えられているが、これまでの大気海洋相互作用のモデルでは考慮されていなかった。そうしたなか、波しぶきの発生・輸送・蒸発のプロセスを組み込むと、飛散した波しぶきによって形成される蒸発層が発達し、潜熱の移動係数が増大することを条件を単純化した理想実験によって確認。さらに、過去の台風に適用した結果、波しぶきによる大気―海洋間の潜熱移動の促進効果が台風の予測シミュレーションに大きな影響を及ぼすことが明らかになった。波しぶきプロセスを加えることで台風予測の精度が上がることから、社会貢献にもつながる成果である。

「北半球と南半球における大気の大気対流現象に『同期』という特性があることを突き止めたプロセス研究も行っています」と高橋さんはいう。「同期のような数理科学的な考え方を実現現象の特性解析に取り入れることで、これまで困難だと諦めていた現象の解明に大きな一歩が刻まれることを期待しています」

社会で使ってもらえる先端的で有用な情報や知識を創出するには、これまでにない大規模シミュレーションが有力な手立てになる。JAMSTECにはスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」があり、2015年6月から第3世代が稼働している。実効性能は、第2世代の約10倍だ。その「地球シミュレータ」を最大限に活用して大規模シミュレーション技術の

モデル開発と大規模シミュレーションを実現

開発を行っている。

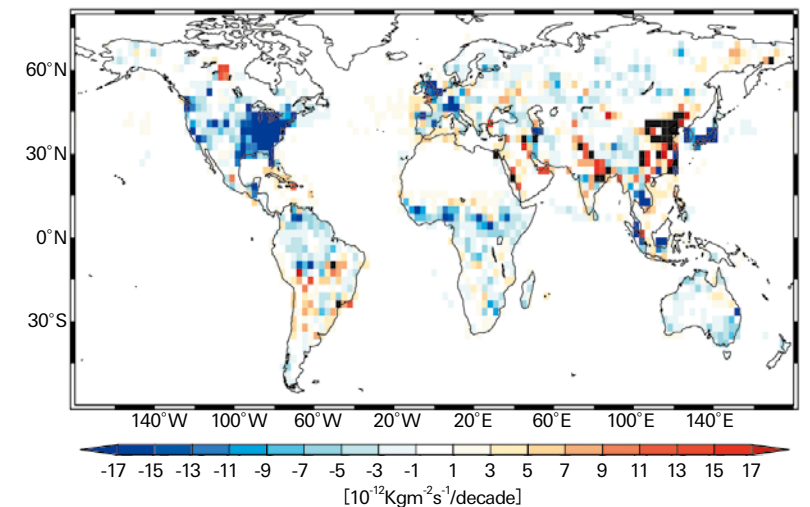
その1つが、大気中に存在する微量成分を予測するデータ同化システムである。大気微量成分には窒素酸化物のように地球温暖化や大気汚染と強く関連するものがある。しかし、地表から排出された後、大気中での化学反応によって消失するため、大気中の濃度観測から排出源や排出量を推定するのは難しい。そこで、消失の効果を考慮した化学輸送モデルによるシミュレーション結果を衛星観測データに基づいて修正するデータ同化によって大気微量成分の地域ごとの排出量を推定するシステムを開発した。

そのシステムを用いて窒素酸化物の排出量を推定した結果、2005～14年の10年間でインドと中東は大きく増加し、アメリカ、西ヨーロッパ、日本では大きく減少していることが分かった。中国では、2005～10年は30%以上増加、2011年以降は減少と、激しく変動していた。地球全体の大気微量成分について長期変動を高い信頼度で推定したのは初めてだ。データ同化によって、コンピュータのなかに過去の大気微量成分の分布が、時間軸も含めた四次元分布として再現できる。その再現されたデータを再解析データという。「アメリカ航空宇宙局（NASA）が上記のシステムで得られた再解析データを観測の検証に使うなど、世界で高い評価を得ています」と高橋さんは解説する。先進国における排出規制の効果の確認や、新興国の環境政策へ向けた提言、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）での議論にも役立つと期待されている。

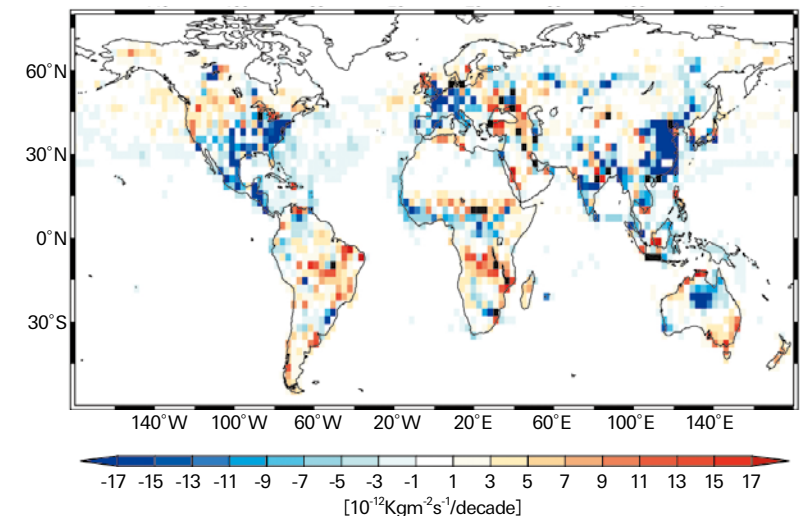
IPCC「第6次評価報告書（AR6）」の発表が2021年に予定されている。「地球シミュレータ」では、第6期結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP6）などAR6に向けたシミュレーションが進行中だ。初代の「地球シミュレータ」は、地球温暖化や気候変動諸現象の予測と解明を第一の目的として誕生した。その伝統が現在でも受け継がれ、AR6でも日本を代表する成果としての大きな貢献が期待されている。

大規模シミュレーション技術として、極端現象の予測システム開発にも取り組んでいる。集中豪雨などの極端現象の予測精度向上や、予測時点から現象が発生するまでの時間（リードタイム）をより長くすることが求められている。そうした背景から、解像度を高くし、また広い領域を対象にシミュレーションを行うことで、豪雨の予測精度が向上するかどうかを調べた。2014年8月の広島での豪雨の事例では、解像度2kmと500mの結果を比較すると、解

2005～2010年の平均変化量



2011～2014年の平均変化量

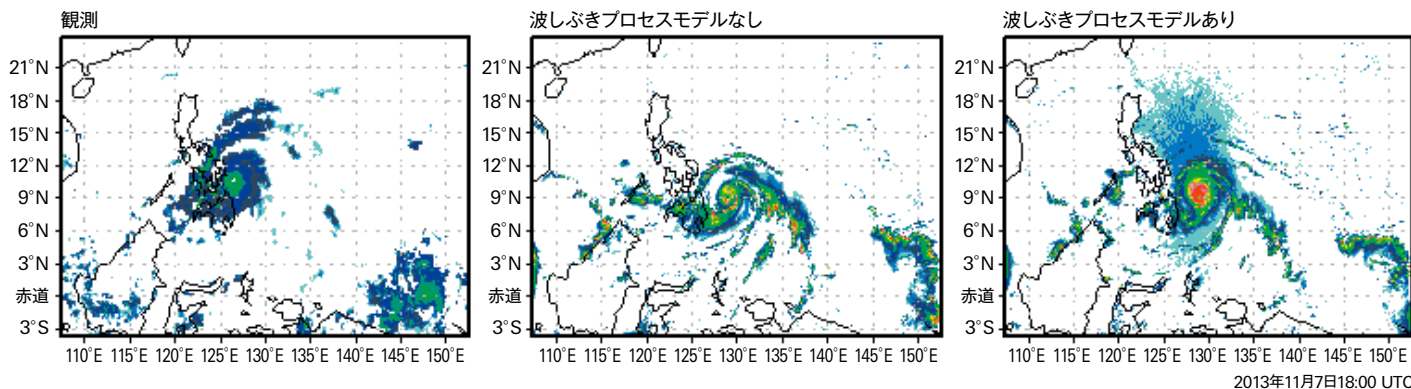
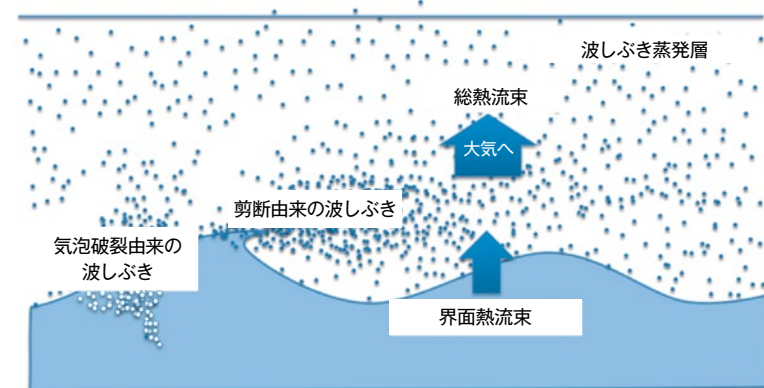


