

Blue Earth

海と地球の情報誌

ISSN 1346-0811
2018年12月発行
隔月年6回発行
第30巻 第6号
(通巻158号)



158 Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

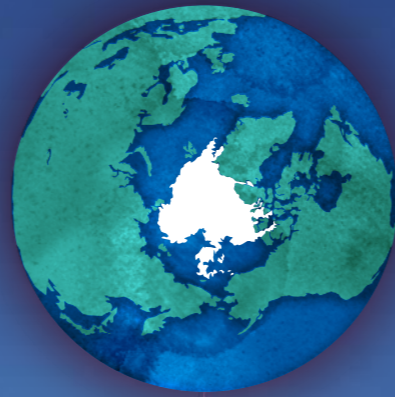
北極の海氷減少が もたらすもの

人工知能を用いて
“熱帯低気圧のタマゴ”
を検出する

深海生物の餌を知る方法

海洋掘削科学を支える
IODPキュレーター





北極の海氷減少が もたらすもの

北極海の夏の海氷面積は過去に比べてとても小さくなってきている。
ほかの地域に比べて北極は地球温暖化の影響を受けやすく、
北極海の海氷は今後も減り続け、やがて夏季の北極海では消失してしまうと予測されている。
海氷は海の“ふた”のような役割をして、海と大気が接するのを妨げてきた。
その“ふた”がなくなっていくことで、果たして何が起きるのだろうか。
これまで明らかになっている科学的知見や、今後に向けた
技術開発について紹介しよう。

- 1 **特集**
**北極の海氷減少が
もたらすもの**
- 14 **Aquarium Gallery**
マリホ水族館
激流で生きる——ゴギ
- 16 **私がIODPで解きたい謎**
海洋掘削科学を支える
IODPキュレーター
Lallan P. Gupta
高知コア研究所 科学支援グループ グループリーダー代理
IODPキュレーター
- 20 **社会とつながるJAMSTEC**
人工知能を用いて
“熱帯低気圧のタマゴ”を検出する
松岡大祐
地球情報基盤センター 先端情報研究開発部
情報・計算デザイン研究開発グループ 技術研究員
科学技術振興機構 さきがけ研究者（兼任）
- 24 **JAMSTEC生まれの種たち**
特定DNAの数を
網羅的に定量する方法を発明
星野辰彦
高知コア研究所 地球深部生命研究グループ 主任研究員
- 28 **Marine Science Seminar**
飼う、みる、測る
深海生物の餌を知る方法
野牧秀隆
生物地球化学研究分野 主任研究員
- 32 **BE Room**
Information
第21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!
- 裏表紙 **Pick Up JAMSTEC**
「ちきゅう」、プレート境界断層を
目指し掘削中!



取材協力

菊地 隆

北極環境変動総合研究センター センター長代理

小室芳樹

北極環境変動総合研究センター
北極域気候変動予測研究ユニット ユニットリーダー

安中さやか

北極環境変動総合研究センター
北極環境・気候研究ユニット 研究員

藤原 周

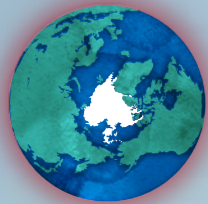
北極環境変動総合研究センター
北極環境・気候研究ユニット 技術研究員

杉江恒二

北極環境変動総合研究センター
北極海洋生態系研究ユニット 技術研究員

石橋正二郎

北極環境変動総合研究センター
北極観測技術開発ユニット 主任技術研究員



北極はすでに後戻りできない状態 になってしまった

2016年北極航海にて、作業艇より撮影した「みらい」。
撮影：坪根 聡/株式会社インターリンク

取材協力

菊地 隆

北極環境変動総合研究センター
センター長代理

「数年前までは、北極が予測をはるかに上回るペースで急速に変化しつつあるといわれていました。しかし現在では、そのような進行形ではなく、北極はすでに『new state (新しい状態)』に変わってしまったといわれるようになってきました。そう語るの菊地隆さんだ。「気温が上昇している、海水が減っている、永久凍土が融けて縮小しつつある、水循環が変わりつつある、生態系にも影響が及ぶようになっている……。こういったことが極めて速く進み、以前には戻れない新しい状態になってきた、北極はすでに変質してしまったといわれるようになってきているのです」

北極に関するさまざまな問題を政府間のハイレベルで話し合う場として北極評議会がある。北極評議会は、北緯66.5度より北に国土を持つ北極圏の8カ国（カナダ、デンマーク、フィンランド、アイスランド、ノルウェー、ロシア、スウェーデン、アメリカ）と、先住民団体6団体が主要メンバーとなっている。さらに、日本も含めた北極圏以外の国13カ国などがオブザーバーとして参加している。

「私たち研究者は、北極評議会での議論のためのもとになる科学的知見を取りまとめた報告書を出しています。そのうちの1つが、雪氷や水、永久凍土などに関する環境影響評価報告書『SWIPA』です。SWIPAでは、北極に関して、6つの『Key Findings』(重要な所見)が挙げられています」と菊地さん。それらのKey Findingは次の通りだ。

1. 北極の気候は、すでに新しい状態に移っている。
2. 北極の気候変化は、極めて速く進行している。
3. 変化は、少なくとも今世紀なかごろまでは続く。
4. 温室効果ガス排出の本質的な削減が、今世紀なかごろ以降の影響を安定化できる。
5. 適合策が、脆弱性を低減することができる。
6. 効果的な緩和・適合策には、北極の気候変化について精通する必要がある。

二酸化炭素(CO₂)の排出が現状のまま続くと、地球全体の平均気温は2100年には現在よりも4~5℃上昇すると予測されている。ただしCO₂の排出を抑えることで、気温上昇を2~3℃以上抑えることができるとみられている。北極に関しては「全球と比べて変化の度合いが2倍から3倍ほど大きくなります。特に秋や冬だけを取り出してみると、さらに温度上昇が激しくなるとみられています」と菊地さん。北極は、ほかの地域に比べて温暖化の影響を特に大きく受ける。このような現象のことを「北極の温暖化増幅」と呼んでいる。

現在、北極の夏の海水の面積がどんどん小さくなっており、21世紀半ばくらいには海水がなくなるかもしれないといわれている。海水やその上に載っている雪は白いため、太陽光を反射する。雪氷面の反射率は最大85%もあるのに対して、海面の反射率は7%程度だ。そのため海水が融けることで、太陽光によって海水が暖められることになる。夏に海水に蓄えられた熱は、秋~冬の気温上昇につながって結氷を遅らせる。その結果、海水ができる量が減少する。海水の量が少なくなると、翌年の夏の海水は以前よりも融けやすくなる。北極では、こういった増幅機構が働くのだ。

海水が減ると、人間生活にも影響が出る。その一例が波浪に関することだ。「北極海では海水が海面を覆い、波の発生を抑えていました。海水が減少し、さらに低気圧も以前より強くなってきたことで、波

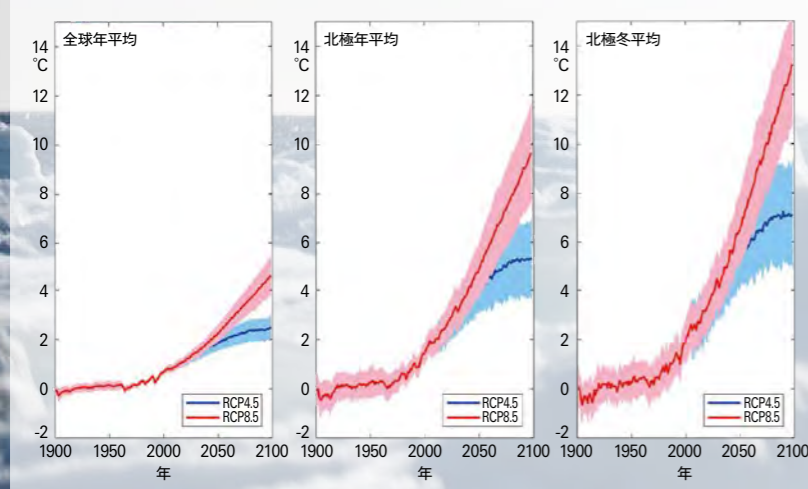
浪や高潮によって沿岸の人々の生活に影響が出ています」

「北極で気温上昇が進むと、海水減少だけではなくさまざまな現象が起きると考えられます」と菊地さんは続ける。たとえば永久凍土の融解や水循環の変化、海水温の上昇や、海水の淡水化、酸性化などが起こる可能性があるという。

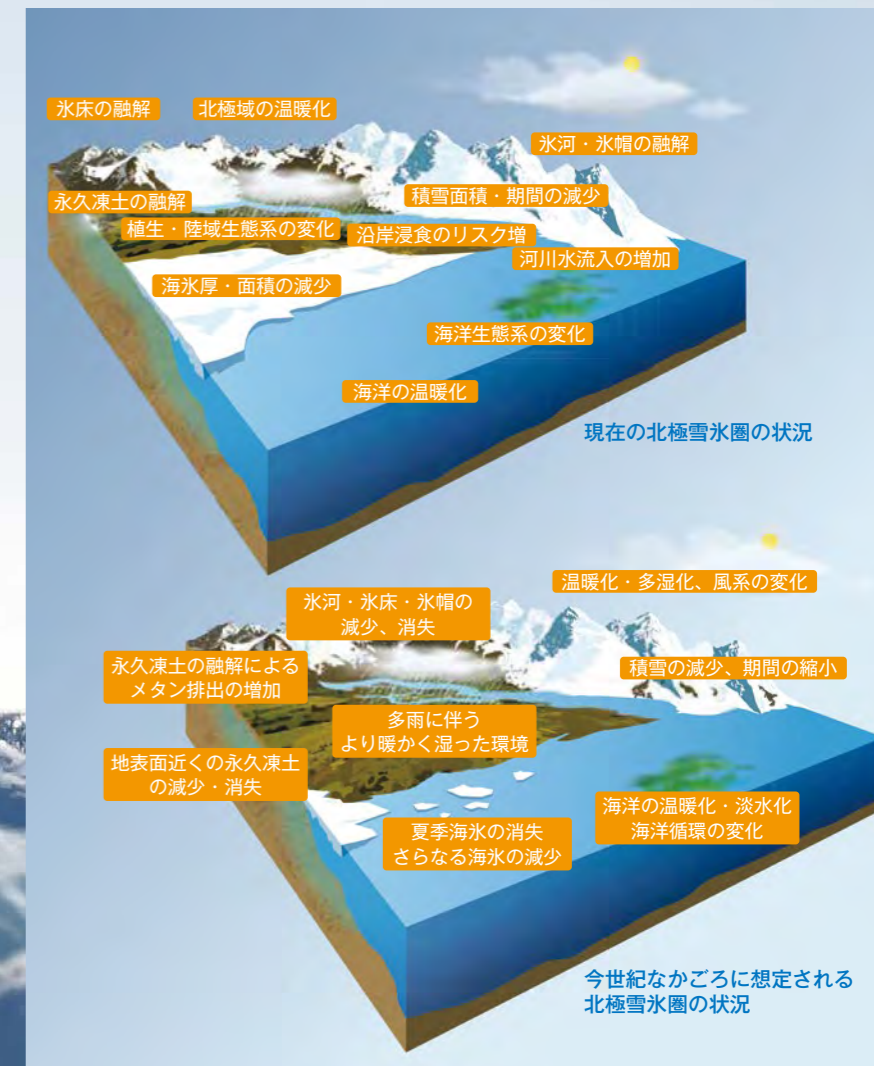
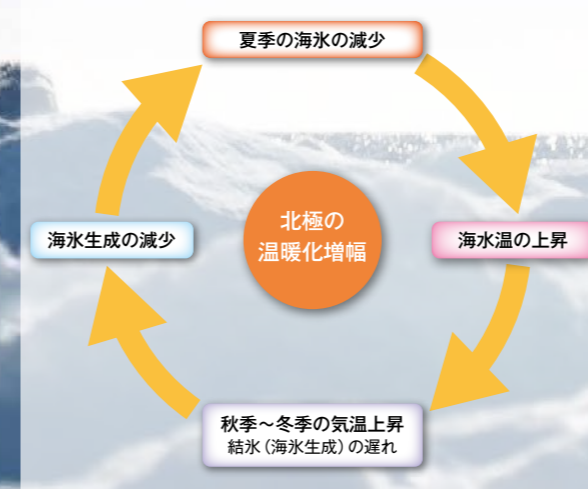
「陸上の氷河・氷床は、海水面上昇にも関係します。永久凍土の融解は温室効果ガスであるメタンの放出にもつながります。そういったものが風や海洋循環などさまざまな現象の変化につながり、植生や生態系の分布も変わってきます」と菊地さん。「北極圏の人たちの生活に影響が出るだけでなく、航路や資源、観光、社会、気候変動など、北極圏外の人たちにも、さまざまな影響が出てくるでしょう。そうした理由から、北極について注視していかなければならないと考えられているのです」

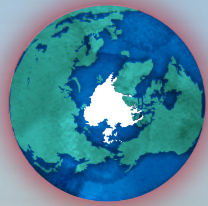
北極雪氷圏の現在の状況と今世紀なかごろに想定される状況。(SWIPA 2017より)

全球および北極域の平均気温の変化。赤線はCO₂の排出量が現状のまま続いた場合、青線はCO₂の排出を抑えた場合の気温である。北極に関して見ると、全球年平均(左)と比べて変化の度合いが2~3倍大きくなっている(中央)。特に冬の平均を取り出してみると(右)、さらに温度上昇が激しくなるとみられている。(SWIPA 2017より)



北極の温暖化増幅





コンピュータで予測する、将来の北極海の海水減少

2018年、アムンゼン湾を進むカナダ沿岸警備隊の砕氷船「ローリエ」より。
撮影：小野寺丈尚太郎／地球環境観測研究開発センター

取材協力

小室芳樹

北極環境変動総合研究センター
北極域気候変動予測研究ユニット
ユニットリーダー

ある海域の海面に対して海水に覆われている海面の割合を「海水密度」と呼ぶ。北極では、毎年夏になると海水密度が最小になる。1979年以降の各年の最小日における海水の分布を見ると、1980年代は最小日であっても北極海のほとんどが海水に覆われていた。90年代から海水に覆われない海域が増え始め、2000年を過ぎるころから海水減少が顕著になってきた。2012年には海水密度が過去最小を記録した。

海水の厚みも薄くなっている。人工衛星による上からの観測で海水の厚みを計測することは難しいため、海水の厚さは現場観測に気候モデルによる計算からの情報を加えて見積もられている。「モデルから導き出した海水の体積と、衛星観測で得られた海水面積とを比べてみると、面積より体積の方が早期から減っていることが分かった」と小室芳樹さんはいう。

では、北極の海水は今後どうなっていくのだろうか。

将来を予測したくとも、現実の地球を使って実験

することはできない。そこでまず地球を物理的に理解して方程式で記述した上でコンピュータのなかに地球のモデルをつくり、そのモデルを使って実験を行う。この地球のモデルを「気候モデル」や「数値モデル」などという。

「モデルは現実をデフォルメしたもので、現実の地球の将来を正しく示しているとは限りません。デフォルメの仕方によって結果が異なります」と小室さんはいう。「ただし、1つのモデルによる予測が心もたなくても、世界中の研究者がつくった各気候モデルの実験結果を持ち寄って検討すれば、1つのモデルによる予測よりも信頼性が高くなります」と小室さん。

そこで立ち上げられたのが「CMIP（結合モデル相互比較プロジェクト）」だ。CMIPは、気候モデルの結果を比較検討するための国際的な枠組みである。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価報告書に先立って行われたCMIP第5期計画（CMIP5）では、JAMSTEC、東京大学、国立環境研究所で共同開発された気候モデル「MIROC5」も

含めて世界中から20を超えるモデルが参加した。

最も激しく温暖化が進行するシナリオで将来の気候を予測したところ、大多数のモデルで21世紀中に夏の北極海の海水が消えるという結果になった。ただし、海水消失の時期についてはモデルによってばらつきが大きかった。

「モデルの予測結果が信頼できるものなのかどうか、たとえば50年後の結果を見てもそれが正しいかどうかを現時点で判断することはできません。そこでモデルの信頼性を見るときは、過去の再現性の高さを指標にします」と小室さん。海水の過去の変動の再現性が高い5つのモデルをピックアップして予測値を見たところ、2040～60年ごろに海水が消失するだろうという結論に至った。

小室さんによれば、最近では海水の動きも注目されているという。海水減少によって、海水に隙間が現れる。隙間があると海水が動きやすくなる。「そのことが海水の増減にどう影響するのか、はっきりしたことは分かっていません。ただ、2012年に海水が最小になったこととも関連があるのではないかとわ

