

海と地球の情報誌

Blue Earth

144

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

ISSN 1346-0811
2016年9月発行
隔月6回発行
第28巻 第4号
(通巻144号)



全球海洋観測システム 「アルゴ」

生のマントルから惑星地球の
過去と未来を知りたい

太古の深海熱水環境から探る
生命と地球の物語

1 **特集**

**全球海洋観測システム
「アルゴ」**

20 **社会とつながるJAMSTEC**

アルゴ計画を支える
フロートの投入協力

平野瑞恵
地球環境観測研究開発センター
海洋循環研究グループ 技術スタッフ

22 **Aquarium Gallery**

アクアマリンいなわしろカワセミ水族館
ゆらゆら揺れる餌を見つめる
——バンダイハコネサンショウウオ

24 **私がIODPで解きたい謎**

生のマントルから惑星地球の
過去と未来を知りたい

阿部なつ江
海洋掘削科学研究開発センター
マントル・島弧掘削研究グループ 主任技術研究員

28 **Marine Science Seminar**

太古の深海熱水環境から探る
生命と地球の物語

西澤 学
海洋地球生命史研究分野 研究員

32 **BE Room**

編集後記
「Blue Earth」定期購読のご案内
JAMSTECメールマガジンのご案内

裏表紙 **Pick Up JAMSTEC**

「ちきゅう」国際乗船スクール開催
海洋科学掘削を目指す若い世代が参加

全球海洋観測システム「アルゴ」

水深2,000mから海面まで水温や塩分のデータを取りながら浮上し、データを人工衛星に送信した後はまた自動的に潜っていく。そんな自動観測ロボット「アルゴフロート」3,800台余りが世界の海で稼働中だ。アルゴ観測網によるデータは、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第5次評価報告書にも大きく貢献した。2000年の観測開始から15年を経過し、アルゴ観測網はいまや海洋研究においてなくてはならない存在となっている。

取材協力
地球環境観測研究開発センター

須賀利雄 招聘上席研究員
(東北大学大学院理学研究科 教授)

海洋循環研究グループ
増田周平 グループリーダー
細田滋毅 グループリーダー代理
井上龍一郎 主任研究員
小林大洋 主任技術研究員
長船哲史 技術研究員
佐藤佳奈子 技術主任
平野瑞恵 技術スタッフ

全球海洋化学・物理研究グループ
瀬戸内 慎也 主任研究員

アルゴフロートを
投入するところ

取材協力

須賀利雄

招聘 上席研究員
地球環境観測開発センター
東北大学大学院理学研究科 教授

海の流れを見るためのフロートから、水温・塩分データを取るためのフロートへ。

1990年代、「WOCE（世界海洋循環実験）」と呼ばれる、船舶を使った大掛かりな海洋観測が行われた。「WOCEは20世紀の海洋観測の総決算のようなものでした」と語るのは、国際アルゴ運営チーム（AST）の日本代表を務める須賀利雄さんだ。

WOCEでは、30kmから50kmごとに船を止め、水温や塩分の測定や海水の採取など海面から海底まで詳細な観測を行った。このように航路に沿って観測を行うことを測線観測という。およそ70の測線で1990年から98年にかけて観測が行われ、その後2002年までデータの解析が行われるという長期にわたるプロジェクトであった。

海の状態の変化は意外と速い。「黒潮のように大規模な海流でも週や月の時間スケールで変わっていきます。WOCEのような観測だけでは刻々と変化する海をモニタリングできません。そのため、世界の海を持続的に観測できるシステムをつくるというのが海洋学者の長年の夢でした」と須賀さん。

ここで時計の針を半世紀ほど戻そう。

フロートと呼ばれる海中を漂う装置による観測が初めて行われたのは1950年代半ばのことだった。当時の観測は、水温などのデータを得るためではなく、海中の流れを追跡することが目的だった。フロートには音波を出す装置（ピンガー）が取り付けられ、フロートが発する音波を船で追跡しながら、海中の流れを観測していた。音波を使うのは、海中では電磁波が伝わらないからだ。

実はそういった観測が行われるまで、水深1,000m程度の深海には流れはほとんどないと考えられていた。しかし船で追跡できる狭い範囲ではあるが、この観測によって時間変化する強い流れが存在することが明らかになったのだ。

その後、船で追跡しなくてもフロートからの音波を受信できるシステムが開発され、より広範囲での観測が可能になった。とはいえ、観測は音波の受信装置が配置されている範囲に限られてしまう。