データ同化によって推定した世界各地における窒素酸化物の排出量

2005～10年（上）と2011～14年（下）の世界各地における平均的な増減量。赤色は増加、青色は減少した地域を示し、色が濃いほど変動量が多い。

波しぶきプロセスモデルによるシミュレーション

上は、波しぶき蒸発層の模式図。下は、2013年にフィリピンに大きな被害を与えた台風ハイランの降水量分布。波しぶきプロセスモデルを入れた方が、観測を再現している。



有用な価値を持つデータと情報をつくり、発信し、社会実装を実現

取材協力

高橋桂子

地球情報基盤センター センター長

ラグビーワールドカップ2019が日本で開催される。その会場の1つである熊谷ラグビー場がある埼玉県熊谷スポーツ文化公園のヒートアイランド対策に「地球シミュレータ」のシミュレーション結果が活用されている。

具体的には、JAMSTECが開発した大気海洋結合モデル「MSSG」を用いて、熊谷スポーツ文化公園を中心とする5km四方について、暑熱環境シミュレーションを行った。暑熱環境シミュレーションとは、対象のエリアで、どのような風がどのように吹き、どれくらいの温度と湿度を持った空気がどのように流れるのかを再現あるいは予測するものだ。

まず、対策を行う前の状態について暑熱環境シミュレーションを行い、気温、湿度、地表面温度、風向、風速、日光の放射量、暑さ指数などの分布を求めた。地形、建物の形状、樹木の位置や種類、蒸散作用などを考慮してある。次に、予定している暑熱を回避する対策を行った状態について暑熱環境シミュレーションを行った。気温の低下や暑さ指数の改善、木陰の増加、地表面温度の低下などについてどれくらいの効果があるかが数字として示され、予

定している対策は十分な効果があることが分かった。また、並木道に隣接する領域に植栽する際、平行に配置するより千鳥状に配置した方が相対的に5%多くの木陰ができることも分かった。この結果に基づいて、植栽は千鳥配置が採用され、公園の整備が行われた。

「暑熱を回避するための対策の具体的な効果を事前に、定量的に予測し、対策の効果を最大化することができました」と高橋桂子さん。「この手法は、別の場所にも有効です。ぜひ皆さんにもこういった手法を知っていただき、安全・安心な環境を提供するお手伝いをしていきたいと思っています」

2018年5月には、アカイカ漁場の予測システムによる情報配信が開始された。漁業情報サービスセンター（JAFIC）と共同で開発したシステムで、JAFICの海況・気象情報サービス「エビスくん」から青森県のアカイカ漁業者に配信されている。

夏季の北太平洋中央部と冬季の三陸沖における三次元の海洋環境データと、過去のアカイカ漁場の位置と漁獲量のデータを統合して解析することにより、アカイカの好適生息環境を推定する。それを海況予測場に適用することで、アカイカ漁場の位置を1週間先まで予測する。

このシステムは、情報の流れが一方通行ではないことも大きな特徴である。漁師さんから実際の漁場

の位置情報をフィードバックしてもらっているのだ。情報が循環することで、予測精度がさらに向上していく。これまでは漁師の経験や勘に基づいて漁場の探索が行われていた。予測システムによって漁場探索が効率化したことで、コストの多くを占める漁船の燃料代の削減につながったと喜びの声も届いている。「ほかの地域やほかの魚種への拡張も考えたい」と高橋さんは意気込む。

「価値あるデータと情報をつくり社会へ発信して役立てる挑戦は日本国内にとどまりません」と高橋さん。南アフリカにおいて、気温や降雨量などの観測データをもとにマラリア発生の予測モデルを構築。マラリアの早期警戒システムの運用が間もなく始まる予定だ（本号8ページ参照）。

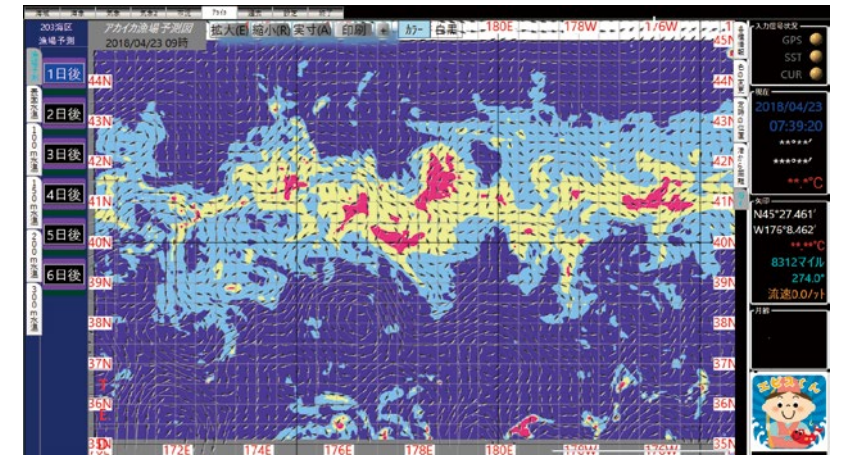
「波しぶき、豪雨、公園、アカイカ……とばらばらなことをやっていると感じるかもしれませんね」と高橋さんは笑う。「先端的『融合』情報科学という名称の通り、幅広く、領域横断的に取り組んできました。海洋地球科学と一言でいっても、JAMSTECで行われている研究は多様で、さまざまなデータと知識が蓄積されています。それらに横串を刺して結び付けないのはもったいないでしょう。ご紹介した成果のなかには、この横串の考え方が活かされているのです」

シミュレーションで地球の未来を——先端的融合情報科学の研究開発分野でよく使われているフレー



アカイカ漁場の予測システム

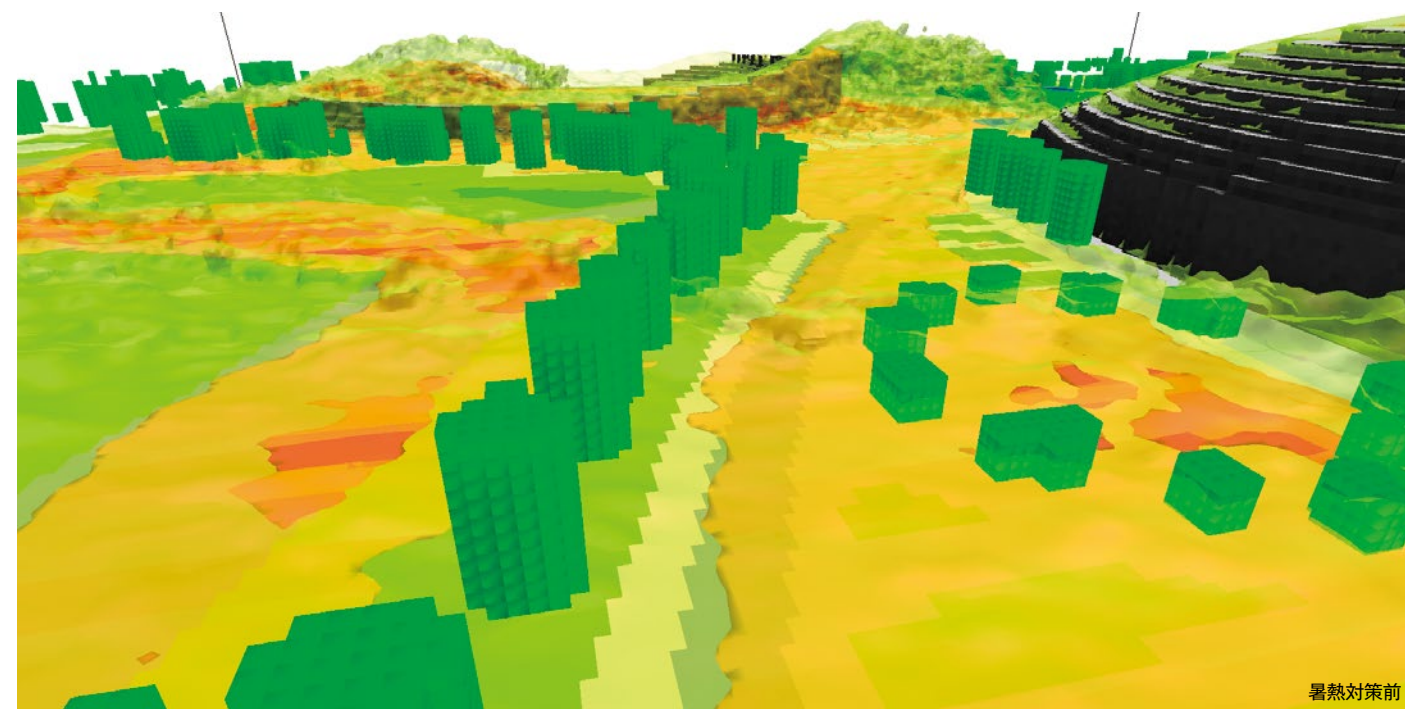
下は漁業情報サービスセンター（JAFIC）の海況・気象情報サービス「エビスくん」で配信されるアカイカ漁場予測情報の例（提供：JAFIC）。上はアカイカ。