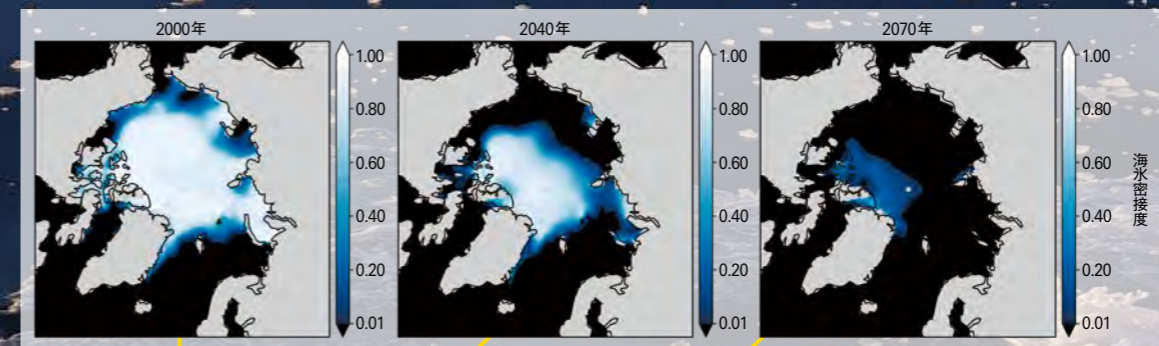
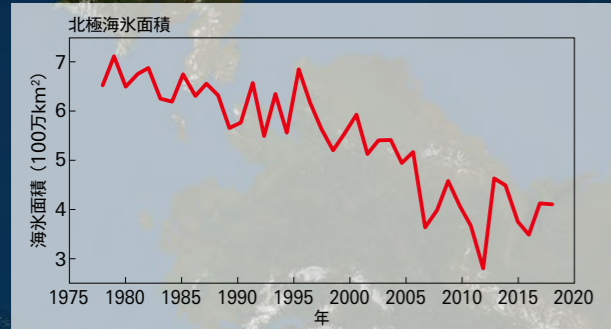
れています。2012年8月、北極海の強い低気圧の影響で、海水がまばらな海域に強い南風が吹きました。それをきっかけとして起きた一連のプロセスによって、海水が大きく減ったと考えられています」

「よりよい将来予測のためには、気候モデルを海水の現実近づけることが重要です」と小室さん。たとえばMIROC5をはじめ多くの気候モデルでは、海水は1辺50kmほどのサイズのメッシュのなかに浮かぶ1枚の板という、非常に簡略化された表現がなされている。ところが実際の海水は、大きさもかたちもさまざまだ。「現実に近い海水の情報をモデルに取り込むことが必要になるでしょう。そのためにも、いままで以上に実際に海水がある海域に行き観測を行うことが重要になると考えています」

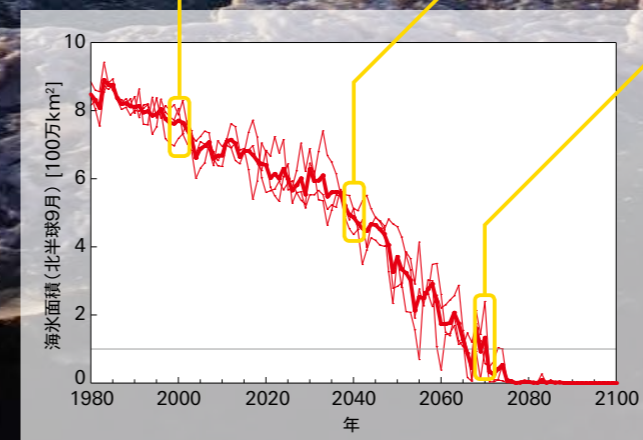
またモデルが正しいかどうかの判断に使える観測データを増やすことも重要だ、と小室さんは続ける。「最近、人工衛星のデータから、海水の厚さを推定できるようになってきました。現在使われている手法では、まだ夏の海水の厚さを推定できませんが、予測の立場からは今後の発展に期待したいところです」

これまでで最も海水面積が小さくなった、2012年9月の北極海の海水の様子。©NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio. The Blue Marble data is courtesy of Reto Stockli (NASA/GSFC).

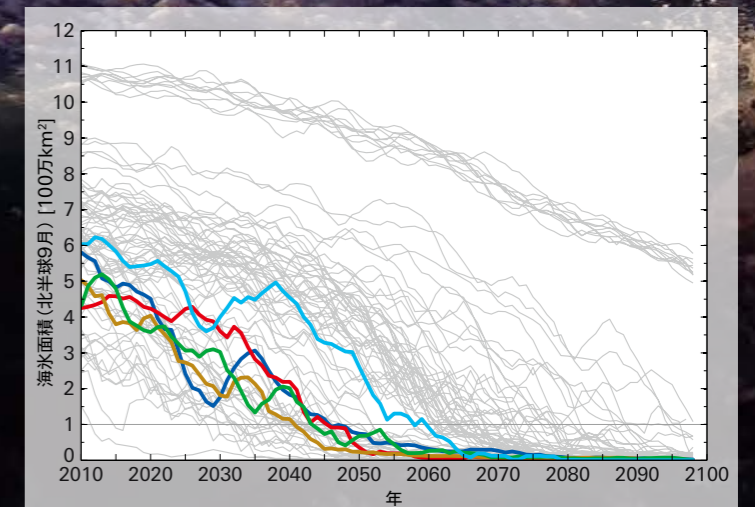
北極では1年のうち、9月ごろに海水面積が最も小さくなる。20世紀末以降、北極海の海水面積は減り続けており、2012年には海水は最小面積を記録した。

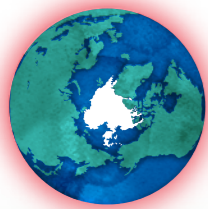


CMIP5での北極海の海水面積の将来予測。最も激しく温暖化が進行するシナリオでの予測結果である。過去の変動をよく再現しているモデルの結果を抽出して色付けたものだ。2040～60年に北極海の海水が消失すると予測されている。



MIROC5による北極海の海水の将来予測。最も激しく温暖化が進行するシナリオの場合、2070～80年ごろに海水が消失すると予測されている。なお、このような話題で使われる「海水が消失」という表現は、夏の海水面積が100万km²未満になることを指す。





海氷が減少した北極海の二酸化炭素吸収量が明らかに

取材協力
安中さやか
北極環境変動総合研究センター
北極環境・気候研究ユニット
研究員

大気中に放出される人為起源の二酸化炭素(CO₂)の半分ほどは、陸と海に吸収されている。海によるCO₂吸収は、温暖化を考える上で重要だ。

ただし、海がどこでも一様にCO₂を吸収しているわけではない。大気と海の間では、CO₂の交換が行われており、CO₂を吸収する海もあれば、大気中に放出する海もある。大気—海洋間のCO₂の交換量は、海洋と大気CO₂分圧の差、海上を吹く風の強さ(風速)、海水密度から計算できる。

「北極海では海水が“ふた”の役割を果たすため、CO₂の交換はほぼないと考えられてきました」と安中さやかさんという。「しかし近年は、海水が減少して大気と直接触れる海域が増えています。さらに、海水は1枚岩のようなものではなく、小さな穴が開いていて空気が通り抜けられることも分かってきました」と安中さん。海水温が上がると海のCO₂分圧は上昇し、海水温が下がるとCO₂分圧は低下する性質がある。大気と海の間ではCO₂分圧が高い方から低い方へとCO₂が移動する。低温の北極海はCO₂分圧が低いので、CO₂の重要な吸収域となる可能性が指摘されていた。

「大気CO₂分圧や風速、海水密度は観測や数値モデルによって分布などを把握できるので、海のCO₂分圧が分かれば、北極海でのCO₂の交換量を計算できます」と安中さん。海洋のCO₂分圧の測定は、主に船舶による現場観測で行われる。しかし、北極海は海氷に覆われているために、観測数が非常に少

ない。「大気—海洋間のCO₂の交換量を地球全体で見積もろうとする際に、北極海だけ直接の見積もりができていませんでした」

そのような状況のなかで安中さんは、北極海の観測値のない海域についても海洋のCO₂分圧の値を推定する手法を開発した。すでにCO₂分圧の観測値がある海域のなかから、水温や塩分、海水密度などといった環境が最も似通った場所を探す。その海域のCO₂分圧をもとに、観測値のない海域のCO₂分圧を推定するのだ。

「その手法を用いて見積もったCO₂分圧をもとに、1997年1月から2014年12月までの大気—海洋間のCO₂の交換量の分布図を、1ヵ月につき1枚、合計216枚得ることができました」と安中さん。そして、その分布図からさまざまなことが明らかになった。

1997年から2014年までの18年間の、大気—海洋間のCO₂の交換量の平均を見ると、全域でCO₂を吸収していた。ただし一様に吸収しているわけではなく、グリーンランド海やバレンツ海、チュクチ海で吸収が大きくなっていた。「これらの海域は特に風が強く、北極海の中では比較的海水が少ないために、CO₂の吸収が大きくなっていると考えられます」と安中さん。

また季節変化を見ると、グリーンランド海とノルウェー海では、秋から冬にかけてCO₂の吸収が大きくなっていた。一方、チュクチ海では、夏から秋にかけて吸収が大きくなっていた。「チュクチ海は、冬

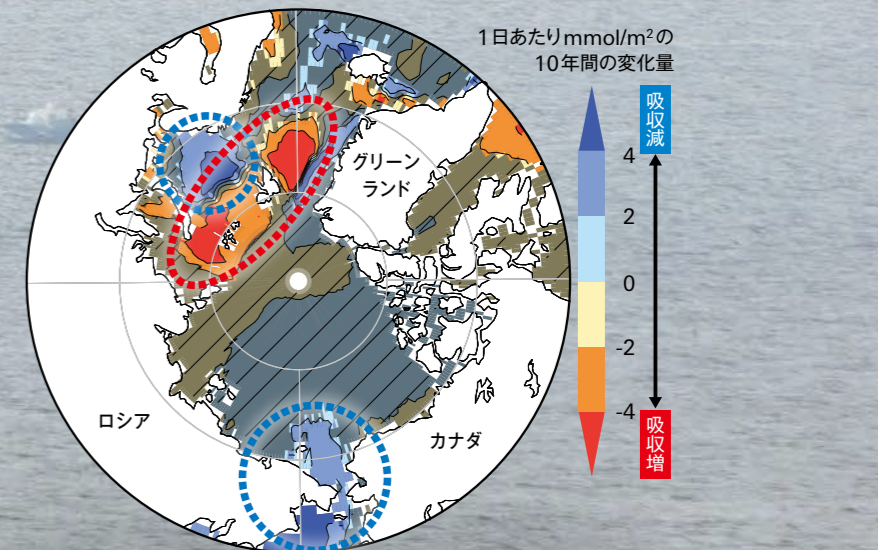
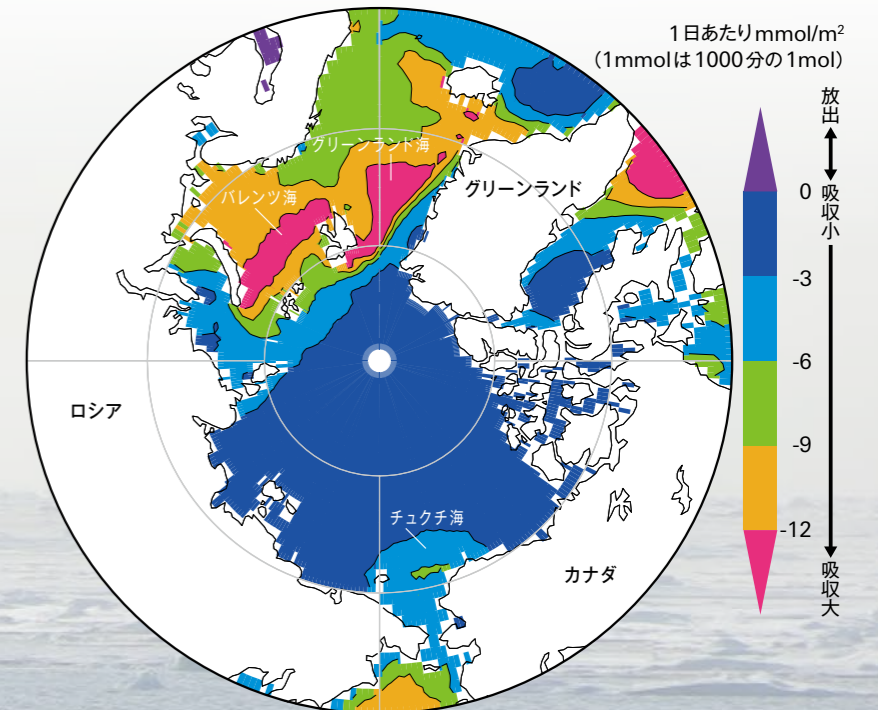
の間はほぼ海氷に覆われていますが、夏には海水が少なく、またその時期にちょうど大気と海洋間のCO₂分圧差が大きくなるために大きな吸収があること、秋は風が強くなるために吸収が大きくなることが分かりました」

「長期的な変化傾向を見ると、海域によって増減があります」と安中さん。海水が減少すると、大気と海水が接する面積が増えるのでCO₂の吸収量は増加する。一方で水温が上昇して吸収が減少する海域もある。北極海全体で足し合わせてみると、現在のところ±0の状態になっているという。

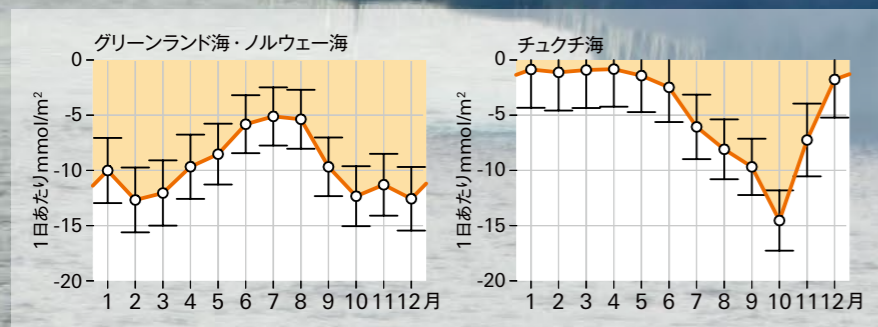
「北極海全体での1年間のCO₂の吸収量を見積もったところ、1.8±1.3億トンの吸収があることが分かりました」と安中さん。これは海洋全体が吸収しているCO₂の約10%の量に相当する。面積で見れば、北極海は海洋全体の約3%しかない。北極海はCO₂の重要な吸収源になっているのだと安中さんという。

「北極海におけるCO₂の吸収量が今後どうなるかは、さまざまな要因があってよく分かっていません。私たちにできることは、今後も注意深く監視していくことだと思います」と安中さん。「この研究の結果は、地球全体のCO₂の収支の見積もり、ひいては地球温暖化の将来予測における不確実性の軽減にも貢献できるのではないかと考えています。また北極海における海洋酸性化の実態把握にもつながると考えています」

北極海での大気—海洋間のCO₂交換量。1997年から2014年までの18年間を平均したものである。全域で吸収しているが、海域によって吸収量の大きさが異なっていた。

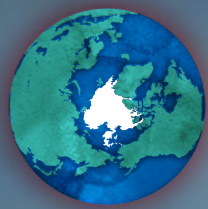


CO₂交換量の長期的な変化を示したもの。青は吸収が減っているところ、赤は増えているところを示している。グリーンランド海やバレンツ海北部では吸収量が増加していた。この海域では、海水の減少による効果が大きい。一方、チュクチ海やバレンツ海南部では吸収量が減少していた。海水は減少しているが水温が上昇したため、大気—海洋間のCO₂分圧差が減少したことで、CO₂の吸収量が減ったのである。



グリーンランド海・ノルウェー海と、チュクチ海におけるCO₂交換量の季節変化。同じ北極海周辺でも、海域によって異なる季節変化をしていることが分かった。

2008年、北極海を航海中の「みらい」より。
撮影：藤原 周 / 北極環境変動総合研究センター



海水減少に左右される北極海の植物プランクトンの運命

2008年、北極海を航海中の「みらい」より。
撮影：藤原 周 / 北極環境変動総合研究センター

取材協力

藤原 周

北極環境変動総合研究センター
北極環境・気候研究ユニット
技術研究員

「海水は、光や熱、風のエネルギーが海面から海中に伝播することを遮る海の“ふた”の役割を持ちます。海水が減少して“ふた”がなくなることは、海洋生物にも大きく影響します」。そう語るのは、植物プランクトンの研究を進める藤原周さんだ。「植物プランクトンに及んだ変化は、食物網を通じて生態系全体に伝播していくため、海水減少に対する植物プランクトンの応答を把握することは重要です」

海では、太陽光は海面付近に多く、栄養は深い方に多い。植物プランクトンの増殖は、これらの光と栄養のバランスで決まると藤原さんはいう。

北極海の冬は日照時間が極めて短く、また海水に覆われるため海中は非常に暗く、植物プランクトンはほとんど増殖できない。その結果、海中には豊富な栄養が蓄えられる。春から初夏にかけて日照時間が伸び、また日射が強くなるころに海水が融けると、豊富な栄養と光を獲得して植物プランクトンは「ブルーム」と呼ばれる大増殖を起こす。真夏になると、海面が暖められてできる暖水層や海水の融け水による低塩層が、下層からの栄養供給を壁のように妨げる働きをする。そのため植物プランクトンが最も増殖するのは、光がぎりぎり届き栄養が豊富な深い層となる。植物プランクトンが増殖する深度が次第に

深くなっていき、やがて結氷を待つことになる。

「過去20年間で、北極海の大部分で基礎生産量（植物プランクトンの生産量）が増えています。そして基礎生産量が増えた海域と、海水に覆われていない期間が長くなった海域との地理的分布は一致しています」と藤原さん。「海水に覆われていない期間の増加は、植物プランクトンが光合成できる期間の増加を意味します。また、海水面積の減少は、光合成できる海域の増加を意味します。その両面の理由から、近年の基礎生産量が増加の一途をたどっているのです」