さらに広範囲での観測を可能にするアイデアが、フロートを定期的に海面に浮上させ、人工衛星と通信して位置を知る方法だった。それを実現したのが「アラス（ALACE）フロート」だ。

アラスフロートは水深1,000mの海中を漂流しつつ定期的に海面に出る。そして人工衛星に位置情報を送った後で再び深海へと降りていく。これを繰り返すことで水深1,000mでの海の流れを、広範囲に観測できるようになったのだ。アラスフロートが使

われ始めたのは1990年ごろのことだ。実はWOCEでも水深1,000mでの海の流れを観測することを目的として、1,000台以上のアラスフロートが投入されていた。

アラスフロートによる観測が始まって間もないころ、ある研究者が1つのアイデアを思い付いた。「深海から定期的に浮上するのであれば、そのときに水温や塩分を計測できるのではないかと気付いたのです」と須賀さん。そして現在のアルゴ計画に使われているフロートと同様、浮上時に水温のデータを取るフロートが、1990年代半ばにはすでにつくられた。そしてWOCEの後半には、水温のセン

サーを付けたアラスフロートが海に投入されるようになっていた。間もなく、フロートに搭載可能な塩分センサーも実用化された。

水温・塩分のセンサーが付いたフロートをグローバルに展開して観測網を構築したらどうか。1997年にとある会議で同席した3人のアメリカ人研究者が、アルゴ計画のひな型ともいえるそんなアイデアについて昼食を取りながら語り合ったという。そしてそこから話は急速に進んでいく。

そのうちの1人、アメリカ・スクリプス海洋研究所のディーン・レミック博士が翌1998年に、アルゴ計画の原型となる計画を提言し、その年のうちに

東京で国際学術会議が開催され全球フロート観測網についての議論が行われた。その後すぐに、東京での会議の出席メンバーが核となって、アメリカのほか、日本、イギリス、フランス、ドイツ、カナダ、オーストラリアの計7カ国で「アルゴ科学チーム」が設置され、アルゴ計画のスタートに向けて動き出すことになった。

「その翌年、1999年には実施計画書ができました。非常にスピーディでしたね。海洋研究者たちは、このアイデアが実現したらすごいことだと分かっていて、みんなが飛び付いたということです。そして2000年からアルゴフロートの投入が始まりました」

海洋地球研究船「みらい」から
撮影した夜明け
撮影：柏野祐二 / 地球情報基盤センター

「アルゴ」という名の由来

ギリシャ神話のなかで、英雄イアソン（英語名Jason）は、ヘラクレスや双子の兄弟カストル・ポルックスなど50人の勇者を引き連れて、巨船に乗って黄金の羊毛を求めて大航海を行った。彼らが乗った巨船の名が「アルゴ（Argo）」だ。2001年、アメリカとフランスは共同で、「Jason」という名の人工衛星を打ち上げた。レーダーによる海面高度計を搭載した衛星だ。アルゴ計画の名称は、そのJason衛星との連携を意識して付けられたものである。英雄イアソンは宇宙から、そして巨船アルゴ号は海のなかから、海洋や気候変動の仕組みを解き明かすべく冒険を続けている。なお、Jason衛星の1号機は2013年に運用を終了、現在は2008年に打ち上げられた2号機が観測を続けている。

取材協力

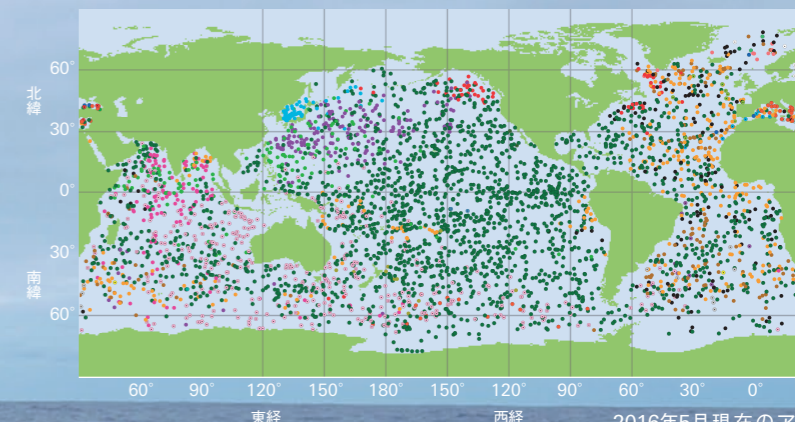
須賀利雄

招聘上席研究員

地球環境観測研究開発センター

東北大学大学院理学研究科 教授

世界の海で約3,800台が稼働中。空間的・時間的に満遍なく観測する。



2016年5月現在のアルゴフロートの分布。国別に色分けされている。合計3,814台が稼働している。そのうち177台を日本が投入した。なお、日本の投入数の累計は1,450台に及び、アメリカに次ぐ。
Argo Information Centerのウェブサイト (<http://www.jcommops.org/board?l=Argo>) より