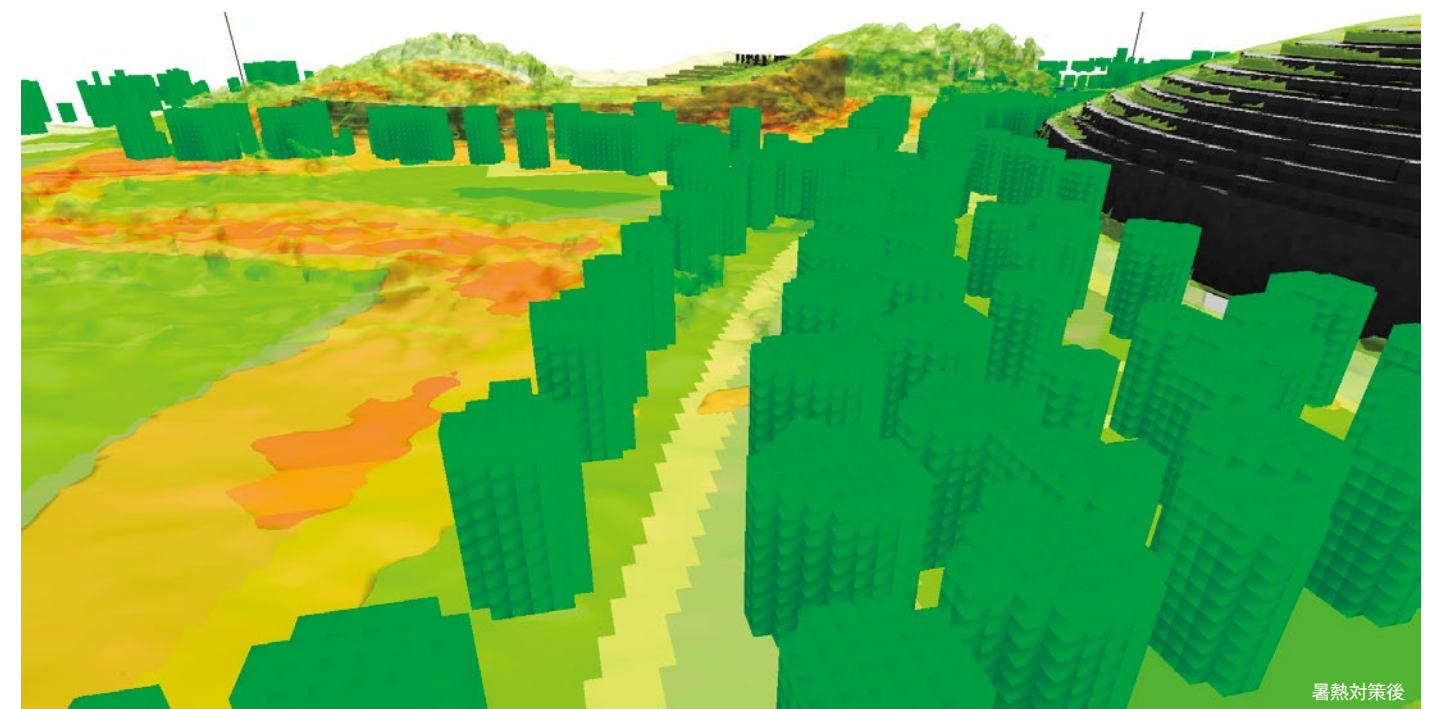
ズだ。「シミュレーションは、過去のことも分かりますが、未来を予測できるのが大きなポイントです。よりよい未来をつくるために私たちはいま、何をやるべきか。それを教えてくれるのが先端的融合情報科学です」

埼玉県熊谷スポーツ文化公園における暑熱対策のシミュレーション結果

典型的な猛暑日（2010年8月26日）の14時を再現した画像で、左が暑熱対策前、右が対策後。黄、橙、赤の順に、気温が高いことを示している。赤は36℃以上である。



暑熱対策前



暑熱対策後

海洋フロンティアを切り拓く技術の研究開発を進めてきた

取材協力

川口勝義

海洋工学センター センター長

新たな船と海中ロボット

JAMSTECでは、地球深部探査船「ちきゅう」をフラッグシップに複数の調査船舶を運用している。近年は、船舶を用いた調査機能を高い水準に維持し、また、海洋における調査観測手法の変化に対応するために、船齢が加わった船舶を廃し、新たな調査船舶の導入を進めてきた。2013年には学術研究船「淡青丸」が退役となり、東北海洋生態系調査研究船「新青丸」の運用が翌14年から始まった。2016年には海洋調査船「なつしま」「かいよう」の2隻が退役し、海底広域研究船「かいめい」の運用が開始された。『「なつしま」と「かいよう」が持っていた機能を、最新の調査観測機器とともに『かいめい』に集約することになりました』と川口さんはいふ。『「かいめい」の導入により、船の数は減りましたが調査能力は格段に向上しています』

「深海の探査というと有人の潜水船を思い浮かべる人が多いと思いますが、海の調査研究においても無人化や自動化が進んでいます。極限環境と呼ばれる海中だからこそ、安全に成果を求めるために、その取り組みは早くから進められてきました」と川口さん。「母船とケーブルでつながった遠隔操縦式の中ロボット（ROV）が活用され、さらに自律型海中ロボット（AUV）が調査観測に導入されています。AUVに関しては、2000年に建造した『う



海底広域研究船「かいめい」。海底資源分布の広域調査や、鉱物・鉱床の生成環境を捉える総合的科学的調査などを行う最新鋭の研究船である。

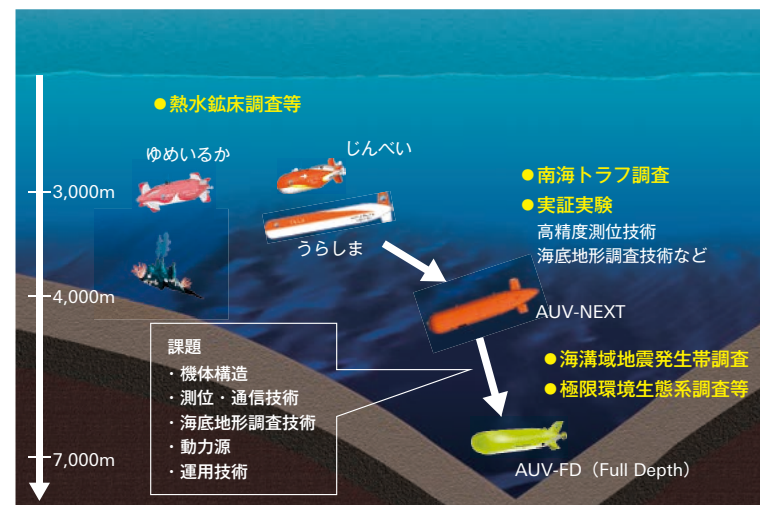
らしま』が、改良を重ねた後2009年より調査研究に供されたのに加え、2017年度からは『じんべい』の供用を開始しました。そのほかにも『ゆめいるか』『おとひめ』の調整が、運用に向けて進められています」