北極海では海水融解の直後にブルームが発生する。ベーリング海からチュクチ海にまたがる陸棚域での海水融解のタイミングはここ20年で1~2ヵ月も変化していた。「調査の結果、海水融解が早まると、春のブルーム期間中において大型の植物プランクトンが増え、またブルームの規模が増大する海域が広がることが分かりました」と藤原さん。「海水融解が遅い年は、海水が融けるのが夏至に近い時期になります。強い日射を受けて海面に暖水層が発達して下層からの栄養供給も抑えられ、ブルームが収束しやすくなります。一方で、海水融解が早い年は、まだ日射が強くない時期なので海面の受ける熱が比

較的少なく、すぐには暖水層が発達しないため、継続的に下層からの栄養供給が起こります。結果的に、優先的に栄養を獲得できる大型の植物プランクトンが増加し、ブルームの規模も増大すると考えられます」

「北極海では、最近30年間で秋に強風の日が増えており、海水減少によって海が荒れやすくなっています」と藤原さん。荒れる海が生態系に及ぼす影響を調べるため、藤原さんたちは2013年の海洋地球研究船「みらい」の航海で、低気圧が通過する前後での海洋環境や植物プランクトンの分布の変化を調査した。

その結果、強風が吹いた後は、表層の優占群集（生物量が多い種類）が入れ替わったという。「強風前は、海洋表面付近には3~4℃の暖水層があり、栄養は上までたどり着けない状態でした。強風によって表面付近の海水がかき混ぜられたため、下層にいた元気な植物プランクトン群集が栄養と共に光の多い上層に持ち上げられ増殖したと考えられます」

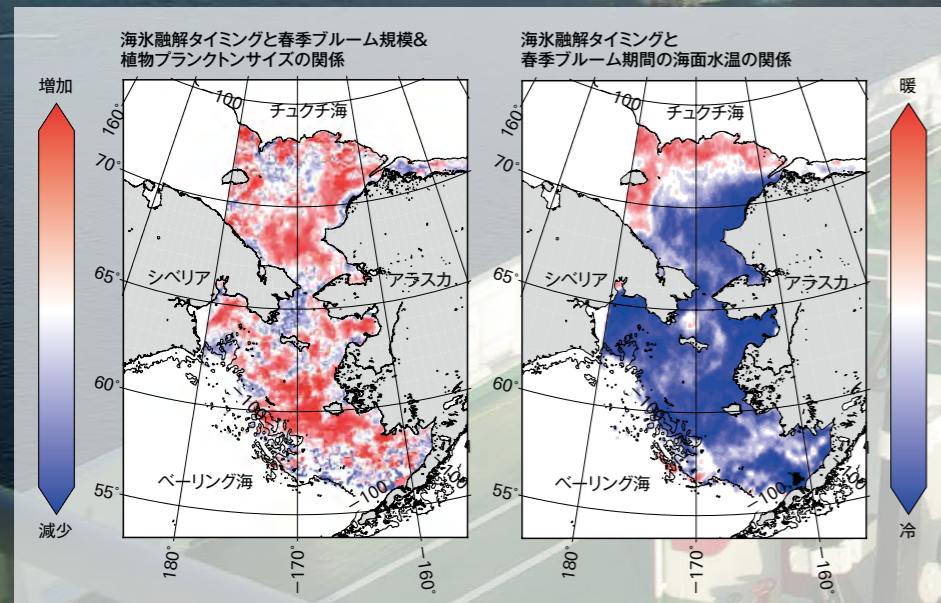
藤原さんはまた、2008~10年の毎年9月に、太平洋側の海盆域で、植物プランクトンの分布や環境変化に対する応答を知るため、「みらい」による広域調査を行った。調査海域は、以前は通年氷に閉ざ

されていたが、最近になって海面が露出するようになったところだ。

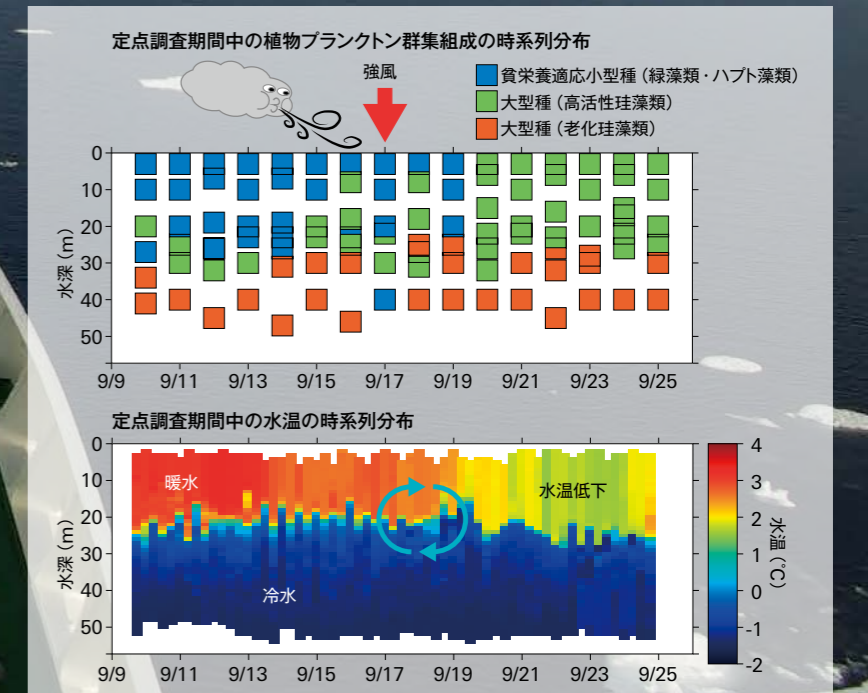
いずれの年も、浅い陸棚域には、暖水に適した大型の植物プランクトンが分布していた。一方、北の海盆域には、冷たい水、さらに貧栄養に適応した、小型の植物プランクトンが優占的に分布していた。「最も暖かった2008年だけ、海盆域の一部の海域に、暖水、そして貧栄養環境に適応した、小型の植物プランクトンが優占的に分布していました」と藤原さん。「海水融解が遅い年は、冷たい水が分布します。その結果、冷たい水に適応した小型の植物プランクトンが優占的に分布します。2008年は、ほかの年よりも1~2ヵ月早く海水融解が起きていました。海水融解が早まって水温が上昇し、暖水に適した小型種が優先的に分布するようになったと考えられます。融氷の早まりと昇温によって優占種が交代したのです」

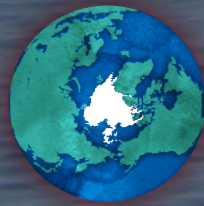
一連の研究によって「海水減少や海洋環境の変化が植物プランクトンに及ぼす影響が見えてきた」と藤原さん。植物プランクトンの変化が、どのように連鎖していくのか。そういった生物間をつなぐ研究に取り組んでいきたいと抱負を語る。

左の図では、海水融解が早まるほど大型の植物プランクトンが増える海域を赤で示している。右の図は、海水融解が早まるほどブルーム期間中の水温が下がる海域を青で示している。海水融解が早いと、ブルーム期間中の水温が低く、ブルームの規模の増大、そして大型の植物プランクトンが増加する海域が広がっている。



上は植物プランクトンの種類によって色分けしてある。強風の日(9/17)を境に、植物プランクトンの種類が変わっているのが分かる。下は水深による水温の分布。強風によって海水がかき混ぜられて、表面付近の水温は強風が吹く前よりも下がっている。





地球温暖化や海水減少による海洋酸性化は生態系に何をもたらすか

2008年、北極海を航海中の「みらい」より。
撮影：藤原 周 / 北極環境変動総合研究センター

取材協力

杉江 恒二

北極環境変動総合研究センター
北極海洋生態系研究ユニット
技術研究員

北極の海では海洋酸性化も進んでいる。「海水がなくなって大気と海水とが直接接触すると、二酸化炭素(CO₂)が海水に溶け込めるようになります。CO₂の吸収量が増えると、海水のpH(水素イオン指数)が下がっていきます」と語るのは杉江恒二さんだ。海水はもともと弱アルカリ性で、pHが下がると中性に近づいていく。酸性側に近づいていくことから、海洋酸性化と呼ばれる。

杉江さんは、温暖化や海洋酸性化などの環境の変化によって、プランクトンの群集の組成がどのように変化するかなどを調査するための実験を進めてきた。

2015年と16年に行われた海洋地球研究船「みらい」の北極航海時、杉江さんは現場の海水の水温、塩分、CO₂濃度といった環境条件を変えながら、植物プランクトンの培養実験を行った。実験海域はチュクチ海とカナダ海盆の境界付近だ。そこはチュクチ海の浅いところから、カナダ海盆の深いところへと海底が斜面になっている場所である。

「みらい」の甲板上に、現場で採取した10リットルの海水を入れた培養容器を複数用意する。それぞれの海水の水温や塩分、CO₂濃度などの条件を変え、定期的に海水を少しずつ採取して、なかに含まれている植物プランクトンを調べた。「今世紀末には、高ければ水温が4℃ほど上がると予測されているので、高水温の実験設定では、現場の水温+4℃に設定しました。CO₂分圧も、今世紀末に達する可

能性があるとみられている600-800μatmとしました。海水融解や河川からの淡水流入量が増えることで、将来的に海洋の塩分が下がるといわれているので、塩分を下げた実験設定も用意しました。環境条件をさまざまに組み合わせながら、どの要因が植物プランクトンに影響するのかを調べました」

実験の結果、温暖化、酸性化、またそれらの両方の影響を受けると、小型のプランクトンが増えるという結果が得られたと杉江さん。

北極海では現在、大型の珪藻類が多く、それがカイアシ類やオキアミ類などの動物プランクトンの餌となり、さらにそれらの動物プランクトンが魚類や鯨類などの餌になっている。「今後、実際の海で温暖化や酸性化が進行していくと、北極海の生態系の構造が変わっていく可能性があります」と杉江さんはいう。「『食う—食われる』の関係が1回起きると、食べた側の呼吸や運動などにエネルギーが使われることで、約80%のエネルギーが消失します。小型の植物プランクトンが増えると、それらを餌とする小型の動物プランクトンが増えます。少数派だった小型の動物プランクトンの割合が大きくなることで『食う—食われる』の回数が多くなると消失するエネルギーが増え、大型の動物プランクトンや魚類など生態系の高次の生物が減る方向になります。植物プランクトンの大きさは、海の生態系にとって重要なのです」

杉江さんは、続く2017年の「みらい」、18年の北海道大学水産学部附属練習船「おしよる丸」の北極航海でも実験を行った。2015年、16年の実験では、小型植物プランクトンと、それを捕食する動物プランクトンが海水のなかで共存している状況での実験だった。「その場合、たとえば酸性化で捕食圧が減ったことで小型の植物プランクトンの増殖速度が伸びたのか、あるいは小型の植物プランクトンにとってCO₂が多い方が都合がよくて増殖速度が伸びたのか、その区別がつかません」と杉江さん。

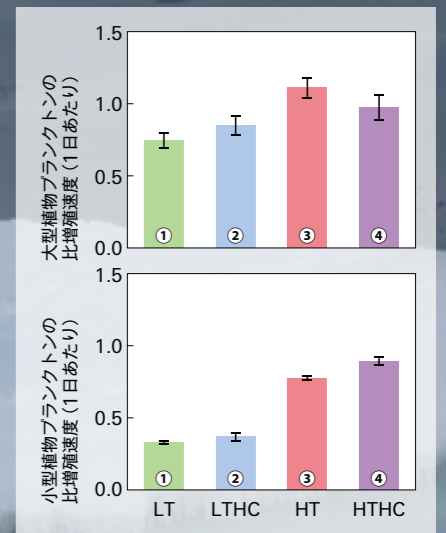
そこで2017年、18年の実験では、従来の実験と同じ条件の海水と、小型の動物プランクトンを減らして捕食圧を無視できるほど小さくした海水とを比較しつつ実験を行った。その結果、「温暖化と酸性化の両方の影響があると、小型の植物プランクトンが増えやすいことが、捕食者がいない系でも成り立ちそうだということが見えてきました」

チュクチ海とカナダ海盆の境界付近で実験を行ったことにはもう一つの意味がある、と杉江さんはい

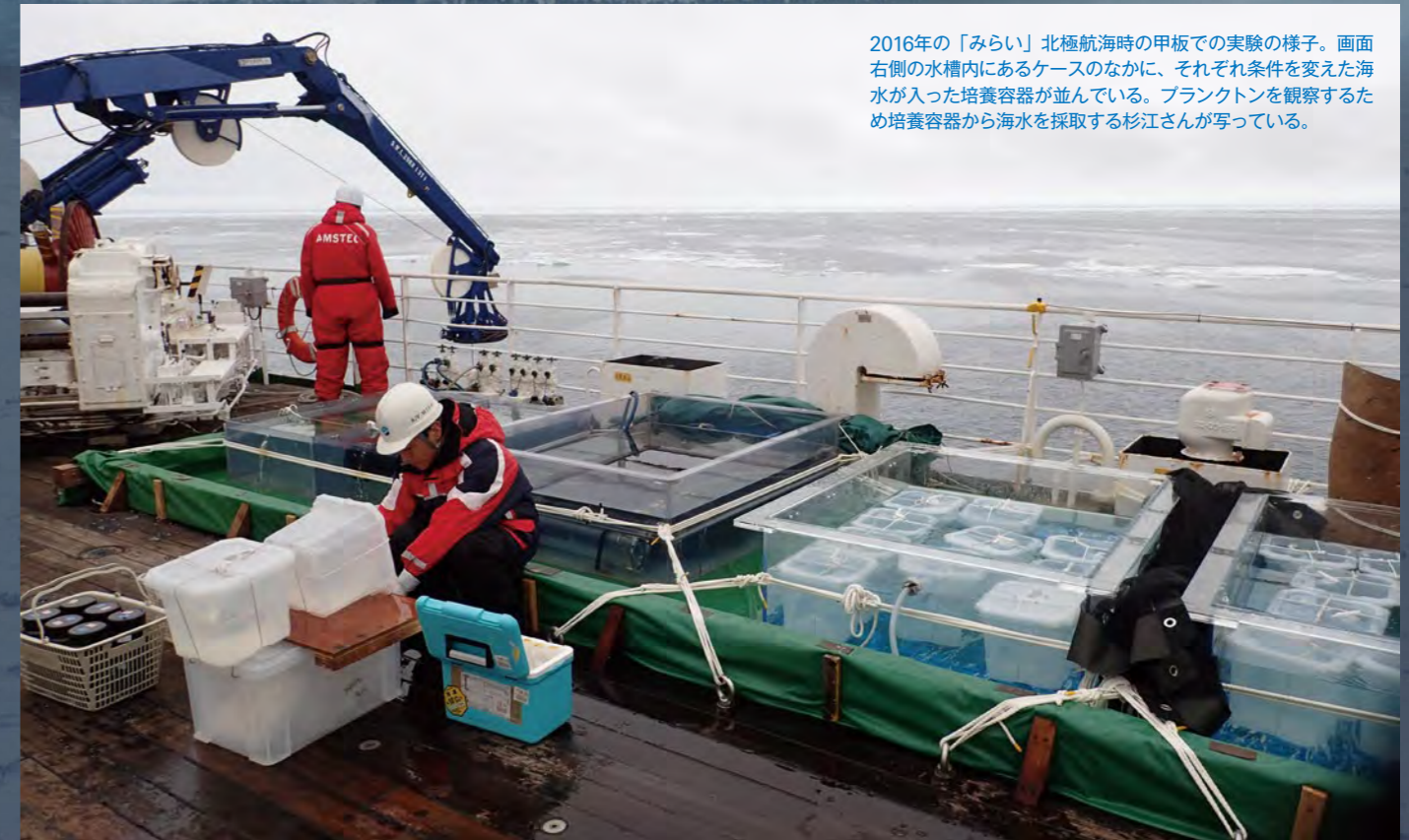
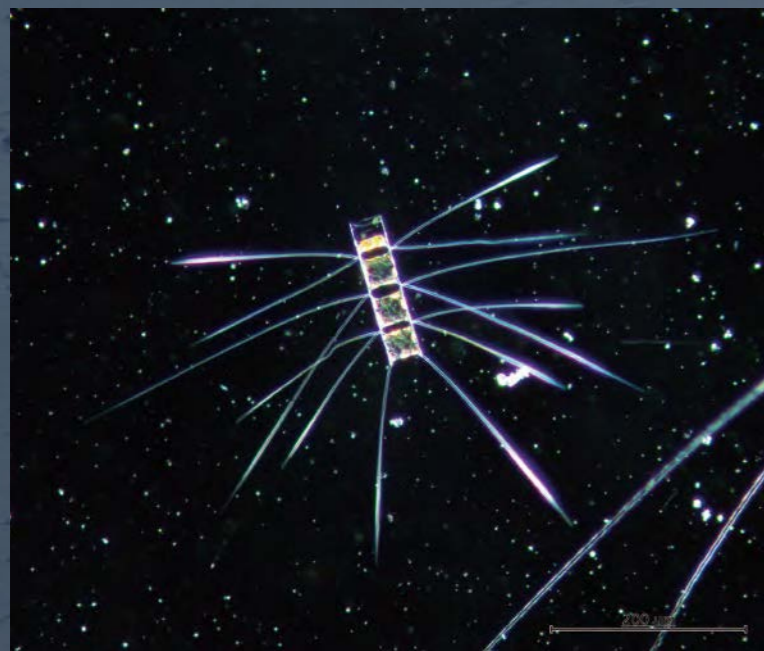
う。CO₂が光合成によって植物プランクトンに取り込まれ、プランクトンが死んだ後に有機物が深海底へと沈んでいく。そのように炭素が運ばれる過程は「生物ポンプ」と呼ばれる。「浅いところでは、沈んでいったものが底生生物に食べられたりバクテリアに分解されたりするため、炭素を深層に隔離する効果はプランクトンが大きくても小さくてもあまり関

係ありません」と杉江さん。「実験を行った海域は、生物ポンプによってカナダ海盆側の深いところへと沈んでいく、源になる海域です。深いところに沈んでいくと、相当な期間、表面に炭素が戻ってこない環境になるのです。小型の植物プランクトンの増加は、将来的に北極海の生物ポンプの作用を弱くすることも考えられます」

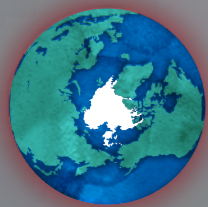
大型と小型のプランクトンの増殖速度が、条件を変えたときにどう変化するかを示したグラフ。それぞれ①現在、②酸性化、③温暖化、④酸性化+温暖化、という条件にした場合の結果である。



この写真には、大型の植物プランクトンと小型のものが同時に写し出されている。中央付近に写っているのが大型の植物プランクトンで、背景に粒のように写っているのが小型の植物プランクトンである。植物プランクトンは小さな生物だが、そのサイズの幅は非常に広い。最小のものと最大の植物プランクトンの縮尺は、ゾウリムシと人間の縮尺に相当するほどだ。大型と小型では、それを捕食する動物プランクトンの種類も異なる。



2016年の「みらい」北極航海時の甲板での実験の様子。画面右側の水槽内にあるケースのなかに、それぞれ条件を変えた海水が入った培養容器が並んでいる。プランクトンを観察するため培養容器から海水を採取する杉江さんが写っている。



海中観測ドローンで、北極の海氷 下を観測する

2016年北極航海にて、作業艇より撮影した「みらい」。
撮影：坪根 聡 / 株式会社インターリンク

取材協力

石橋正二郎

北極環境変動総合研究センター
北極観測技術開発ユニット
主任技術研究員

北極海では海中の環境に関する観測値が非常に少ない。また海氷の厚さも詳しくは分かっていない。そういったデータを取得するために、JAMSTECでは北極海の海氷の下を航行する極域用海中観測ドローンを開発中だ。

これまでの海中探査機は数mから10mクラスのものが多い。「開発中の海中観測ドローンは長さが約1.8mと、従来の探査機に比べて小型軽量です。大型の探査機では専用の母船が必要になる場合があります。海中観測ドローンはできるだけ小型軽量にして、研究者が乗る船であればどんな船でも使えるようにするというのがコンセプトです。また母船による支援がなくても海氷下を単独で自律的に航行する能力を持たせます」。そう語るの、海中観測ドローンの開発を進める石橋正二郎さんだ。

海氷の形状を計測するため、音響反射を用いるマルチビームエコーサウンダーやレーザー反射を用いる3Dレーザースキャナーを搭載する予定だ。海氷の海上部分の形状(厚み)は分かっているの、海水下の形状が分かれば海氷全体の厚さを知ることができる。これに加えて、深度や水温、電気伝導度を計測するためのCTD計、海水の透明度とプランクトン量を計測するための蛍光光度・濁度計などの海中環境を計測する機器も搭載される。観測装置は必要

に応じて入れ替えられるようにする予定だという。「研究者の要望に応じて、たとえば大きな観測装置でも機体の外側に取り付けるオプションも考えています」と石橋さん。

基本的な観測装置のほか、航行に必要な装置や電池なども合わせて総重量は約250kg。片道15km、往復30kmを航行できるように設計されている。「これまでのように点での観測ではなく、海氷下を線で、面で、そして三次元的に可視化もしくは計測することで、北極の海氷をこれまでにない正確さで把握し、北極に関するさまざまな研究分野に貢献できるようにドローンにするべく開発を進めています」と石橋さんはいう。

「技術的な課題はもちろんある」と石橋さん。「最重要課題は、海中のドローンが自分の位置を知る方法です」。海中では電波が届かないので、GPSの電波は受信できない。もちろん海中には目印もない。

そこで、海中で自分の位置を知るために搭載されるのが慣性航法装置だ。この装置は主に、自分の移動量を計測する加速度計と、自分が進んでいる方向を計測するジャイロから成る。移動した方向と移動量を把握できれば、基本的にはそれらを足し合わせていけば、自分の現在位置を求めることができる。ただし、「ほんのわずか、たとえば進行方向の角度

がたった1度違うだけでも、30km進むと最低でも500mの誤差が出ます。実際にはほかの誤差要因もあるので、その誤差は数kmに及びます。そのため場合によっては、往復して帰ってきた場所が氷の下になり、ドローンを回収できなくなる可能性があります」

「そのような事態を避けるため、ドップラー速度計を利用します」と石橋さん。ドップラー速度計は、慣性航法装置よりも正確な速度を計測することができる装置だ。「慣性航法装置の速度をドップラー速度計の速度をもとに数学的に補正してやると、誤差を大幅に抑えることができます。つまり航行距離が30kmでも数十mという比較的小さな誤差に抑えることができるのです。そのためには「対水速度」をうまく計測させる必要があります」

さらに音響モデムや電磁モデムを使い、ドローンの位置を把握しようとしている。「音響モデムは、ある周波数の音で船から呼び掛けることでドローンと通信する装置です。ただ通信できるのは3kmほどになります。その間に、ずれが見つかればドローンの位置を補正してやり直す」と石橋さん。

一方、電磁モデムは氷の上に設置する。「電磁モデム自体の位置はGPSによって正確に把握でき、氷の上から最大で50m圏内にいるドローンとの通信が可能。もしドローンの位置が多少ずれても、電磁モデムから50m圏内に入れば、位置を補正したり、場合によっては帰還するように命令したりすることもできます」

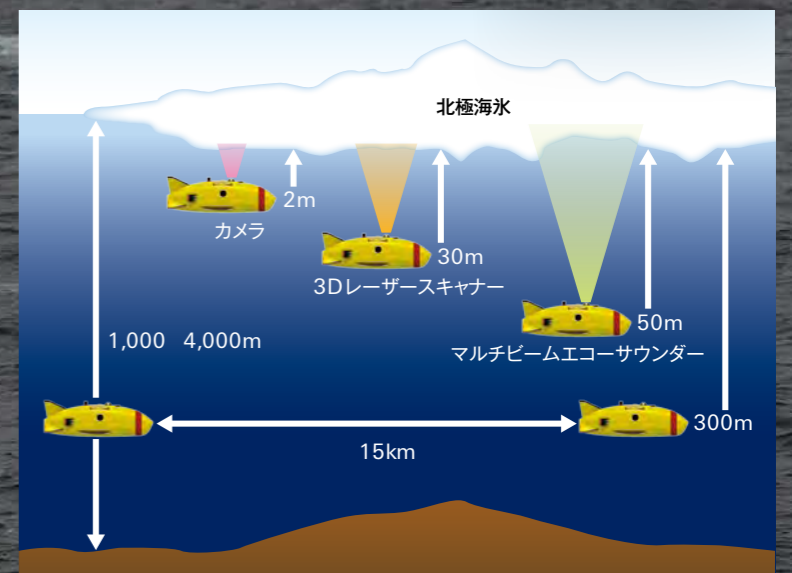
将来的には、複数のドローンを同時運用することも視野に入れている。「小型軽量のドローンだからこそ実現できる運用形態があると期待しています。たとえば同じ海域の異なる深度域を同時に複数のドローンを使って計測するようなことが考えられます」と石橋さん。また小型軽量であることを生かし、船以外の場所、たとえば観測したいエリアの氷に穴を開けて、氷の上からドローンを展開することも考えられるという。

「現在、機体製作に入っています。機体製作終了後に各種ソフトウェアの組み込み、そしてさまざまな試験を経て、2020年以降に北極海での運用を目指しています。極域用海中観測ドローンは、北極に関する科学研究を工学的な面からサポートするものです。北極のいま、そして未来を知るために、できるだけ高品質なデータを取得して貢献できればと考えて開発を進めています」

BE



3Dレーザースキャナーはレーザー光を放って戻ってくるまでの時間を計測することで海水下の形状を三次元で可視化する装置で、海氷の底から30mほどの距離で使われる。マルチビームエコーサウンダーは発振した複数の音波が氷に反射して返ってきたときの位相差から形状を可視化する装置で、海氷の底から50mほどの距離で使われる。カメラは小さいので常設されるが、それ以外の装置は欲しい情報に応じて付け替えられるようにする予定だ。ドローンは水深300mまで潜ることができる。



音響モデムと電磁モデムのイメージ。音響モデムは市販のものを、電磁モデムはJAMSTECで現在開発中のものを利用する予定だ。



極域用海中観測ドローンの完成イメージ。

ゴギはイワナ的一种。成魚は15~20cmほどで、最大30cmくらいまで成長することもある。中国山地の山間部の溪流に生息。

ゴギは広島県の天然記念物だ。しかし、その魚を知る人は、広島でもそれほど多くない。それは、ゴギが中国山地を流れる川の最上流域にあたる山奥の溪流に生息しているからだ。

2017年6月にオープンしたマリホ水族館のテーマは、地域の環境を含めた展示だ。そのなかで「うねる溪流の森」ゾーンにある広島山間部の溪流を模した水槽は、水族館の目玉だ。水槽の前に立ったお客さんは、まずその激しい水流に目を奪われる。

この水槽の準備はオープン前の2016年1月に始まった。展

示水槽の4分の1ほどの水槽で何度も何度も水流実験を行った。

ゴギは、養殖場から手に入れた。冬場には近づくこともできないような山奥に、その養殖場はひっそりとある。そこから体長15cmほどのゴギの成魚を200匹ほど入手した。

数日は水槽に適應させるための慣らし飼育。水流なしの状態から始め、水流を起こすポンプの出力を徐々に上げていく。ゴギは、自然界では急流の岩陰を好み、そこに流れ着く小さな虫などを餌にしている。しかし養殖魚は筋力がなく、環境にも慣れていないので少しずつ水流に慣れさせ、野生の生息域

に近い状況へと持っていくのだ。溪流で暮らしていた習性が残っているのだろう、オープン日にはうねる溪流水槽の激流のなかで力強く泳ぐ姿を見せてくれた。

この水槽では、ゴギと同じサケ科のアマゴも飼育している。しかし、ゴギよりやや下流ですみ分けているアマゴはこの激流を好まないのか、ゴギに比べ、急流部へ姿を見せることは少ない。

激流のなかを群れで泳ぐゴギの姿は圧巻だ。餌を投げ入れたときなど、どんどん激流へ突っ込んでくる。初めは激しい流

れだけに目を奪われていたお客さんも、激流に逆らって泳ぐゴギの姿にひかれていくのが分かる。うねりをものともせず泳ぐ姿に、生きる勇気が湧いてくる。

取材協力：河内航平／マリホ水族館 飼育員



雄のゴギ。雄は雌よりオレンジ色が強く、やや派手な色をしていることが多い。個体差はあるが、雄は顎が出ていて、雌は全体に丸い顔をしている。

私が
IODPで
解きたい謎

Lallan P. Gupta

高知コア研究所
科学支援グループ
グループリーダー代理
IODPキュレーター

ララン・P. グプタ。1968年、インド・カンプル生まれ。アラバハド大学卒業。ジャワハラル・ネルー大学大学院博士課程修了 (Ph. D.)。1993~95年、ハンブルク大学 (ドイツ) 研究生。1997年4月、工業技術院 外国人招聘型フェロー。産業技術総合研究所 特別研究員などを経て2006年、JAMSTEC技術主任。2011年より現職。

海洋掘削科学を支える IODPキュレーター

IODP (国際深海科学掘削計画) の研究航海で採取された貴重な掘削試料 (コア) は、掘削海域ごとに世界に3カ所あるコア保管拠点で保管される。その1つが、高知大学とJAMSTECが共同運営する高知コアセンター (KCC) だ。

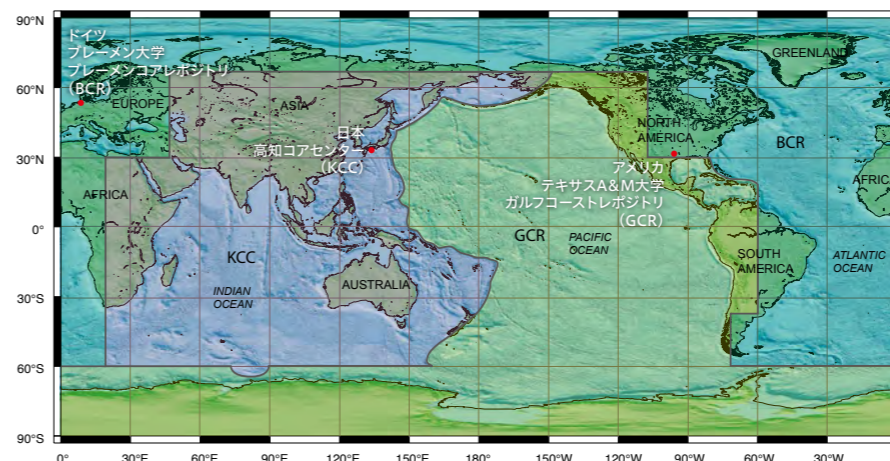
KCCにはIODP以前の海洋掘削計画によるコアも保管されており、世界中の研究者から年間100件ほどのコアの利用申請が届く。その申請内容や研究者の実績を調べ、コアを提供するかどうか判断を下しているのが、IODPキュレーターのララン・グプタさんだ。



高知コアセンターのサンプリング室でコアを確認するGuptaさん。

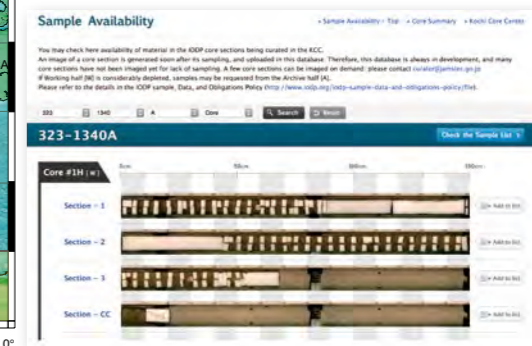


KCCコア保管庫にて



IODPの採取海域別
コア保管庫分布図

IODPコアの情報を検索できる
KCCのホームページ
<http://www.kochi-core.jp/iodp-curation/index.html>



ガンジス川から地球環境へ

—インドのご出身ですね。

Gupta : ガンジス川が流れるカンプルという都市で生まれ育ちました。大学の学部では生物学を学びましたが、その学部の先輩から、ニューデリーにあるジャワハラル・ネルー大学では新しい分野を学べると聞き、調べてみると環境科学という初めて聞く分野があることを知りました。スケールの大きなテーマで面白そうだと思い、ジャワハラル・ネルー大学大学院へ進み、環境科学を専攻しました。1989年、ちょうど地球温暖化が世界的に注目を集め始めたころです。

—どのような研究を行ったのですか。

Gupta : 故郷のカンプルでは工場排水がガンジス川へ流れ込み、多くの人たちが汚染を心配しながら沐浴もくよくをしていました。研究室の先輩がガンジス川の汚染を調査していたので、私はガンジス川に流れ込む支流で川の水や堆積物を採取して分析を進めました。

—日本で研究をするようになったきっかけは何ですか。

Gupta : 川の汚染よりも、さらにスケールの大きな地球規模の環境に興味を持つようになり、1993~95年、ドイツ・ハンブルク大学の研究生として環境変動に

ついて学びました。その研究室に来ていた東京大学の研究者から、日本で海底堆積物のコアを分析して過去の環境変動を調べていることを聞きました。それがきっかけとなり、インドで結婚したばかりの妻と一緒に1997年4月に来日したのです。

コアから生物ポンプを探る

—どのような研究を行ったのですか。

Gupta : つくば市 (茨城県) にある工業技術院 (現 産業技術総合研究所: AIST) で、海洋掘削科学の研究を始めました。日本近海で掘削されたコアに含まれてい

る有機物を分析して、生物ポンプについて調べる研究です。

—生物ポンプとは何ですか。

Gupta : 大気から海へ吸収された二酸化炭素 (CO₂) を使って、海洋表層の植物プランクトンが光合成により有機物をつくり出します。その植物プランクトンの排せつ物や死骸が海の中層や深層へ沈み、CO₂が大気から長期間隔離されます。そのような働きが生物ポンプです。

海底に堆積した有機物の一部は、微生物の働きにより分解され、炭素が海や大気へ戻ります。堆積物のコアに含まれる有機物の種類や量を分析して、どれく

らいの有機物が分解されて海や大気へ炭素が戻るのか、どれくらいの炭素がどのような時間スケールで堆積物に閉じ込められるのかを推定する研究を進めました。そのような炭素循環を探ることが、地球環境の仕組みを知り、温暖化などの環境変動を予測する上で重要です。

—日本での研究や生活で苦労された点は?

Gupta : 研究の面では、分析機器などがそろっていたので、自分がやりたい研究をすぐに始めることができました。生活の面では、やはり日本語に苦労しましたね。来日したときに知っていた日本語は

「さよなら」だけでした。

—日本語習得の秘訣は?