海のロボティクスの機能向上を目指して

JAMSTECでは「次世代深海探査システム」というプログラムが2016年からスタートした。『「ウルトラディープ」と呼ばれる7,000mより深いところを探査するロボットを開発するプログラムです』と川口さん。

「日本の周辺には日本海溝やマリアナ海溝など非常に深い海が存在します。地震研究や極限環境生態系の研究などの面から、そういった深いところで得られる知見を科学者が期待していることもあり、そこまで潜ることができる探査ロボットが求められています」。これまで、要素技術のフィージビリティスタディー（実行可能性調査）や、フルデプス（地球最深度）化に向けた既存システムの機能向上などを進めてきた。

次世代深海探査システムのイメージ図。大深度化に向けた既存システムの機能向上や、AUVの段階的な大深度化などを目指して進められている。



Shell Ocean Discovery XPRIZEにおいて、2018年に行われた本選（Round 2）で使われた「AUV-NEXT」。この写真は2018年8月の伊豆三津浜試験のときに撮影されたものである。

一方で、2015年12月にShell Ocean Discovery XPRIZEの開催が公表された。これは海中ロボットの国際コンペティションで、最大水深4,000m級の海域において、AUVなどを使って海底の広域3Dマップの作成や写真撮影などを行おうというものだ。コンペティションにはJAMSTECをはじめ、研究機関や大学、民間企業などから集まった「オールジャパン」の若手研究者・技術者が「Team KUROSHIO」を結成して臨んだ。

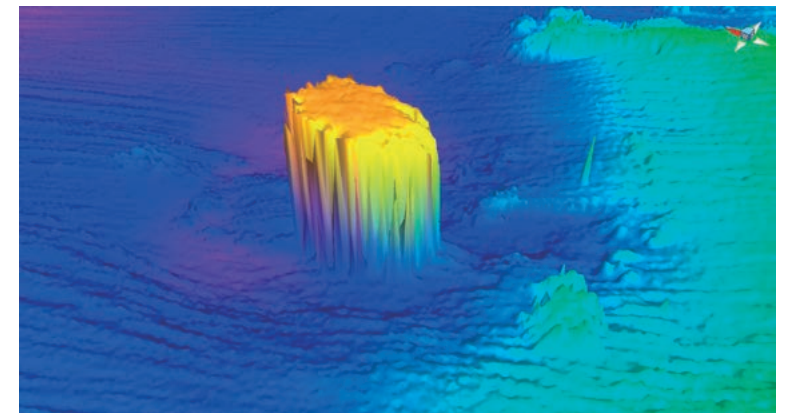
2017年11月～18年2月に予選（Round 1）、2018年11～12月に本選（Round 2）が行われた。「本選には、『うらしま』の構成機器を活用して開発した『AUV-NEXT』を、東京大学生産技術研究所の『AE-Z』、三井造船の洋上ロボット『ORCA』と共に投入しました。『AUV-NEXT』は、『次世代深海探査システム』の検証機として開発したもので、研究者が次の世代の調査観測に求めるニーズを海中ロボットが満たせることを実証することを目的として開発を行ってきましたが、XPRIZEを通じて日本の技術力を世界に示すことができたのではないかと考えています」

内閣府が省庁横断的に進めてきた「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」の「次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）」においても、海底資源調査の効率を上げるためにロボットの同時運用技術の開発が行われてきた。「海に調査に出ると、天候などの関係で作業ができない日が発生します。作業が可能な日に、ロボットが船とは別行動で調査できれば作業効率が上がります。複数のロボットを並行して投入できればさらに効率が上がります」と川口さん。「複数のロボットを同時運用できれば、ロボットごとに別の機能を持たせて、同じエリアで同時に調査を行うといったこともできます」。今後は海中のロボットに加え、洋上ロボット（無人船）や洋上を飛ぶドローンなども含め、海で使うロボット全般のシステムを考えていく必要がある、と川口さんは続ける。

「次世代深海探査システムを軸にして、SIPやXPRIZEなど資源開発などの商業ベースに必要な技術も統合していき、JAMSTECが持っているロボティクスの技術を向上させていくことを目指していると考えています」

海で使う技術の基礎研究

海中ロボットなどの調査システムの継続的な機



レーザースキャナーで15mの高度から可視化したデッドチムニー（熱水を噴出しなくなったチムニー）。解像度は2cmで、音響での観測に比べ非常に高解像度の結果が得られている。左下は同じ場所を写した写真。

能向上や進化を支えるのがJAMSTECが進める技術の基礎研究である。その1つが音波や光など「波」を使った技術だ。

有人潜水調査船「しんかい6500」には、音波を使って海底の画像を母船の調査指揮官（指令）や研究者に伝える装置が搭載されている。「従来技術では10秒に1枚程度の画像伝送を実現していましたが、システムの最適化を進めて通信のクオリティーを上げ、4倍ほどのスピードで画像伝送を実現できる技術を開発しました。その技術を使った伝送装置が、すでに『しんかい6500』に搭載されています」と川口さん。

海底の地形情報を得るには通常は音が使われるが、レーザーを使った技術の研究開発も行われてきた。「音に比べて光は届く距離が限られますが、高解像度のデータを得ることができます」。また海中での光通信の研究開発も行われ、2017年には海中でWi-Fi並みの速度での無線光通信の実験に成功した。

「従来はプロジェクトの一環として、そのプロジェクト実施時に必要な基礎研究を併せて行っていました。その枠組みを外し、基礎研究に開発研究と別の時間軸を持たせることで、ここ数年、基礎研究の質が上がってきたと感じています」と川口さん。「海のロボティクスではスピード感も重要です。周辺技術の変化や進歩を敏感に察知しながら、これからもスピード感をもって研究開発を進めていきたい」と抱負を語ってくれた。

巨大ファシリティが生み出すさまざまなデータはJAMSTECの知的財産。 データの融合を図り新しい段階に

取材協力

東 垣

本部 開発担当理事

第3期中期計画においては、海洋に関する研究や課題解決を行う「研究部門」と、研究を支える技術開発やその運用を担う「開発・運用部門」という体制で研究開発を進めてきた。開発・運用部門の理事を務めた東 垣さんはこの5年間で「技術開発やファシリティの運用を担っていたセンター間の意識改革が進んだことが最大の成果」と総括する。

海洋工学センターは研究船や探査機の運航・管理と技術開発、地球情報基盤センターはスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」の運用やシミュレーション科学の研究、地球深部探査センターは地球深部探査船「ちきゅう」の運航管理を、それぞれ担ってきた。「ファシリティに目が行きがちですが、それらの運用から出てくるデータにはとても大きな価値があります。二度と手に入らないデータも多い。地

球情報基盤センターがそれらのデータや情報を一括して保管・管理する体制を強化しました。その結果、センター間でのやりとりが増え、壁が低くなったのです」

なぜデータに注目したのだろうか。東さんは、「組織がさらに成長するためには、一番強いところを上手に活かすべきでしょう。私が思うJAMSTECの一番強いところは、あまり注目されていませんでしたが、データなのです」という。保管するだけでなく、品質を管理し、必要に応じて公開することも求められる。「いまは用途がないけれども、将来、大きな研究や技術開発の種になるデータが含まれているかもしれません。責任は重大です」と東さん。また、「JAMSTECにおいて国際化が重要な課題となっているが、職員に占める外国籍の人の割合を増やすだけが国際化ではない」と指摘する。JAMSTECのデータを一定のルールのもとで国の内外のさまざまな人たちに使ってもらうことも、国際化の1つのかたちだ。

もちろん、ファシリティの運用でも高い評価を得

ている。「大きなファシリティを、事故やトラブルなく安全に計画通りに運用しています。これは、大いに誇るべきことです」

今後、開発・運用に必要なことを尋ねると、「筋肉と協働」と返ってきた。「人と例えると、研究は脳、ファシリティの運用は筋肉です。筋肉隆々の体でなければ、脳がいくら命令しても動くことができません。新しく面白い研究をするには、充実したファシリティが必要なのです」

また筋肉は、何もしないと、どんどん落ちていく。ファシリティにも同じことがいえる。「観測研究における海洋ロボティクスの導入と併せてセンサーの開発、『地球シミュレータ』の性能向上、『ちきゅう』によるマントル掘削……。それぞれの課題を解決する努力をし続けることが必要です」

2つ目の協働とは？「すべてJAMSTECでやる、という時代ではありません。これからは、JAMSTECと異なる強みを持つ外部の機関や民間といかに協働していくかが重要になります。研究も、技術開発も、そして研究成果の社会還元も、あらゆることに協働が必要です」

観測や実験によってデータを取り、保管・管理

し、データを解析して有用な情報を導き、またシミュレーションによって未来を予測し、研究成果を社会へ還元する——JAMSTECは、それを一貫通貫でやっている世界でも珍しい研究機関である。東さんは、最後にこう語る。「JAMSTECと協働したい。国際的な研究拠点として、世界中の研究機関や大学、企業から、そう思われる存在であり続けなければなりません」



海洋地球研究船「みらい」。優れた耐水性、航行性を有し、広域かつ長期にわたる観測研究が可能な特徴を活かして、熱帯の海域から極域まで広範囲にわたるデータを収集している。



地球深部探査船「ちきゅう」。レーザー掘削技術を初めて科学研究用に導入し、世界最高の掘削能力（海底下7,000m）を持つ科学掘削船。国際深海科学掘削計画（IODP）の主力船として、巨大地震発生の仕組み、生命の起源、将来の地球規模の環境変動、新しい海底資源の解明など、人類の未来を開くさまざまな成果を上げることを目指している。



スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」。世界最大規模の分散メモリー型ベクトル並列計算機で、地球温暖化予測、地球内部変動研究などの海洋地球科学分野をはじめさまざまな分野の研究に利用されている。

データ連携で未知なる因果関係を 見つけ、海洋・地球・生命の統合的理解へ

取材協力

阪口 秀

研究担当理事

宇宙から見た地球
©NASA

第3期中期計画において2018年度に研究部門の理事を務めた阪口 秀さんに、この期間の特筆すべき成果を聞いた。とてもたくさんの成果が出ているので難しいが、と断った上で、「熱帯アジアにおける二酸化炭素の収支の問題の解決」と「独立栄養でも混合栄養でも生きることができる代謝系の発見」の2つを挙げる（本号4ページと10ページ参照）。

「どちらもJAMSTECらしい研究であり、多くの人が支持していた見解とは異なる知見を明らかにしたという点でも画期的な研究です」と阪口さん。前者は、海洋と大気と陸域の観測とモデル研究がそろって初めて得られた成果である。それらを一貫して行っている研究機関は少ない。後者の研究で用いた始原的な微生物は、沖縄トラフの熱水活動域から採取されたものだ。深海へ到達できることは、

JAMSTECの大きな特徴である。「トレンドを打ち破る研究は勇気が要りますが、科学を進める原動力となります。そういう研究ができる土壤があることもJAMSTECの特徴です」

阪口さんは、「これからもJAMSTECらしい研究成果を出していけるかどうか、その鍵を握っているのはデータの連携です」と指摘する。JAMSTECは1971年10月、海洋科学技術センターとして誕生した。それ以来、およそ48年間で得られたさまざまなデータが保管・管理されている。「まず、データのアーカイブ化を進め、データを利用しやすくすることが必要です」と阪口さん。「これまで、地震の観測データは地球科学の研究者、生物の観測データは生物の研究者しか使っていませんでした。もったいない。きちんと利用できるようにアーカイブ化されていれば、たとえば地震のデータと生物のデータの関連を調べることも容易にできるでしょう。そこから因果関係が見つかれば、新しい科学が始まります」

JAMSTECは2012年10月に、「長期ビジョン～海洋・地球・生命の統合的理解への挑戦」を策定している。およそ15年先を見据え、JAMSTECは何をす

べきかを考え、その目標に到達するためのアプローチをまとめたものである。第3期中期計画も、この長期ビジョンを踏まえたものになっている。

「海洋・地球・生命の統合的理解を掲げていますが、これまでは別々に理解を進めてきました。そのなかで、人類の活動は地球に対して大きな影響を与えていることも分かってきました」と阪口さんは解説する。「2019年4月に始まる第4期中期計画では、いよいよ海洋・地球・生命の統合的理解に取り組みます。そのためには、海洋、地球、生命、そして人類活動、それぞれに関するデータを連携させ、未知の因果関係を見つけ、解き明かしていくことが不可欠です」。さらに、「世界中の研究機関との連携は、息をするくらい当たり前の必須条件」ともいう。地球のすべてをJAMSTECだけで理解することはできない。

「研究」と「開発・運用」の関係も見直す。「研究者と技術者を一つ屋根の下に集め、互いにコミュニケーションが取れる環境をつくります」と阪口さん。どういう研究をしたいのか、そのためにはどういう新しい技術が必要か。最先端の技術はどういうものか、それを使うとどういう新しい研究ができるか。日々の議論によって、研究も開発も進むと期待している。欧米の海洋の研究機関でも、研究と開発の融合が進み、その成果が出始めているという。

長期ビジョンが見据えた15年先——2028年ごろを目指し、海洋・地球・生命の統合的理解への本格的な挑戦が始まっている。

BE

ロストワックス精密鑄造法で チタン合金製の耐压容器をつくる

海中での水圧に耐える耐压容器の材料として、
軽くて強くさびにくいチタン合金は最適な材料だ。しかし製造コストが高いことから、
なかなか採用されてこなかった。
渡 健介さんは、JUKI会津株式会社と共同で、チタン合金製の耐压容器を
「ロストワックス精密鑄造法」で製造するための条件を割り出した。
この手法を使えば、数を多くつくるほど容器1個1個のコストを
大幅に下げることが可能になる。

取材協力

渡 健介

海洋工学センター 海洋戦略技術研究開発部
海洋観測技術研究開発グループ 技術副主任
(所属・肩書きは取材当時のものです)

海中観測用のフロート。
矢印の部分がロストワッ
クス精密鑄造法で製作し
た耐压容器となっている。
2018年、海洋地球研究船
「みらい」の航海中に甲板
で撮影した写真である。

耐压容器の材料として最適だが 高コストなチタン合金

海中では深く潜るほど、水圧が大きくなって
くる。「そのため海中に入れる海洋観測機器では、
水圧に耐えて計器などを保護するための耐压容器
が必要です」と渡さんはいう。「そのような耐压容
器をつくるには、チタン合金 (Ti-6Al-4V) が最も
望ましい材料です。チタン合金には耐食性があっ
てさびにくいのです。さらに比強度が高い、つま
り軽くて強いことも特徴です」。Ti-6Al-4Vは通称
「64チタン」とも呼ばれ、チタンにアルミニウムを
6%、バナジウムを4%加えた合金である。

「たとえばステンレスなどの鉄系の材料で耐压容
器をつくると、どうしても重くなってしまいます」
と渡さん。「重いと沈んでしまうので、浮力体と呼
ばれる『浮き』のようなものを付け加える必要があ
るため、観測機器全体がどうしても大型化していま
います」。アルミニウムも軽くて丈夫なのだが、そ
のままではさびたり腐食したりしやすいため、フッ
素樹脂などで表面をコーティングする必要がある。
ただ繰り返し使っているうちにコーティングに傷が
付くとそこから腐食してしまうことがあるという。

耐压容器の材料としては最適なチタン合金だが
欠点が1つある。チタン合金製の部品はコストが非
常に高いのだ。「私はフロートや水中グライダーと
いった海洋観測機器の開発に携わっています。以
前、研究者からのリクエストに応じてフロートの設
計をしたとき、コストの見積もりが研究者の考えて
いたものより桁違いに高くなってしまったことがあ
りました。そのとき、チタン合金製の耐压容器のコ
ストが大きなウェートを占めていました」と渡さん。

チタン合金製の部品が高価なのは、チタン合金
そのものの材料費が高いことに加え、製造方法に
も理由がある。チタン合金製の耐压容器をつくる
場合、まずチタン合金の塊を用意し、その塊をく
り抜くように削り取って容器をつくっていく。そ
のため、削り取られた大部分のチタン合金が無駄
になってしまう。また削る際には専用の加工工具
を使うのだが、チタン合金は非常にかたいため、
すぐに工具が摩耗してしまう。そのためほかの材
料に比べて加工コストが上がってしまうのだ。「耐
圧容器の材料としてチタン合金が最も望ましいも
のであることは皆分かっているのですが、ほかの
材料に比べてコストの壁が圧倒的に高いためにな
かなか採用されにくかったのです」

「それをどうにかしたい」と考えた渡さん。「容
器を1個だけつくる場合にはコストの壁を破るのは
難しいのですが、ある程度数をつくるのであれば、
別のつくり方でコストの壁を破れるのではな