Gupta : お酒の席に積極的に出ることです (笑)。遠慮なしにオープンな気持ちでみんなと話をすることで言葉を覚えました。

IODPキュレーターに

—コアの保管や研究者への配布を行うキュレーターの仕事に興味を持った理由は何ですか。

Gupta : 巨大な地球環境の仕組みは複雑です。1人の研究者や1つの研究チームでできることには限りがあり、国際協力で



産業技術総合研究所での研究の様子。上の写真は、研究室にて（1999～2000年ごろ）。下の写真は、2001年に生物ポンプ関係のプロジェクトでJAMSTECの海洋地球研究船「みらい」に乗船。

解明を進める必要があります。そのような思いを強く抱いていたころ、アメリカのテキサスA&M大学とドイツのブレーメン大学に加えて、IODPの世界3大コア保管拠点の1つとして高知コアセンター（KCC）の立ち上げ準備が進み、JAMSTECがIODPキュレーターを募集していることを知り、ぜひやってみようと思い応募しました。

——2006年6月に、JAMSTECに入られました。

Gupta：採用されてすぐにアメリカとドイツのコア保管拠点でキュレーターの研修を受け、そこで学んだことをKCCのスタッフたちと共有しました。

KCCには、IODPの研究航海により西太平洋やインド洋で採取されたコアが保管されます。2003年に始まったIODPの以前に実施された、深海掘削計画（DSDP）や国際深海掘削計画（ODP）において採取されたコアは、「レガシーコア」と呼ばれます。西太平洋やインド洋で採取され、ドイツやアメリカに保管されていた、長さ約83km分のレガ

シーコアのKCCへの搬入が2007年に始まりました。それと同時に、国際的なコアの提供サービスを開始しました。——仕事の具体的な内容について教えてください。

Gupta：KCCに保管されているコアを使いたいと、世界中の研究者からリクエストが来ます。その申請書を検討して実際に提供するかどうか判断する役割を、私はずっと担ってきました。最近では、年に90～100件ほどの申請があります。

——どのような観点で判断するのですか。

Gupta：申請書に書かれたコアを使った実験が本当に実現可能かどうかを調べます。そのために、その実験の背景となる研究について論文を読み込みます。申請される研究分野は広範囲に及ぶので、文献だけでは分からない場合には高知コア研究所の専門家たちに聞いたりします。

また、申請してきた研究者の過去の経歴や論文を調べ、その研究者が申請した実験を本当に実行できるかどうか検討します。コアの分析について経験が浅い研究者が大量のコアをリクエストしてきた場合には、研究の的を絞って少ない量のコアから実験を始めることを私から提案することもあります。そのようなやりとりのほとんどを電子メールで行いますが、相手の気持ちまで読み取ることは難しいですね。

コアの提供を受けた研究者は、原則として3年後までに研究結果を論文発表する義務があります。しかし、3年を過ぎても論文を発表せず、追加のコアを申請

してくる研究者もときどきいます。追加のコアを提供することでその研究がうまく進展するのか、それを判断するのは難しく、とても悩みます。

学会に出掛けると、コアの提供を断った研究者に出会って気まずくなることもあります。コアを提供した人から「今回、その研究結果を発表します」と感謝されると、とてもうれしいですね。

世界のなかで誰がどのような研究をしているのか、どのような新しい分析手法が開発されているのか、海洋掘削科学の最新動向を把握できる点も、IODPキュレーターの仕事の魅力です。

新手法でコアから新しい情報を読み取る

——この10年間で申請内容に変化はありますか。

Gupta：大きな研究テーマの1つが、過去の環境変動を探ることである点は変わりません。コアから有孔虫や珪藻などの殻の微化石を取り出し、そのかたちや量から過去の環境変動を探る研究が長年、進められてきました。それに加えて最近では、殻などに含まれる元素の濃度や、同じ元素でも質量の異なる安定同位体の比率の分析など、新しい手法により過去の海水温などを精密に推定する研究が増えています。レガシーコアからも新手法によって新しい情報を読み取ることができます。そのような過去の環境変動の詳細なデータをもとに、未来の環境変動を高い精度で予測できるようになります。



2008年10月28日、最後のレガシーコアを保管庫に搬入するIODP計画管理法人（IODP-MI）のHans Christian Larsen 副代表と、Guptaさん（右）。



2016年9～11月、海底下生命圏の温度限界を探るIODP第370次研究航海「室戸沖限界生命圏掘削調査（T-Limit）」が実施された。写真は、室戸沖の「ちきゅう」からヘリコプターでKCCに到着したコアを確認するGuptaさんたち。

IODPキュレーションチームのメンバー



——高知コア研究所では、海底下の生命圏を探る研究も進められていますね。

Gupta：最近、始まった新しい研究です。かつては、海底下深部は生命が存在できない死の世界だと考えられていました。しかし最新の手法でコアを分析することで、海底下の深部にも微生物が生き延びていることが分かってきました。海底下生命圏の研究は今後、さらに盛んになっていくでしょう。

——どの国からの申請が多いのですか。

Gupta：2007年ごろは、アメリカ、イギリス、日本、ドイツ、フランスという順

番でした。最近では、アメリカ、日本、イギリス、ドイツ、オーストラリアという順番に変わり、日本の順位が相対的に上がりました。KCCができたことと、地球深部探査船「ちきゅう」の掘削航海が始まったことで、日本の海洋掘削科学が活気づいています。「ちきゅう」が採取した、地震や津波に関係するコアも、リクエストが多いですね。

より深部へ

——「ちきゅう」は現在、南海トラフの海底下5,200m付近に存在すると予測さ

れる地震発生帯へ向けて掘り進めています。さらに将来、マントル層の掘削も目指していますね。

Gupta：海底下の深部からコアを採取するのは技術的に難しいので、得られるコアは少量になります。従来よりも掘削するコアの直径を大きくするなど、得られるコアの量を増やす工夫が必要でしょう。

また、深部の掘削では掘削機械の振動が大きくなり、コアがぼろぼろになったり、ひびが入りやすくなったりする傾向があります。するとコアから情報を読み取る際の障害となります。きれいな質の高いコアを採取する技術の開発も、今後の大きな課題です。

キュレーターとしては、海底下の深部で採取された希少なコアを、どのような研究のために、誰に提供していくのか、ますます難しい仕事になるでしょう。

私は1968年6月の生まれです。その年の8月に深海掘削計画（DSDP）の最初のコアが採取されました。私は海洋掘削科学と同じ年齢なんです。また、IODPの記念日（IODP Day）の6月15日は妻の誕生日でもあり、縁を感じます。これからも海洋掘削科学を支える仕事を続けていきたいと思っています。

BE



2009年2月、高知コア研究所で開催されたIODPキュレーター会議。日本、アメリカ、ドイツをはじめ、韓国、台湾のキュレーション関係者が一堂に会した。

人工知能を用いて“熱帯低気圧のタマゴ”を検出する

台風情報が出ていると気になって確認する、という人も多いだろう。台風の進路予測・強度予測の精度はとても高く、災害対策にも役立っている。今回、松岡大祐さんは気象シミュレーションデータからディープラーニングを用いて“熱帯低気圧のタマゴ”を精度よく検出する手法を開発。この手法を人工衛星の観測データに適用できれば、精度の高い台風の発生予測が実現するだけでなく、進路や強度についてもより早くから高精度な予測が可能になり、被害の軽減にも大きく貢献できると期待されている。

取材協力 松岡大祐
地球情報基盤センター 先端情報研究開発部
情報・計算デザイン研究開発グループ 技術研究員
科学技術振興機構 さきがけ研究者（兼任）

●いまディープラーニングが注目されている

松岡さんはこれまで、シミュレーションデータの可視化手法の研究開発を行ってきた。シミュレーションデータに隠れている特徴を抽出して表現する可視化によって、構造や現象がはっきり見えるようになり、理解しやすくなる。たとえば、海洋大循環モデルによるシミュレーションデータについて海面水温を色相、海面流速を明度で表す手法を開発し、黒潮や親潮やそれらから分離した渦の抽出が可能になった。なぜ松岡さんは今回、熱帯低気圧のタマゴを検出する手法の開発に取り組んだのだろうか。

「コンピュータ上で人と同様の知能を実現させようという人工知能（AI）の技術が、この2、3年で急速に発達してきました。特に、ビッグデータのなかに潜む特徴を多層のニューラルネットワークを用いて反復的に学習し、新たなデータに対して高精度に予測を行うディープラーニングが注目され、画像認識や音声認識、自然言語処理などさまざまな分野で応用されています。JAMSTECには海洋や気象に関するビッグデータがたくさんあります。それらにディープラーニングを用いたら新しい展開があるのではないかと考えたのが始まりです」と松岡さん。ディープラーニングのユーザーが増え、さまざまなソースコードやドキュメントの入手が容易になってきたことも、後押しとなった。

それが2017年の初めだ。当時のJAMSTECでは、ディープラーニングを用いた研究はあまり行われていなかった。その理由を松岡さんは、「JAMSTECで行っている海洋学や気象学などの研究では、物理方程式に基づいてモデルをつくりシミュレーションを行って結果を予想する、モデルドリブンなアプローチが取られてきました。一方、ディープラーニングを用いた研究は、得られたデータを総合



学習に用いた雲画像の一例
NICAMのシミュレーションデータ20年分に対して熱帯低気圧の追跡アルゴリズムを適用し、熱帯低気圧のタマゴと発達中の熱帯低気圧の雲画像を5万枚、熱帯低気圧に発達しなかった低気圧の雲画像を100万枚切り出した。各画像の1辺は約1,000km。

的に分析して理論を導き、それに基づいて予測する、データドリブンなアプローチです。分野によるアプローチの違いというのが大きいのではないのでしょうか」と説明する。「私は情報科学分野の出身なので、データドリブンなアプローチにはなじみがあります。そこで早速、ディープラーニングを用いて気象のシミュレーションデータから熱帯低気圧のタマゴを検出できるか、試してみました。すると、とても高い確率で熱帯低気圧のタマゴを検出できたのです」

松岡さんは、予想以上の結果に興奮する一方で、こんなに簡単にうまくいくのなら誰かがすでにやっているに違いないと思い、文献を調べてみた。すると、ディープラーニングを用いて熱帯低気圧か熱帯低気圧ではないかを判定する研究は行われていたが、熱帯低気圧のタマゴを検出するという研究はなかった。「世界で唯一の研究だったので。実現すれば、台風の発生予測にイノベーションを起こせる。この研究に大きな可能性を感じ、本格的に取り

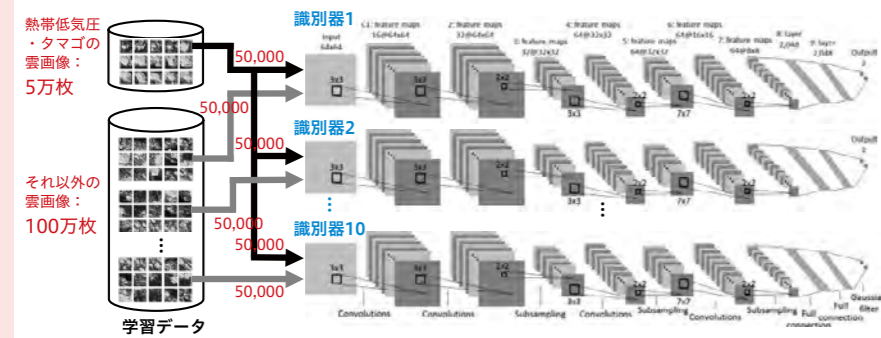
組み始めました」。台風の専門家であるJAMSTECシームレス環境予測研究分野の中野満寿男 技術研究員、画像認識の専門家である九州大学の内田誠一 主幹教授らとの共同研究の体制を立ち上げた。

●熱帯低気圧のタマゴを検出する方法

熱帯から亜熱帯の海上で発生する低気圧を熱帯低気圧と呼び、そのうち北西太平洋または南シナ海に存在し、最大風速が秒速およそ

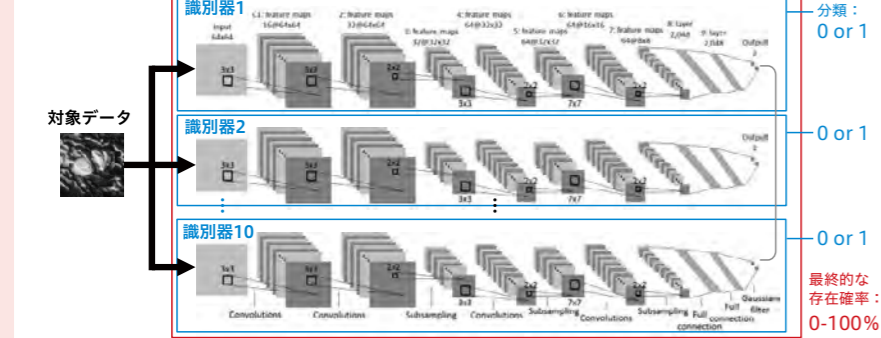
深層畳み込みニューラルネットワーク (CNN) によるアンサンブル識別器

学習フェーズ



CNNは多層になっていて、それぞれの層で大きさや性質の異なる特徴を抽出する。10種類のCNNに異なる学習データを学習させることで特徴抽出の視点が少しずつ違う識別器になり、それぞれの質の高さに応じて評価点を設定しておく。

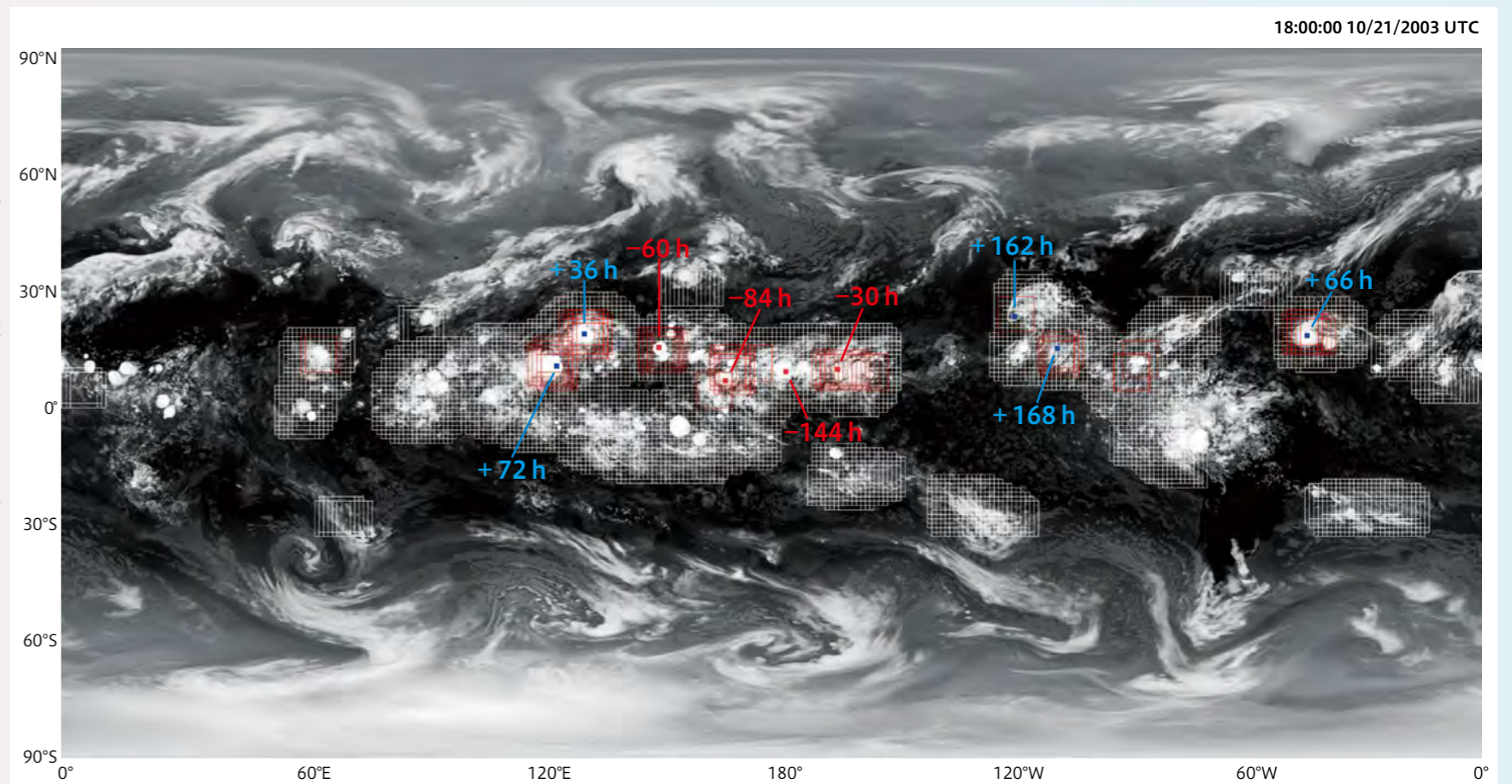
識別フェーズ



1枚の入力画像に対して10種類の識別器を用いて識別を行う。それらの評価点の平均が事前に与えた閾値を超えた場合、熱帯低気圧またはタマゴであると見なす。

CNNによるアンサンブル識別器を用いた未学習のデータに対する識別結果の例

白枠は識別対象とする領域で、雲量30~95%の領域(1辺約1,000km)を約125kmずつスライドしている。赤枠は、対象領域のうちアンサンブル識別器が熱帯低気圧またはそのタマゴであると識別した領域である。点は熱帯低気圧の追跡アルゴリズムによって分かっている熱帯低気圧(青点)とそのタマゴ(赤点)の中心点で、9個ある。数字は熱帯低気圧になってから、あるいは熱帯低気圧になるまでの時間。赤枠の中に点がある場合、正しく検出できていることを意味する。このデータでは9個中8個を正しく検出できている、捕捉率は88.9%。熱帯低気圧またはそのタマゴであると予測した領域は82あり、誤検出であったのは8領域で、空振り率9.8%