いかと思った」という。「チタン合金に関しては、量産を念頭に置いた製造方法がありませんでした。それを一からやってみようと考えました」。そこで渡さんが注目したのが「ロストワックス精密鑄造法」だった。

ロストワックス精密鑄造法とは

ロストワックス精密鑄造法では、まず金型をつくり、その金型にワックス（ろう）を流し込む。ワックスが固まった後で金型を外すと、つくりたい製品と同じかたちのワックスの塊ができあがる。そのワックスの塊の周りにセラミックスなどを吹き付けて鑄型をつくる。その後、熱を加えるとワックスが溶け出し、セラミックスの鑄型のなかで空洞になる。セラミックスの鑄型に製品の材料である金属を溶かして流し込み、金属が冷えた後で外側のセラミックスの鑄型を割ると製品ができあがる。実はもとなる技術は紀元前までさかのぼれるほど古くからある方法だ。渡さんは、ロストワックス精密鑄造法で実績のあるJUKI会津株式会社に協力してもらいながら検討を進めた。

チタン合金製品をロストワックス精密鑄造法でつくことは、一般的によく行われている。たとえば人工関節や航空機のタービンブレードなどだ。ただこれまでつくられていたものはいずれも、比較的小さな物ばかりだった。

ロストワックス精密鑄造法では、「遠心鑄造」と「重力鑄造」の2つの方法がある。遠心鑄造とは、セラミックスの鑄型にチタン合金を流し込むとき、鑄型を回転させながら行う方法だ。回転による遠心力によってチタン合金が隅々まで充填される。しかし遠心鑄造は、装置の関係で、小さな物をつくるときにしか利用できない。「チタン合金は酸素と反応してしまうので、鑄造過程は真空の環境で行う必要があります。真空にすることができ、か

つ高温にできる真空溶解炉という製造装置のなかでぐるぐる回して遠心力を与える必要があるのですが、比較的小さな物しかつくることができないのです」渡さんがつくろうとした容器は、JUKI会津にある日本最大級の真空溶解炉を使っても遠心鑄造を利用できない大きさだったため、重力鑄造でつくることにした。重力鑄造は、セラミックスの鑄型に上から溶けた金属を流し込む方法だ。

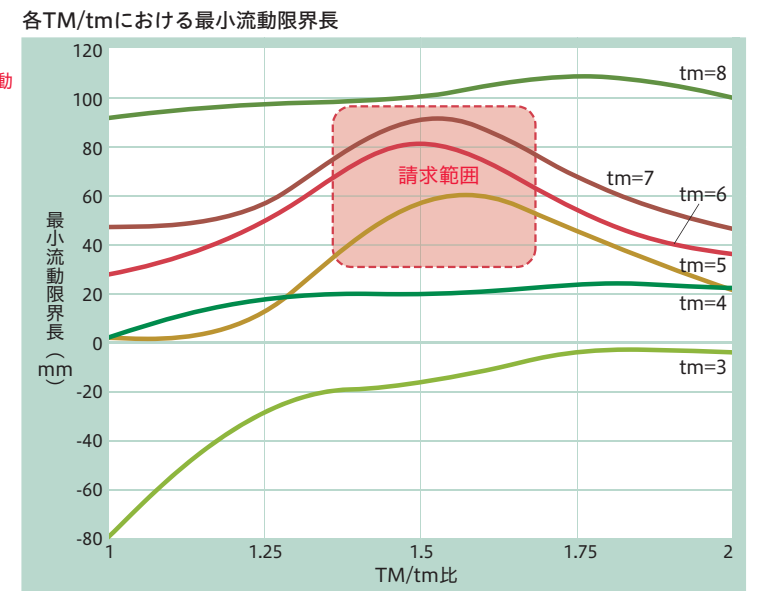
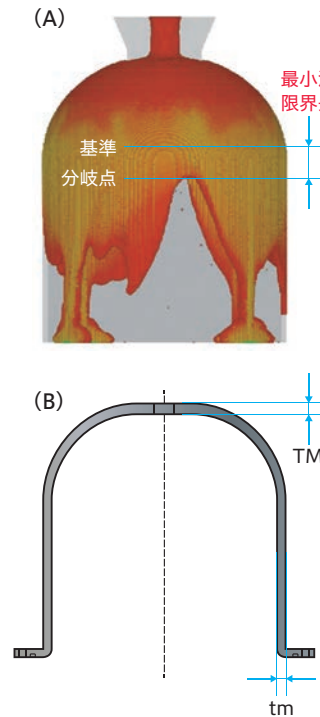
数値解析と試作を繰り返して条件を割り出した

「チタン合金製の容器を重力鑄造でつくるとき、いくつかの壁がありました」と渡さん。セラミックスの鑄型にチタン合金を流し込んだときに途中で固まってしまう、鑄型の隅々までチタン合金が充填されなかったのだ。また、隅々まで充填されたとしても、それが冷えて固まる過程で、チタン合金の内部に「引け巣」と呼ばれる小さな泡のようなものができてしまい、一様な品質にならないという問題も発生した。「チタン合金を流し込むとき、赤外線で熱を加えながら行います。遠心鑄造が可能な程度の小さな物であれば、全体の温度を一律に保ちやすく引け巣もできにくくなります。しかしサイズの大きな物をつくろうとすると、赤外線が当たるところと当たらないところが出てきてしまっていて温度が均質になりづらいため、引け巣が発生しやすくなるのです」

そこでチタン合金を流し込んだときの熱と流れの数値解析をJAMSTECとJUKI会津の双方で行った。どのような形状であれば隅々まで充填される状態になるのか、また、どこに赤外線を当てれば引け巣ができないのかななどを解析した。そして数値解析の結果に沿って、JUKI会津の工場ですべての工程で実際に物を製造した。

そのとき、「特に引け巣の対策が難しく、トライ

耐圧容器を製造するための条件
耐圧容器上部のカーブが終わるところから、溶けたチタン合金が下に流れていったときに流れが分岐するところまでの距離を「最小流動限界長」という（A）。引け巣があまりできないようにするには最小流動限界長が長い方がよい。右のグラフは、縦軸が最小流動限界長になっている。また容器上面の厚みをTM、容器下端の厚みをtmとして（B）、グラフの横軸はTM/tmの値である。それぞれのグラフは、tmの厚さによって色分けしてある。グラフの線が上に膨らんでいるところは、最小流動限界長が長い部分を示しており、tmが5～7mmで、TM/tmの値がある範囲にあるときに現れる。そのような条件を満たすときに、容器の大型化が可能となる。



ロストワックス精密鑄造法でつくった耐圧容器の試作品。内側の空洞部分の直径は22cm。

アンドエラーを何度も繰り返しました」と渡さんはいう。「鑄造後にX線で見ても引け巣だらけだったとか、そういうことが何度もありました。そのたびに条件を変えて解析をしては鑄造し、というのを繰り返しました。そこがかなり時間と手間がかかりましたね」

容器は釣り鐘に似たかたちをしている。上から流し込まれた溶けたチタン合金は、容器の上面から側面部分へと流れていく。溶けたチタン合金の流れが、できるだけ全体的に均一になるような条件を、トライアンドエラーを繰り返すなかから割り出していったのだ。その結果、容器の上面の部分の厚みと、末端部分（側面の下側）の厚みとの比率が、ある範囲に入っていれば、チタン合金がきわめて流れやすい環境になることが分かった。

「製造したものが実際に想定した強度を持っているのかどうかを、JAMSTECにある耐圧試験水槽で水圧を加えて試験をしました。その結果、実際に性能を担保していることを確認した上で特許出願を行いました」

同じ容器を多くつくるほどコストが下がる

ロストワックス精密鑄造法では、金型をつくるコストや、鑄造を行うための環境を整えるための人件費が高くなる。そのため、仮に容器を1個しかつくらない場合はコスト的にあまりメリットはない、と渡さんはいう。一方で、数をたくさんつくるほど1個1個のコストが下がることになる。チタン合金を削り取る加工で、ある程度の大きさの容器をつくると、どうしても1個の容器の製造コストが数百万円ほどになってしまう。ロストワックス