17m以上のものを台風と呼んでいる。そのような強い熱帯低気圧は、存在する海域によってハリケーンやサイクロンとも呼ばれる。

ディープラーニングについても、もう少し説明しておこう。ディープラーニングは深層学習とも呼ばれ、ディープニューラルネットワークを用いた機械学習の一手法である。ニューラルネットワークとは、ヒトの脳神経回路を模倣したモデルだ。それを多層にしたものがディープニューラルネットワークで、画像認識では深層畳み込みニューラルネットワーク (CNN) と呼ばれるモデルが用いられることが多い。

これまでの画像認識では、認識したい対象物を表す特徴量、たとえば画像中の対象物の濃淡パターンなどを事前に人が定義する必要があった。CNNを用いた画像認識では、大量のデータを学習させることで、対象物の特徴量を自動的に抽出する。「CNNを用いると、人が認識していなかった特徴量も抽出され、それを使って識別が行われるため、識別精度が大幅に向上します」と松岡さん。

気象シミュレーションデータは、全球雲解像モデルNICAMによるものを使用。NICAMとは、全球での大気現象をスーパーコンピュータ上で再現しようとする数値モデルで、地球全体で1つ1つの雲の発生と挙動を直接計算することにより雲に起因する不確実性を排除し、高精度の計算を実現している。今回の研究では、NICAMによって1979年から2008年までの30年間について空間解像度14kmで計算したデータを使用した。

このデータには風速、気圧、気温、渦度などの物理量も含まれているため、熱帯低気圧を発生前にさかのぼって追跡できる。NICAMによる1979年から1998年の20年分のシミュレーションデータに熱帯低気圧の追跡アルゴリズムを適用し、熱帯低気圧の

タマゴと発達中の熱帯低気圧の雲画像を5万枚、熱帯低気圧に発達しなかった低気圧の雲画像を100万枚切り出した。これらを学習データとしてCNNを用いた機械学習を行い、未学習の雲画像に対して熱帯低気圧のタマゴであるか、タマゴではないか、2クラスに分類できる識別器を構築した。ただし、熱帯低気圧になった直後とタマゴを正確に分類するのはほぼ不可能であるため、熱帯低気圧に発達したのももタマゴと同じクラスに分類することにした。

また、識別精度を高めるため、複数の識別器を組み合わせることにした。「1人の優秀な人の意見のみで答えを出すより、複数の普通の人の多数決で答えを出した方が正しい結果が得られやすいことが知られています。そのため、異なるデータを学習させて特徴抽出の視点が少しずつ異なる10種類の識別器をつくりました」と松岡さん。それが、アンサンブル識別器である。

●発生1週間前の熱帯低気圧のタマゴを高精度に検出

次は、いよいよ熱帯低気圧のタマゴを正しく検出できるかどうかの検証だ。NICAMのシミュレーションデータのうち、学習に用いなかった1999年から2008年の10年分のデータから雲が一定量以上存在する領域を切り出し、アンサンブル識別器に入力する。このとき、10種類の識別器のうち質の高い識別器は評価点を高く、質の低い識別器は評価点を低く設定しておく。1枚の入力画像に対して10種類の識別器によってそれぞれ識別結果を出し、評価点を平均する。それが事前に決めた閾値を超えた場合、その画像は熱帯低気圧またはそのタマゴであると見なす。

「検出性能をどのように評価するかが難しかった」と松岡さん。すべての雲を熱帯低気圧またはそのタマゴであれば、正解

率は100%だが、誤りも多くなる。逆に、確実な雲を1個だけ熱帯低気圧またはそのタマゴであるといえば、誤りはゼロだが、ほかにもある熱帯低気圧またはそのタマゴを見逃していることになる。そこで松岡さんは、捕捉率と空振り率という2つの指標で検出性能を評価することにした。捕捉率は、対象とするデータ中に存在する熱帯低気圧およびタマゴのうち、どの程度を正しく検出できたかを表す。空振り率は、熱帯低気圧またはタマゴであると予測した結果のうち、どの程度間違えていたかを表す。捕捉率が高く、空振り率が低い方が検出性能が高いといえる。

検証の結果は？「最もよい結果が得られた例の1つでは、9個の熱帯低気圧とそのタマゴが含まれているデータで、8個を正しく検出できました。捕捉率88.9%です。熱帯低気圧またはそのタマゴであると予測した領域は82あり、そのうち誤検出であったのは8で、空振り率はわずか9.8%でした。熱帯低気圧のタマゴをなるべく取りこぼしなく、空振りも少なく、精度よく検出することに成功した、と胸を張っていえる数字です」

海域ごとに見ると、北西太平洋において熱帯低気圧のシーズンである7~11月は、捕捉率が79.0~89.1%と高く、空振り率は32.8~53.4%と比較的低く、検出性能が高い。一方、北インド洋の検出性能は低かった。「検出性能は、各海域における熱帯低気圧の寿命や学習データの数に強く依存するようです」と松岡さんは解説する。北西太平洋の熱帯低気圧に関しては、発生1週間前のタマゴを74.8%という高い捕捉率で検出すること成功している。

●人工衛星の観測データへの適用が課題

「NICAMによるシミュレーションデータに対しては、ディープ

ラーニングを用いて熱帯低気圧のタマゴを高精度に検出できることが分かりました。しかし、実際に熱帯低気圧のタマゴを検出するには、人工衛星の観測データや、データ同化を行ったシミュレーションデータにも適用できる識別器を開発しなければなりません」と松岡さんは指摘する。そのために、衛星観測データを追加学習させたり、NICAMのシミュレーションデータの解像度を衛星観測データの解像度に近づけたり、さまざまな調整を行っているところだ。

一方で、松岡さんは「CNNの中身を理解することも重要」ともいう。「ディープラーニングでは、どのような根拠をもって判断が行われるのか、またはどのような特徴量を抽出しているのかが人には見えにくく、ブラックボックスであるといわれています。私たちは、熱帯低気圧の発生メカニズムにも興味があります。CNNの各層で抽出している特徴量のなかに発生メカニズム解明の鍵を握っているものがあるかもしれないと考え、もともとの専門であるデータ可視化を活かした分析を進めています」

松岡さんは、「JAMSTECにNICAMのシミュレーションデータがあったからこそこの成果」と断言する。「人工知能の応用研究では、データを持っているところが一番強いといわれています。高品質な気象や海洋のデータ保有量ではJAMSTECは世界トップレベルです。それにディープラーニングを使わないのはもったいない。アイデア次第で革新的な成果が得られるはず。地球深部探査センターの井上朝哉さんや海洋工学センターの吉田 弘さん、地球内部物質循環研究分野の桑谷 立さんたちと行っているAI勉強会の効果もあり、データドリブンなアプローチがJAMSTEC内に浸透し始めていると感じています。これから次々と成果が出る予定なので、楽しみにしてください」



特定DNAの数を網羅的に 定量する方法を発明

環境中や生体組織などから得られた試料について、そこに含まれる微生物の種類ごとの個体数を網羅的に調べることは最新技術でも難しい。星野辰彦さんたちは、微生物の種類指標となる特定DNAの数を解析する「定量シーケンス (qSeq) 法」を開発した(図1)。その手法は、生物学や医学、海洋・地球科学など、さまざまな分野へ革新をもたらす可能性を秘めている。

取材協力
星野辰彦
高知コア研究所 地球深部生命研究グループ
主任研究員

PCRによる増幅効率が異なるため、 増幅前のDNA数は分からなかった

星野さんの専門は、海底の堆積物にすむ微生物の生態だ。「私たちのグループで扱っている堆積物では、試料1ccあたり数百~数千という種類の微生物が検出されます。その数百~数千種類について、種類ごとの個体数を調べることは現実的には不可能です」

種類ごとの個体数を調べるには、まず生物の種類ごとに分類する必要がある。生物の種類を調べる代表的な手法は、細胞内でタンパク質を合成する舞台となるリボソームRNA (16S rRNA) の遺伝子の塩基配列を解読することだ。

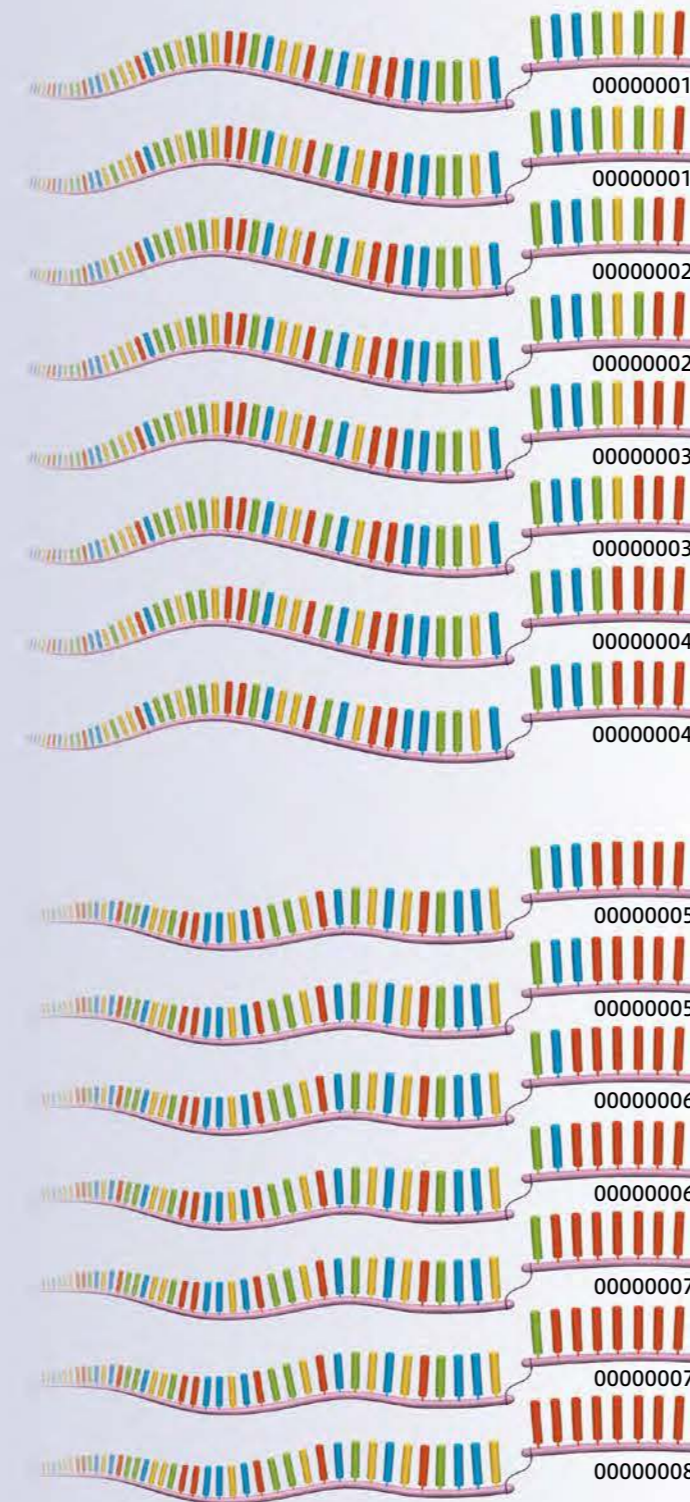
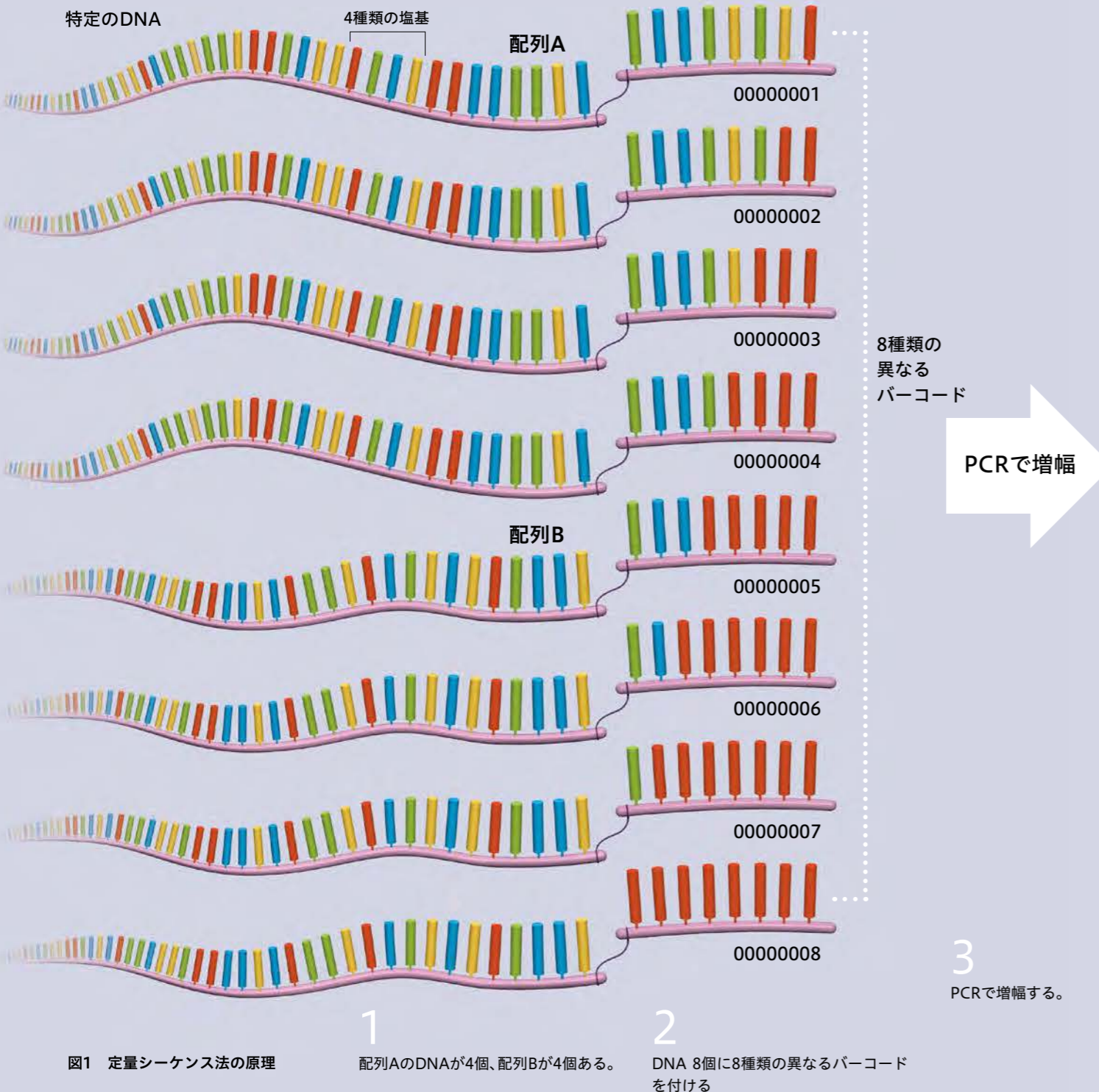
遺伝子の情報は、DNAにあるアデニン (A)・チミン (T)・グアニン (G)・シトシン (C) という4種類の塩基の並び方 (塩基配列) によって書かれている。生物の種類ごとに、16S rRNA遺伝子の塩基配列は異なる。

試料中に含まれる16S rRNA遺伝子の数と微生物の個体数は1対1で対応するわけではない。しかし、16S rRNA遺伝子の配列別の数が分かれば、微生物の種類ごとの個体数や構成比を推測する有力な情報となる。「ところが、配列別のDNA数を知ること、これまでの技術では難しかったのです」と星野さんは指摘する。なぜ難しいのか？

塩基配列を解読するシーケンス技術は日進月歩で発展しているが、環境中から抽出した少量のDNAの塩基配列を網羅的に解読することは容易ではない。「すべてのDNA配列を読み切ってしまうメタゲノム解析ならば、多数派の生物のDNA数を解析できます。しかし、そこに存在する数千種類の生物のDNAの配列や数を解析するためには、膨大な量のDNAを解析する必要があります。そこで、16S rRNA遺伝子などマーカーとなるDNA断片のみをPCRという手法でコピーをたくさんつくって増幅し、塩基配列を解読することで、試料中に存在する生物種を広く同定する方法が用いられています」

PCRでは、1回の反応サイクルごとにDNAの数を約2倍に増幅できる。ただし、DNAの塩基配列によってその増幅効率は異なる。1サイクルごとに正確に2倍に増幅できるものを効率100%だとすれば、99%や95%のこともあるのだ。

最初の試料に4種類の配列のDNAが均等に25%の構成比で含まれていても、30サイクルを繰り返して増幅した場合、効率100%の配列は40%以上の構成比に増え、効率95%の配列の構成比は10%以下に減ってしまう(図2)。「PCRで増幅した後のデータからは、増幅前の配列別のDNA数や構成比は正確には分からなかったのです」



4 PCRで増幅すると、増幅効率が配列によって異なるため、配列Aは8個、配列Bは7個に増幅された。増幅することでDNAの塩基配列を解読して配列別に分類することができるようになる。

5 配列別のバーコードの種類数は、配列Aが4種類、配列Bが4種類と分かる。それが増幅前の配列別のDNA数に相当する。

図1 定量シーケンス法の原理

バーコードの種類数で増幅前のDNA数が分かる！

星野さんは、PCRで増幅する前の配列別のDNA数を解析する画期的な手法「定量シーケンス (qSeq) 法」を考案した (図1)。

まず、塩基8個から成るDNA断片でバーコードをつくる。4種類の塩基が8個並ぶことで、4の8乗=6万5536種類のバーコードができる。

PCRで増幅する前の16S rRNA遺伝子が書かれたDNAに、それぞれ異なる種類のバーコードを付ける。それにより、バーコードの種類数と試料中のDNA数が一致することになる。

qSeq法の最大のポイントは、PCRで増幅するとDNA数は増えるが、バーコードの種類数は変化しないため、増幅前のDNA数が分かることだ。

PCRで増幅することでDNAの塩基配列の解読が可能になり、配列別に分類できる。同じ配列のDNAに付いたバーコードの種類数から、増幅前の配列ごとのDNA数が分かるのだ。

「このqSeq法のアイデアを思い付いた後に、過去の論文を調べてみると、PCRで増幅する前にバーコードを付けるという手法を、2014年ごろにアメリカの研究グループが発表していました」

その主な目的は個人ごとの塩基配列の違いを調

べる「一塩基多型 (SNP)」の研究で、バーコードの付け方もqSeq法とは異なっていた。また、星野さんは増幅後のバーコードの種類数から増幅前のDNA数を確率的に推測できることを示した。

増幅前のDNAにバーコードを付ける際、すべてに異なる種類を付けることができれば、増幅後のバーコードの種類数と、増幅前のDNA数は完全に一致する。しかしある確率で、同じ種類のバーコードが複数のDNAに付いてしまう。すると、増幅後のバーコードの種類数よりも、増幅前のDNAの数は多かったことになる。「バーコード付加の部分は先行されていたのですが、その確率をポワソン分布に基づき計算し、増幅後のバーコードの種類数から増幅前のDNA数を推測できることを示し特許を取得できました」

環境DNAや腸内細菌などさまざまな研究分野へ貢献

星野さんたちは、さまざまな試料中に含まれる16S rRNA遺伝子のDNA数を、qSeq法で解析する実験を行った。個々の標的DNAに対してそれぞれ専用の分析系 (アッセイ系) を構築できれば、別の手法でDNA数を正確に解析することができる。その正解数とqSeq法で導き出したDNA数がほぼ一致した (図3)。

さらに、DNAの正解数が分かっている模擬試料を使った実験でも、qSeq法によりほぼ正確にDNA数を解析できることを確かめた。

「16S rRNA遺伝子に限らず、特定のDNAを対象にPCRで増幅して塩基配列の解読を行うあらゆる研究分野に、qSeq法は適用できます」と星野さん。2010年代に入り、「環境DNA」の研究が盛んになっている。水中や土壌など環境中のDNAの解析により、その環境に生息する生物の種類や個体数を推定し、生態系の持続的利用や環境保全に貢献しようという研究だ。2018年には、日本に環境DNA学会が設立された。「たとえば、特定の環境の時系列的な変化を調べる場合、従来の手法では、ある種類が増えて、ある種類は減ったという大ざっぱな傾向は分かっても、どれだけの数の増減があったのかという定量的な議論は難しい状況でした」

qSeq法は環境DNAの研究に大きく貢献する可能性がある。JAMSTEC海底資源研究開発センター調査役の山本啓之さんたちは、qSeq法で解析ができる実験キットを開発するとともに、海中のプランクトンの分析に適用する実験を始めている。

「魚介類などの分析にqSeq法を適用すれば、海の生物資源の持続的利用に貢献できるでしょう。さらに腸内細菌の研究にも大きなインパクトを与



画像提供: 萩野恭子/高知大学 海洋コア総合研究センター

図4 AIによる微化石の分類実験

AIの機械学習により、偏光顕微鏡画像中の微化石を6種類に分類する実験などを進めている。

図2 PCRの増殖効率の違いが構成比に与える影響

配列ごとのPCR増幅効率の数%の違いが、30サイクル後に配列別の構成比に大きな違いをもたらす。

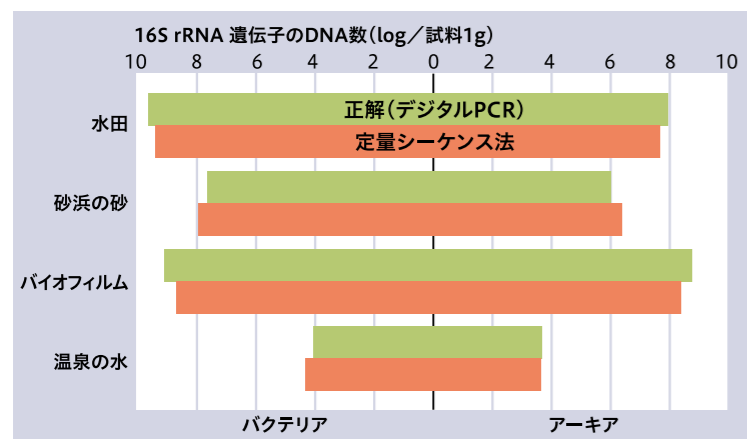
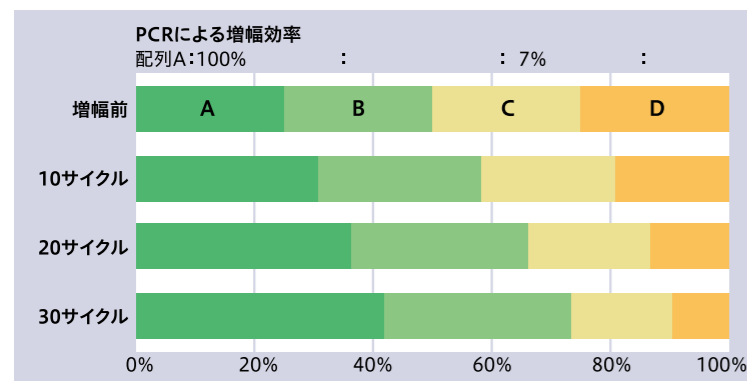


図3 定量シーケンス法の実験例
4種類のいずれの試料でも、デジタルPCRで求めた数 (正解数) に近いDNA数を定量シーケンス法で導き出せることが確かめられた。

えることができるかもしれません」と星野さん。

ヒトの腸内には、500~1,000種類の微生物が生息しており、その種類と数がヒトのさまざまな病気や健康に影響を与えていることが分かり始め、大きな注目を集めている。「腸内細菌をqSeq法で解析してより定量的な研究を行うことで、少数派の微生物の増減が病気や健康に与える影響など、新たに見えてくることもあるかもしれません」

DNAの解読データなど、生物やヒトに関する大量のデータを解析して定量的な研究を進める「データ駆動型サイエンス」が、生命科学や医学の新潮流となっている。qSeq法はデータ駆動型サイエンスを推進する強力な手法となるだろう。

AIで微化石を自動的に分類する

星野さんのもう1つの発明を紹介しよう。「私たちは、IODP (国際深海科学掘削計画) に参加していますが、微化石の専門家の人材不足が大きな課題になっています」

海底の堆積物には、地球や生命の過去の歴史が刻み込まれている。その歴史をひもとくには、得られた試料の年代を調べる必要がある。堆積物の年代を知るために、そこに含まれる珪藻や有孔虫などの微化石の種類が指標として用いられている。

「熟練の科学者が微化石をかたちから種類別に分類することで、堆積物の年代を決定することができます。しかし、後継者が不足しているため、熟練の科学者たちが引退すると貴重な経験や知識が

失われてしまう恐れがあります。私はAI (人工知能) で微化石を自動的に分類して年代決定ができるのではないかと思います。そのアイデアにNEC (日本電気株式会社) が興味を示してくれました」

まず、熟練の科学者たちが分類した微化石の種類ごとの正解画像をたくさんAIに学習させる。すると、AIは種類ごとのかたちの特徴を抽出して分類できるようになると期待される。

「最初のきっかけをつくったのは私ですが、私はAIや微化石の専門家ではありません。NECのAIの専門家にJAMSTECや高知大学、産業技術総合研究所の微化石の専門家たちが加わり、システムの開発を進めています」 (図4)

掘削船の船上で掘削試料から微化石の標本 (プレパラート) を技術者が作製し、顕微鏡画像を撮影。その画像からAIが微化石を分類して堆積物の年代を自動的に決定できるようにすることが目標だ。

「アイデアを思い付いたら、すぐにやってみるのが私の研究スタイルです」と語る星野さん。これからも、さまざまなイノベーションの種が星野さんから生まれ出ることだろう。 **BE**

特許情報

- 特許第6284137号
標的核酸の定量方法及びそのためのキット
- WO2018/207885
解析装置、地層年代推定装置、解析方法、地層年代推定方法、およびプログラム

【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。



飼う、みる、測る 深海生物の餌を知る方法

地球情報館公開セミナー 第215回 (2017年12月16日開催)

野牧秀隆 生物地球化学研究分野 主任研究員

餌を知ることが大事な理由

今回のテーマは、深海生物の餌を知る方法です。生物の餌を知ることがなぜ大事なのでしょうか。

生物の分類にはいろいろありますが、栄養となる有機物をどのように手に入れるかに注目すると、大きく従属栄養生物と独立栄養生物に分けられます。従属栄養生物は生育に必要な有機物を外から取り込む生物で、動物と菌類、一部のバクテリアなどが含まれます。独立栄養生物は有機物を自分でつくり出せる生物です。光のエネルギーを使い光合成によって有機物をつくる植物や、酸化還元による化学エネルギーを使い化学合成によって有機物をつくる一部のバクテリアなどがいます。従属栄養生物にとって餌は栄養を取り入れる唯一の方法であり、餌なしには生きていけません。そして餌は、どこにすんでいるのか、体の大きさはどのくらいか、どのような動きをするのかなど、生物の生態と密接に関わっています。

また、海であれば、植物プランクトンが有機物をつくり、それを動物プランクトンが食べ、動物プランクトンを小魚が食べ、小魚を大きな魚が食べます。こうした食物連鎖によって、餌に含まれる炭素や窒素、リンなどが一次生産者から高次消費者に移っていきます。餌が分かれば食物連鎖が分かり、食物連鎖が分かれば地球のなかで元素がどのように循環しているのかが分かります。

さらに、生物が何を食べるかは、持続可能な水産資源の利用や、養殖や水族館での適切な飼育にも関わります。

こうしたさまざまな理由から生物の餌を知ることが重要なのです。

生物は種類にもよりますが数十種類も

の生物を食べているため、「食べる・食べられる」という食物連鎖の関係はとて複雑です。それは、ひとつながりの鎖ではなく、網の目のようにつながっていることから、食物網とも呼ばれます。では、その複雑な関係をどのように調べるのでしょうか。

深海生物のいろいろな食性

深海は生物にとって特殊な場所です。太陽光が届かないため、光合成による有機物の生産ができません。化学合成によって有機物をつくる生物がたくさんいる場所は、深海底のうちの0.1%以下です。そのためほとんどの深海生物は、海の表層で植物プランクトンがつくった有機物の残りかすや、生物の遺骸や排泄物を主に食べています。それらはマリンスノーとして落ちてきますが、深海まで届く

量はほんのわずかです。深海生物は、その少ない栄養をどうにか手に入れようとして苦勞しています。そうした深海生物の食性・栄養の取り方には、濾過食、堆積物食、植食、肉食・腐肉食、バクテリア食、雑食、微生物共生などがあります。

濾過食は、海中を流れている有機物の粒子をえらや触手などで濾過して捕集することで少ない栄養を効率的に集めます。堆積物食は、落ちてきたマリンスノーを効率よく集めるために堆積物の表面を薄く剥ぎ取るように食べて、そのなかで消化できるものから栄養を取ります(図1)。植食は、マリンスノーのなかでも植物プランクトンの遺骸を選択的に食べるものです。栄養価が高いのですが、それが深海に大量に供給されるのは植物プランクトンが急激に増殖する春のブルームの直後だけです。



図1：堆積物に残されたナマコの摂食痕 ナマコは堆積物食で、表層から落ちてきたマリンスノーが積もっている堆積物の表面を剥ぎ取るように食べる。北西太平洋の凌風海山の北方、水深5,255mで、有人潜水調査船「しんかい6500」によって撮影。

生物の生態を考える上で、何をどれだけどのように食べているのかという食性を知ることは、非常に重要です。

では、深海生物の食性にはどのようなものがあるのでしょうか。

そして、深海生物の食性を調べるにはどのような方法が使われているのでしょうか。

食物の少ない深海環境に生きる生物の「食」について紹介します。

腐肉食は、たまに降ってくる魚やクラゲ、海生哺乳類など大型生物の遺骸や深海で死んだ生物の遺骸を食べます。日本海でときに大発生して漁師を困らせるエチゼンクラゲも、その遺骸は深海でカニのよい餌になっていたりします(図2)。クジラの遺骸に数千匹のコンゴウアナゴが群がっている様子が撮影されたこともあります(図3)。数ヶ月もすれば骨だけになってしまい、次は骨のなかの有機物を食べる生物が集まってきます。

バクテリア食は、堆積物のなかにいるバクテリアを食べます。バクテリアは大量にいるので、線虫など小型の生物にとって格好の餌になります。雑食は、何でも食べます。微生物共生は、体の表面や体のなかに共生している微生物が化学合成によってつくった有機物を受け取ったり、その微生物を食べたりします。

深海生物の餌の調べ方：

餌を食べている様子を見る、飼育する

深海生物が何を食べているかを調べる方法はいろいろあります。摂餌生態観察は、深海で食べている様子を見るものです。何をどのように食べているのかが直接分かりますが、観察中に餌を食べるかどうかは運次第であり、また、そのときに食べたものがいつも食べているものとは限りません。潜水船などを用いた調査では、摂餌生態を観察できるのは数分から数時間であり、いつも食べているものをきちんと知ることは困難です。

一方、浅海の生物の行動観察には最近、バイオロギングが使われています。温度や圧力、加速度、映像などを記録できる装置(ロガー)を生物に取り付け、海に戻します。ロガーは一定期間後に外れ、それを回収して解析すると、生物の



図2：エチゼンクラゲを食べるカニ

深海に沈んだエチゼンクラゲの遺骸にカニやパイガイが集まってきた食べている。この周辺では、こういった遺骸がいくつも見られた。日本海の隠岐堆、水深913mで3000m級無人探査機「ハイパードルフィン」によって撮影。



図3：クジラの遺骸に群がるコンゴウアナゴ

漂流していたクジラの遺骸を相模湾の海底に沈めてから約2週間後の様子。おびただしい数のコンゴウアナゴが集まっていた。水深920m、「ハイパードルフィン」によって撮影。

自然界での行動や何を食べていたのかが分かります。数日から数ヶ月といった長期間での観察が可能で、その生物の一般的な摂餌行動を知ることができます。深海生物のバイオロギングは現状では難しいですが、ロガーがさらに小型化し、深海生物にも簡単に装着できるようになれば、深海生物の摂餌に関する貴重なデータを得られるかもしれません。

運に頼らずに餌を食べる様子を観察できる方法に、室内飼育実験があります。JAMSTECが開発した「ディープアクアリウム」は、深海生物を現場の圧力を保ったまま持ち帰ることができ、餌を食べる様子を窓から観察できます。しかし飼育できる生物の数は限られるため、加圧しなくても生きていられる生物は通常の水槽に入れて観察します。ところが、たとえば有孔虫の場合、室内飼育では深海に比べて活性が低く、深海の現場ほど餌を食べません。ある種のバクテリアの場合は、室内飼育の方が現場より活性が高くなります。やはり、生物が天然の状態でも何を食べているのかを知るには、圧力条件も重要なのです。

そこで私は、現場培養装置を用いた実験を行っています(図4)。同位体という、化学的な性質は同じだけれども重さの違う元素で標識を付けておいた藻類、バクテリア、グルコースなどを堆積物中にいる生物に与えます。一定期間後に堆積物ごと船上に回収し、生物が取り込んだ同位体の量を測定してどの餌をどれだけ食べたかを調べます。それによって、植食か、バクテリア食か、堆積物食かなど生物の天然での食性が分かります。しかし、ある程度隔離された空間に生物を閉じ込めて餌を与え後日回収する必要があるた



のまき・ひでたか。1978年、長野県生まれ。東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了。博士(理学)。日本学術振興会特別研究員を経て、2006年よりJAMSTECポストドクトラル研究員。海洋・極限環境生物圏領域研究員などを経て、2013年より現職。主な研究テーマは、深海生態系とそこで起きている物質循環。

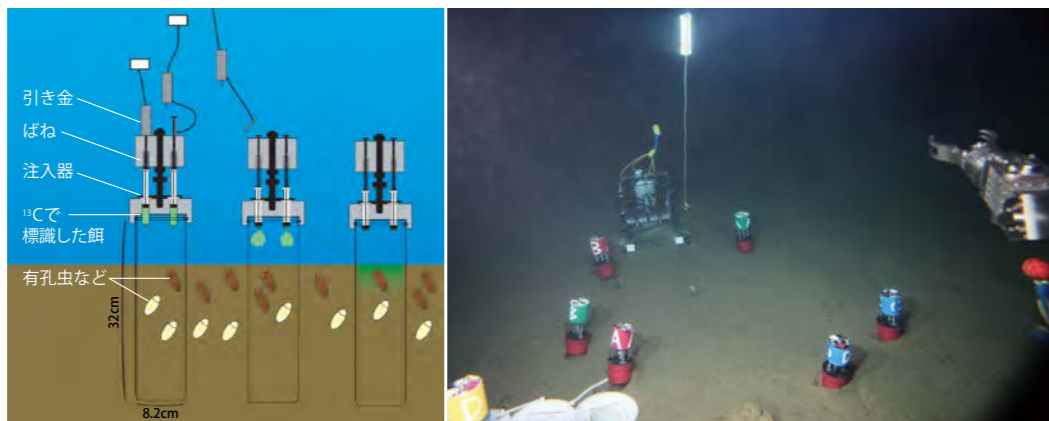


図4：現場培養装置 装置を堆積物に設置した後、安定同位体である ^{15}C や ^{15}N で標識した餌をまく。一定期間後に堆積物ごと船上に回収し、生物が餌をどれだけ食べたかを調べる。左は装置の仕組み。右は深海の堆積物に設置した様子で、中央付近に長期培養に用いる開放型の培養装置が、その周辺に短期培養に用いるコア型の培養装置が設置されている。