精密鑄造法でつくれば数を多くつくるほどコストが下がるので、数によっては数十万～数万円になることもあると渡さんはいう。

ロストワックス精密鑄造法によるチタン合金製耐圧容器の試作品の設計や製造が行われたのは2013年から14年にかけてのことだ。現在では、この技術を使った耐圧容器が実際の観測機器でも使われている。渡さんらは、JAMSTECが持つ知的財産を社会に生かすためのベンチャー支援制度を利用して、合同会社オフショア・テクノロジーズを設立した。支援制度に基づいて無償で供与される権利のなかに、この製造法の権利も入っており、オフショア・テクノロジーズで、将来、製造・販売するフロートにロストワックス精密鑄造法で製造したチタン合金製の耐圧容器を用いる予定だ。

「フロート以外でも、海底に設置して地震観測を行う海底地震計（OBS）などのように、同じ観測機器を海中にたくさん入れることはよくあります」と渡さん。「現状では海外製が多いのですが、そのような機器を日本でつくろうというときに役に立つ技術になるのではないかと考えています」 **BE**

特許情報

- 特許第6436481号
- 耐圧容器、鑄型、容器側体及びその製造方法

【問い合わせ先】
JAMSTEC 研究資源
マネジメント課
chizai@jamstec.
go.jp

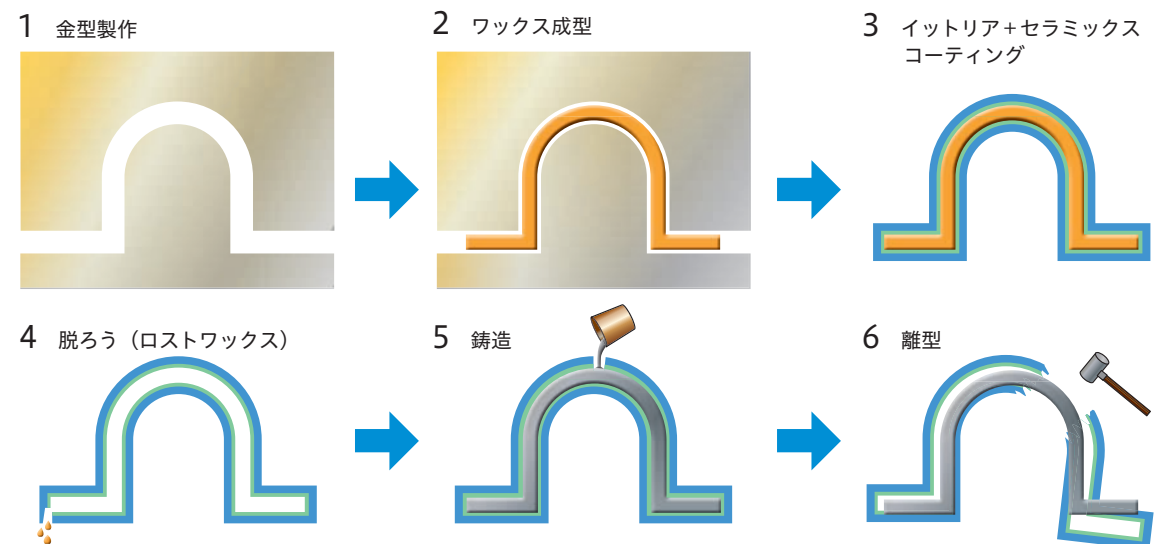
【JAMSTECシーズ集】
JAMSTECの最先端
の研究や技術開発から
生まれた、さまざま
な分野に及ぶ特許を
下記のWEBサイトで
紹介しています。



ロストワックス 精密鑄造法の手順

金型にワックスを流し込んで固まらせ、固まったワックスをセラミックスでコーティングする。ワックスを溶かしたセラミックスの鑄型に溶けた金属を流し込む。最後にセラミックスの鑄型を取り除くと製品が現れる。

※チタン合金は酸素と反応しやすい。それを防ぐために酸素と反応を起こしにくいイットリウム（酸化イットリウム）をコーティングしてからセラミックスをコーティングする。



『海と地球の情報誌 Blue Earth』は 電子版にリニューアルします。

平素は『Blue Earth』をご愛読いただきましてありがとうございます。

JAMSTECの研究成果や活動についてご紹介している

冊子版『Blue Earth』は、今号（160号）で終了し、

次号より電子版『Blue Earth』としてリニューアルいたします。

次号の電子版『Blue Earth』の発行は、8月ごろを予定しておりますが、最新情報につきましては当機構ホームページでお知らせいたします。

電子版『Blue Earth』は、デジタルの特徴を生かし、

より充実した情報をお届けする媒体として生まれ変わりますので、

今後とも変わらぬご支援を頂きますよう、

お願い申し上げます。

（電子版『Blue Earth』は当機構ホームページから

無料でご利用いただける予定です）

定期購読の終了について

電子版『Blue Earth』の発行に伴い、冊子版『Blue Earth』の定期購読のお申し込みは終了いたします。

なお、160号までの冊子版『Blue Earth』のバックナンバーは引き続きご購入いただけますので、ご希望の方は下記までお問い合わせください。

バックナンバーのご案内

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

学校・教育関係の皆さまへ

学校・教育関係の皆さまには、引き続き、印刷した『Blue Earth』をお送りいたします。図書館での配架など学生・教職員の皆さまの閲覧にご高配いただければ幸いです。

お問い合わせ・バックナンバー購入など

〒237-0061 神奈川県横浜須賀町夏島町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

■ 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。

賛助会（寄付）会員名簿 2019年3月31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	株式会社カネカ
株式会社アイケイエス	川崎汽船株式会社
株式会社アイウエントプライズ	川崎近海汽船株式会社
株式会社アクト	川崎重工業株式会社
朝日航洋株式会社	川崎地質株式会社
アジア海洋株式会社	株式会社環境総合テクノス
株式会社天野回酒店	株式会社キュービック・アイ
株式会社アルファ水工コンサルタンツ	共立インシュアランス・ブローカーズ
株式会社安藤・間	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
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社	極東貿易株式会社
潮冷熱株式会社	株式会社きんでん
株式会社エス・イー・エイ	株式会社熊谷組
株式会社エスイーシー	クロバテック株式会社
株式会社SGKシステム技研	株式会社グローバルソリューション
株式会社エヌエルシー	ディベロップメント
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ナーコーポレーション	京浜急行電鉄株式会社
株式会社MTS雪氷研究所	鉦研工業株式会社
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
海洋電子株式会社	国際ビルサービス株式会社
株式会社化学分析コンサルタント	株式会社COAST
鹿島建設株式会社	コスモ商事株式会社

株式会社コノエ	株式会社ソリッド・ソリューションズ
株式会社コベルコ科研	株式会社ソルトン
五洋建設株式会社	損害保険ジャパン日本興亜株式会社
株式会社コンボン研究所	大成建設株式会社
相模運輸倉庫株式会社	ダイハツディーゼル株式会社
佐世保重工業株式会社	大陽日酸株式会社
三洋テクノマリン株式会社	有限会社田浦中央食品
三和化成工業株式会社	株式会社竹中工務店
株式会社ジーエス・ユアサテクノロジー	株式会社地球科学総合研究所
JFEアドバンテック株式会社	中国塗料株式会社
株式会社JSP	中部電力株式会社
株式会社JVCケンウッド	株式会社鶴見精機
シチズン時計株式会社	株式会社帝國機械製作所
株式会社シナネン株式会社	株式会社テザック
株式会社シーフロアコントロール	寺崎電気産業株式会社
清水建設株式会社	株式会社寺本鉄工所
清水港振興株式会社	東亜建設工業株式会社
シモダフランジ株式会社	東海交通株式会社
ジャパンマリンユナイテッド株式会社	洞海マリンシステムズ株式会社
シュルンベルジェ株式会社	東京海上日動火災保険株式会社
株式会社昌新	東京製綱繊維ロープ株式会社
株式会社商船三井	株式会社東京チタニウム
新日鉄住金エンジニアリング株式会社	東北環境科学サービス株式会社
須賀工業株式会社	東洋建設株式会社
鈴与株式会社	株式会社東陽テクニカ
セイコーウオッチ株式会社	株式会社東和製作所
株式会社清友農材センター	トピー工業株式会社
株式会社関ケ原製作所	トーホーテック株式会社
石油開発サービス株式会社	新潟原動機株式会社
石油資源開発株式会社	西芝電機株式会社
セコム株式会社	株式会社ニシヤマ
セナーアンドバーンズ株式会社	日油技研工業株式会社