め、大型生物には不向きです。また、自然界に存在するすべての餌を同位体で標識して与えることは困難なため、餌についてある程度事前に分かっている生物に有効な手法といえます。

口、歯の形状や腸管内容を調べる

アリの舌がアリ塚のなかのシロアリを食べるのに適していたり、サメの歯が魚をかみちぎるのに適していたりするように、口や歯の形状と餌は密接に対応している場合があります。そのため、口や歯の形状から食べているものを推定できます。ほかの手法に比べると餌の特定の精度は落ちますが、死んだ試料や化石にも応用可能です。しかし、ある種類で口や歯の形状と餌に対応関係があるからといって、ほかの種類でも成り立つとする過度な一般化は危険です。

採取した生物の腸管の内容物を取り出して観察する方法もあり、餌の生物をほぼ種レベルで特定できます。ただし、クラゲなど消化されやすい餌は、食べていても認識できないことがあります。また、小型の生物には不向きです。

最近、腸管内容物のDNA解析も行われています。消化されやすい餌でもDNAは残ることがあるため、内容物そのものを見るより正確に、ほぼ種レベルで餌の生物を特定できます。解剖する必要もないため、小型の生物にも適用できます。ただし、内容物を直接観察する場合と同様、腸管に残っているものしか解析できないため、分かるのは食べてから排せつされるまでの数日間の情報です。また、腸管の内容物と、消化・吸収されて体に残るかは、別問題です。食べたけれども消化できずに排せつされてしま

こともあります。ナマコは堆積物を食べてなかにある有機物を消化しますが、ナマコの糞を調べたところ炭酸カルシウムの殻を持つ有孔虫が消化されずに生きていたという報告もあります。また、魚やクジラの胃腸からプラスチックが見つかる例があるように、口から食べて胃腸に入っているだけでは本当は餌とはいえません。

体に残る餌の化学情報を調べる

食べる餌に応じて生物の体に残る化学物質や元素の量が時間をかけて変わっていきます。それを調べることで、生物が「胃に入れた」だけでなく消化・吸収したものを調べることもできます。

その方法の1つが、炭素と窒素の安定同位体比の解析です。同位体とは、現場培養実験でも出てきましたが、同じ元素で、中性子の数が異なるために質量が違

う原子同士をいいます。放射線を出してほかの原子に壊変していくものが放射性同位体、壊変を起こさないものが安定同位体です。自然界に存在する炭素の大部分は質量数12 (^{12}C) ですが、質量数13 (^{13}C) のものが1.1%含まれています。窒素は、大部分が質量数14 (^{14}N) で、質量数15 (^{15}N) のものが0.36%含まれています。最も存在量の多い安定同位体に対してほかの安定同位体が存在する比率、炭素でいえば $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ を安定同位体比とい

います。同位体は、化学的な性質は同じですが、質量が違うので反応速度がほんの少し違います。餌に含まれていた炭素の一部は呼吸によって、窒素の一部は尿として体から排出されますが、軽い同位体の方がほんの少しだけ排出されやすく、重い同位体はほんの少しだけ体に残りやすいのです。そのため食物ピラミッドの上の方

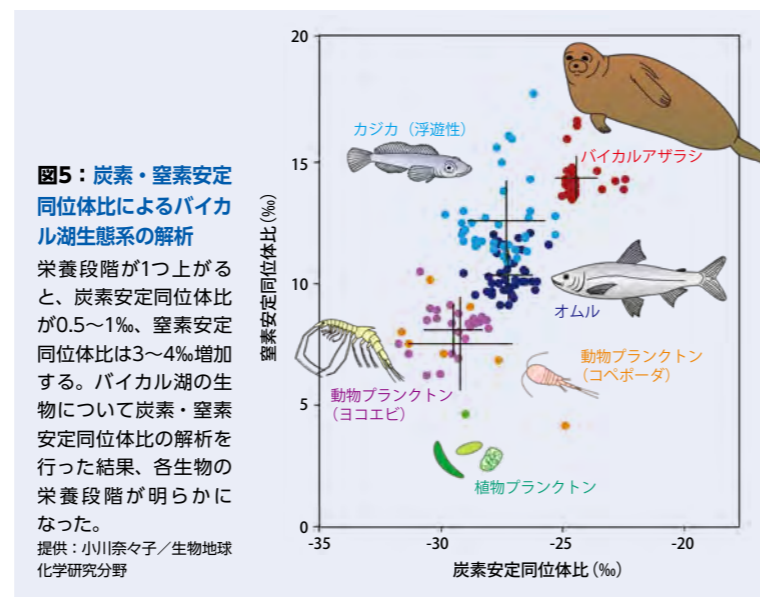


図5：炭素・窒素安定同位体比によるバイカル湖生態系の解析

栄養段階が1つ上がると、炭素安定同位体比が0.5~1‰、窒素安定同位体比は3~4‰増加する。バイカル湖の生物について炭素・窒素安定同位体比の解析を行った結果、各生物の栄養段階が明らかになった。
提供：小川奈々子/生物地球化学研究分野

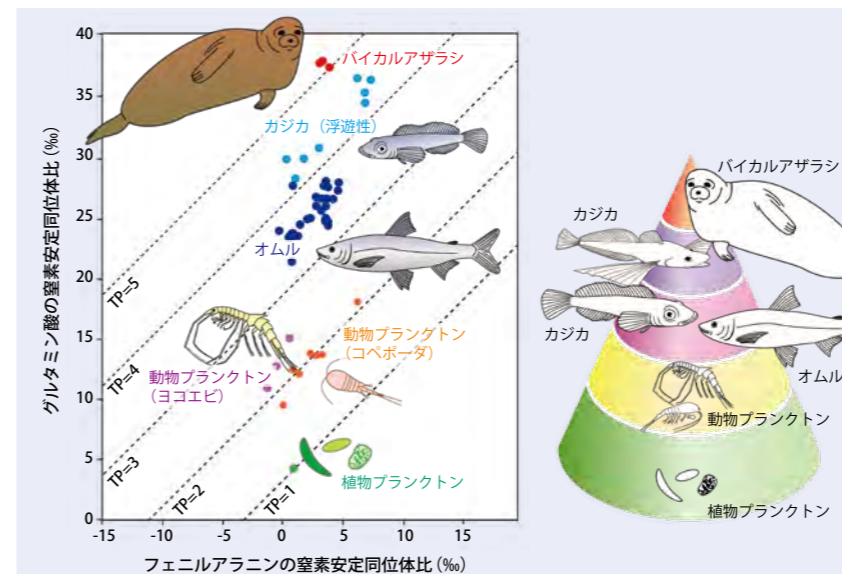


図6：アミノ酸の窒素安定同位体比によるバイカル湖生態系の解析

グルタミン酸は、栄養段階が1つ高くなると窒素安定同位体比が約8‰ずつ上がる。フェニルアラニンは、栄養段階が高くなってもほとんど変わらない。グルタミン酸とフェニルアラニンの窒素安定同位体比の差が大きいほど、栄養段階が高いと推定できる。右は、推定されたバイカル湖の食物ピラミッド。
提供：小川奈々子/生物地球化学研究分野

にいる、つまり生物の栄養段階が上がるほど体内には重い同位体が増えていきます。栄養段階が1つ上がると、炭素安定同位体比が餌よりも0.5~1‰（パーミル、1‰は1,000分の1）とほんの少しだけ増加し、窒素安定同位体比は3~4‰増加します。わずかな差ですが、安定同位体比を正確に測ることでその生物の栄養段階や食物網内での位置がわかります。

深海の例ではありませんが、バイカル湖の生物について炭素・窒素安定同位体比解析を行うと、各生物の栄養段階と食物網の構造がきれいに見えてきました(図5)。

一方で、相模湾の深海生物について解析したところ、食物網構造はそれほど明確ではありませんでした。異なる炭素・窒素安定同位体比を持つ餌が1つの生態系内にたくさんあると、生物がそれらを混合して食べた場合、同位体比の情報も平均化されてしまうからだと考えています。私の研究では多細胞生物だけではなく単細胞の真核生物などについても測定していますが、栄養段階が1つ上がると安定同位体比がどれだけ増えるかは生物の分類群によって異なることも、食物網構造がきれいに見えてこない大きな原因です。

そうした欠点を解決できる方法として、

アミノ酸の窒素安定同位体比解析が注目されています。生物の体をつくっているアミノ酸には20種類あり、この手法ではグルタミン酸とフェニルアラニンに注目します。グルタミン酸は従属栄養生物の体内でも生成され、栄養段階が1つ高くなると窒素安定同位体比が8‰ほど上がります。一方、フェニルアラニンは従属栄養生物の体内では生成されないため、栄養段階が高くなっても窒素安定同位体比がほとんど変わりません。つまり、生物のフェニルアラニンの窒素安定同位体比は餌生物の値を示し、フェニルアラニンとグルタミン酸の窒素安定同位体比の差が栄養段階を表します(図6)。

市場に出回っているウナギの多くは、ウナギの稚魚(シラスウナギ)を捕獲して育てたものです。しかし近年、ウナギの稚魚の捕獲量が減少していることから、卵から幼生、稚魚、そして成魚へと育てる完全養殖の実現が目指されています。ところが幼生から稚魚に育てることが難しく、その原因の1つは餌だといわれています。天然のウナギの幼生が何を食べているのか分かっておらず、与えていた餌では幼生から稚魚への変態に必要な栄養素が不足している可能性があったのです。そこで天然のウナギの幼生についてアミノ酸の窒素安定同位体比解析を行

い、天然の幼生が食べていると考えられる組成に近い餌に変えた結果、養殖で幼生から稚魚へと成長できる割合が増えたそうです。このようにアミノ酸の窒素安定同位体比解析による栄養段階の推定は、養殖にも役立っているのです。

天然のデータロガー

餌の推定に安定同位体比を使う手法には、食物網構造を理解できること以外にも大きなメリットがあります。生物の体には、貝殻や魚の耳石など成長に伴って年輪のように形成されていく硬組織があります。そのなかにも、成長段階ごとの同位体比の情報が保存されていきます。それらの情報を順番に測定していくことで、その生物が生まれてからどのような餌を食べてきたのかを知ることができるのです。

同位体比解析に用いられるのは、炭素と窒素だけではなく、酸素安定同位体比からは温度と塩分、ストロンチウム安定同位体比からは生息域が川か海か、ホウ素安定同位体比からはpHを、というように、同位体比からは摂餌生態だけでなくすんでいた環境などいろいろな情報を知ることができます。同位体比は、天然のデータロガーなのです。最近では、安定同位体だけでなく、炭素放射性同位体比から餌の起源の推定も行われるようになってきました。

このように生物の食性を調べる方法はいくつもあり、それぞれ得られる情報の質が違い、利点も欠点もあります。私たちは複数の方法を組み合わせたり、新しい方法を開発したりして、深海生物が何を食べているのか、より正確な情報を得られるように努力しています。



第21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では全国の児童を対象としたコンテストを開催しています。「海」や「海の研究」、「海を調べる技術」についてのあなたの「夢」を、ハガキサイズの紙いっぱいに、絵やCGや文章で自由に表現してください。入賞特典として、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。

応募期間：

2018年12月3日（月）～2019年1月21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。

『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、①～⑥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けます)。ご入金を確認次第、商品をお送り致します。平日10時～17時に限り、横浜研究所地球情報館受付にて、直接お支払いいただくこともできます。なお、年末年始などの休館日は受け付けておりません。詳細は下記までお問い合わせください。

■お問い合わせ・申込先

〒237-0061 神奈川県横浜須賀野市夏島町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

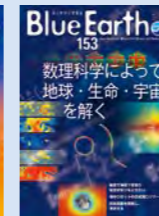
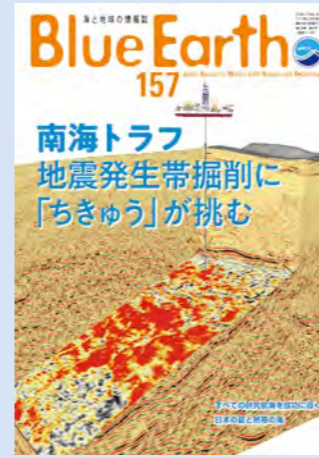
Eメール info@jamstec.go.jp

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(160号)までとさせていただきます。
バックナンバーの購読をご希望の方も上記までお問い合わせください。

■バックナンバーのご案内

<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 2018年12月10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ちは、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
株式会社アイワエンタープライズ	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
株式会社天野回漕店	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	クローバテック株式会社
株式会社SGKシステム技研	株式会社グローバルオーシャン
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	鉱研工業株式会社
株式会社OCC	株式会社構造計画研究所
株式会社オキシテック	神戸ベイント株式会社
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	コスモス商事株式会社

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	太陽日酸株式会社
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	株式会社帝国機械製作所
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ーコントロール	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
シモダフランチ株式会社	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	株式会社清友農材センター
株式会社関ヶ原製作所	株式会社清友農材センター
石油開発サービス株式会社	トローホーテック株式会社
石油資源開発株式会社	新潟原動機株式会社
セコム株式会社	西芝電機株式会社
セナーアンドバーンズ株式会社	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	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	三菱スベース・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
日本ベイントマリン株式会社	株式会社森京建築事務所
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
濱中製鎖工業株式会社	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
東日本タグポート株式会社	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	
株式会社フクロジャパン	
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	

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 神奈川県横浜須賀野市夏島町2番地15
TEL. 046-866-3811 (代表)

横浜研究所

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

むつ研究所

〒035-0022 青森県むつ市大字関根字北関根690番地
TEL. 0175-25-3811 (代表)

高知コア研究所

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

東京事務所

〒100-0011 東京都千代田区内幸町2丁目2番2号
富国生命ビル23階
TEL. 03-5157-3900 (代表)

国際海洋環境情報センター

〒905-2172 沖縄県名護市宇豊原224番地3
TEL. 0980-50-0111 (代表)

海と地球の情報誌 Blue Earth

第30巻 第6号 (通巻158号) 2018年12月発行

発行人 村田範之 国立研究開発法人海洋研究開発機構 広報部

編集人 田村真正 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 (p16-19, p24-27)、鈴木志乃 (p20-23, p28-31, 裏表紙)
岡本典明/ブックプライト (p1-13)、坂元志歩 (p14-15)

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)

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。

左：噴出防止装置（BOP）を取り付けたライザーパイプの降下。BOPを水深約2,000mの海底に設置されている孔口装置に接続し、「ちきゅう」と孔口装置をライザーパイプでつなぐ。中央：出番を待つ掘削同時検層ツール。右：カッタリングスをふるうデモンストレーションを行う技術者。カッタリングスとは掘削に伴って生じる岩石の破片で、地質の状態を知る重要な試料である。



©JAMSTEC/IODP

「ちきゅう」、プレート境界断層を目指し掘削中！

2018年10月10日、地球深部探査船「ちきゅう」は静岡県の清水港を出港した。今回の任務は、IODP（国際深海科学掘削計画）第358次研究航海「南海トラフ地震発生帯掘削計画：プレート境界断層に向けた超深度掘削」である。紀伊半島沖熊野灘の南海トラフにおいて、巨大地震を引き起こすプレート境界断層があると予測される海底下5,200m付近まで掘削を行う。2007年から行われてきた「南海トラフ地震発生帯掘削計画」の集大成であり、巨大地震を引き起こすはずみエネルギーが蓄積される領域がどのような地層から成り、現在はどのような状態なのかを明らかにすることを目指す。

「ちきゅう」は今回の掘削地点であるC0002に10月13日に到着し、超深度掘削に向けた準備を開始した。そして、12月3日には「ちきゅう」が2014年に到達した科学掘削における掘削深度記録（海底下3,058.5m）を更新。また、掘削と同時に行う掘削同時検層（LWD）により地層の物性データの取得にも成功した。今後さらに掘り進め、海底下4,700m付近で柱状の地質試料（コア）を採取する。そして海底下5,200m付近まで掘削し、そのあたりに存在すると予測されるプレート境界断層を見つけ、断層のコア試料を採取する計画だ。「ちきゅう」による人類初の挑戦は2019年3月まで続く。

最新情報は「ちきゅう」ウェブサイトの特設ページ（<https://www.jamstec.go.jp/chikyu/j/nantroseize/>）や公式Twitter（@Chikyu_JAMSTEC）で発信しています。ぜひご覧ください。

国立科学博物館にて

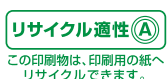
科博NEWS展示「南海トラフ地震発生帯掘削に「ちきゅう」が挑む」開催中！

開催期間：2018年11月13日～2019年3月30日

詳しい情報は、国立科学博物館ホームページ（<https://www.kahaku.go.jp>）をご確認ください。



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