株式会社日産電機製作所	古河電気工業株式会社
ニッスイマリン工業株式会社	古野電気株式会社
日東電工株式会社	株式会社ベッツ
株式会社日放電子	松本徽章株式会社
日本アキュムレータ株式会社	マリメックス・ジャパン株式会社
日本エヌ・ユー・エス株式会社	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
日本海工株式会社	株式会社マルトー
日本海洋株式会社	三鈴マシナリー株式会社
日本海洋掘削株式会社	三井E&S造船株式会社
日本海洋計画株式会社	株式会社三井E&Sマシナリー
日本海洋事業株式会社	三井住友海上火災保険株式会社
一般社団法人日本ガス協会	三菱重工業株式会社
日本軽金属株式会社	三菱スペース・ソフトウェア株式会社
日本サルヴェージ株式会社	三菱造船株式会社
日本水産株式会社	三菱電機株式会社
日本電気株式会社	三菱電機特機システム株式会社
日本ペイントマリン株式会社	株式会社森京介建築事務所
日本マントル・クエスト株式会社	八洲電機株式会社
日本無線株式会社	ヤンマー株式会社
日本郵船株式会社	郵船商事株式会社
株式会社ハイドロシステム開発	郵船ナブテック株式会社
濱中製鋼工業株式会社	株式会社ユー・エス・イー
ハリマ化成株式会社	株式会社落雷抑制システムズ
東日本タグボート株式会社	株式会社ラジアン
日立造船株式会社	株式会社ロボット
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
古野電気株式会社	株式会社ベッツ
株式会社ベッツ	松本徽章株式会社
松本徽章株式会社	マリメックス・ジャパン株式会社
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
株式会社マリン・ワーク・ジャパン	株式会社マルトー
株式会社マルトー	三鈴マシナリー株式会社
三鈴マシナリー株式会社	三井E&S造船株式会社
三井E&S造船株式会社	株式会社三井E&Sマシナリー
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
三井住友海上火災保険株式会社	三菱重工業株式会社
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
三菱スペース・ソフトウェア株式会社	三菱造船株式会社
三菱造船株式会社	三菱電機株式会社
三菱電機株式会社	三菱電機特機システム株式会社
三菱電機特機システム株式会社	株式会社森京介建築事務所
株式会社森京介建築事務所	八洲電機株式会社
八洲電機株式会社	ヤンマー株式会社
ヤンマー株式会社	郵船商事株式会社
郵船商事株式会社	郵船ナブテック株式会社
郵船ナブテック株式会社	株式会社ユー・エス・イー
株式会社ユー・エス・イー	株式会社落雷抑制システムズ
株式会社落雷抑制システムズ	株式会社ラジアン
株式会社ラジアン	株式会社ロボット
株式会社ロボット	

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 神奈川県横浜須賀町夏島町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31巻 第2号（通巻160号）2019年4月発行

発行人 豊福高志 国立研究開発法人海洋研究開発機構 海洋科学技術戦略部

編集人 田村貴正 国立研究開発法人海洋研究開発機構 海洋科学技術戦略部 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

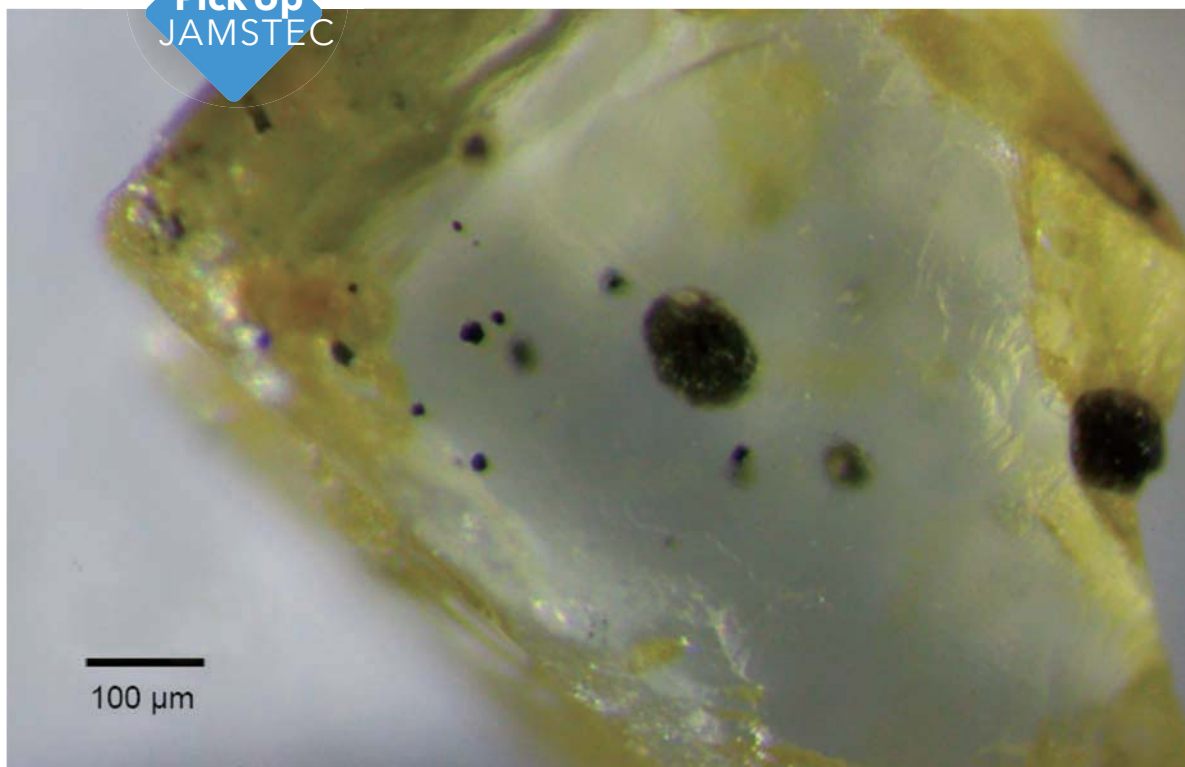
取材・執筆・編集 立山 晃（p6-7）、鈴木志乃（p1-5、p10-19、p22-25、裏表紙）
岡本典明／ブックブライツ（p8-9、p20-21、p28-31）、坂元志歩（p26-27）

デザイン 株式会社デザインコンピビア
（飛鳥井羊右、山田純一、岡野祐三）

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。

Pick Up
JAMSTEC

南太平洋オーストラル諸島の海洋島火山から採取した玄武岩中のかんらん石。黒い部分がメルト包有物で、マグマが取り込まれている。

海水由来の塩素がマントルに大量貯蔵されていた

写真は、南太平洋オーストラル諸島の海洋島火山から採取された玄武岩中のかんらん石である。黒い部分は、地下のマグマだまりでかんらん石の結晶が成長するときに取り込まれたマグマだ。メルト包有物と呼ばれ、結晶が容器の役割を果たすことで、地表に噴出した際にも脱ガスせずに塩素などの揮発性元素を保持している。

地球内部物質循環研究分野 研究員の羽生 毅さんらは、このメルト包有物に含まれる揮発性元素の組成を測定。海水の主要な構成元素である塩素は、地球が形成されたときにマントルに封入されていたものが、火山活動などを通じてマントルから供給されたことが分かっている。では、塩素の移動は一方通行なのか、海水からマントルへの還流もあるのか。それを明らかにすることが目的だ。

メルト包有物は50～250μmと微小なため、測定には先進的な局所分析装置を使用した。その結果、マグマ源に含まれる海洋地殻の成分量が増えるほど塩素の量も増えることが分かった。これは、海水由来の塩素が海洋地殻に取り込まれ、その沈み込みに伴って深さ2,900kmの下部マントルへ運搬、貯蔵され、マントルブルームによる火山活動で再び地表に放出されるという、塩素の大循環が起きていることを示している。

そうした大循環が40億年間継続していたとすると、海水からマントルへ運ばれた塩素量は、少なく見積もっても現在の海水に含まれる塩素量の20～40%にも達する。下部マントルが地球の主要な塩素貯蔵庫となり、地球表層の塩素量を抑制する役割を果たしていることを示唆する。塩素は生物にとって必須元素だが、塩素（塩分）が過剰な環境は多くの生物にとって生息に適さない。今回の発見は、地球内部の活動が生命進化に影響していた可能性も示している。

(所属・肩書きは取材当時のものです)

詳細はプレスリリースをご参照ください。

http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20190118/



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



定価 本体286円＋税