日米ほかの7カ国が参加してアルゴ計画がスタートし、2000年からフロートの投入が始まった。海洋の変動にはさまざまなスケールのものがあるが、アルゴ計画では、空間的には数百～1,000km程度、時間的には1ヵ月程度以上のスケールで変化するような大規模な変動を捉えることが目的だ。

その目的に合わせて、アルゴフロートの投入台数や観測サイクルは決められた。アルゴフロートは緯

度・経度で3度四方、距離にしておよそ300km四方に1台ずつ投入され、海の表面から水深2,000mまで浮いたり沈んだりを10日サイクルで繰り返しながら水温や塩分のデータを取得する。

計画開始当初の目標台数は、3,000とされた。「冬季に氷が張る海域では、フロートが浮上したときに氷に衝突して故障する可能性があるため、南北60度よりも高緯度の海域は対象外とされました。ま

た、フロートが着底しても故障の可能性があるため、水深2,000mより浅い海域も対象外。地中海や日本海といった縁辺海も当初は除外され、残りの海域を緯度3度×経度3度に1台投入することで計算すると、3,200台ほどになりました。きりのよい数字ということで3,000台が当初の目標とされたのです」と須賀さん。

3,000台という目標は、2007年にすでに達成された。「世界の海のどこかで5分に1回観測を行っている計算になります。1日に300回、1年間に約11万回の観測が、世界の海の至るところで行われる計算です」。その後もフロートの数は増え、現在は3,800台余りが世界中の海で稼働中だ。

アルゴ計画の観測網は、それまでの観測と比べて画期的だった。近代海洋観測は1870年代に世界一周しながら観測を行ったイギリスの「チャレンジャー号」から始まったとされている。そのときからおおよそ140年間で、船舶などで水温と塩分を水深1,000mより深くまで計測した観測点は50万点ほどだ。しかも特に南半球では、観測されたことのない海域が多かった。全球スケールの海洋の変動を考える場合、そのような観測の空白域の状態は適当な仮定のもとで推定するしかなく、見積もりの誤差が大きくなってしまふ。一方、アルゴ計画では、2000年にフロートの投入が開始されてから10年ほどが経過した2012年には、100万点を達成した。過去140年間の2倍の観測が約10年間で行われたのである。しかも、外洋に限られるとはいえ、全球の海洋で満遍なくデータが取得されている。

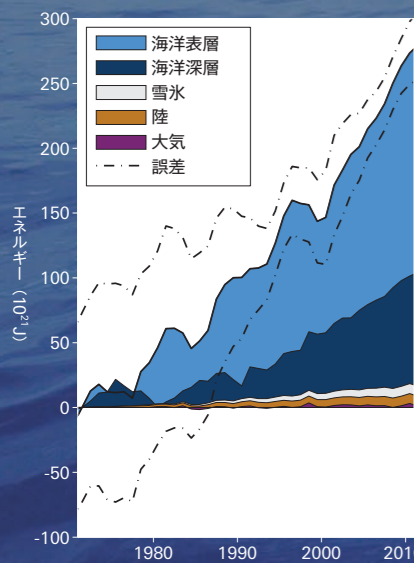
観測点の数や海域的な偏りの問題だけではない。船舶による観測は、冬には海が荒れることが多いため難しく、夏季に行われることが多い。季節的に偏っているのだ。それに対してアルゴフロートは、

季節に関係なくデータを取得できる。

空間的だけでなく、時間的にも偏りなく決まった間隔でデータを得られることが非常に重要なのだと須賀さんはいう。アルゴの観測によって観測の空白域が少なくなることで、たとえば地球温暖化に伴い海洋に蓄積されている熱量、すなわち貯熱量の見積もりの誤差などが、過去と比べて格段に小さくなってきている。「IPCC第5次評価報告書において、地球が人為起源の影響で温暖化しているのは事実であるとしていますが、それは貯熱量の見積もりの誤差が小さくなってきたことによるところが大きい。そして誤差を小さくするのにアルゴが大きく貢献しているのです」

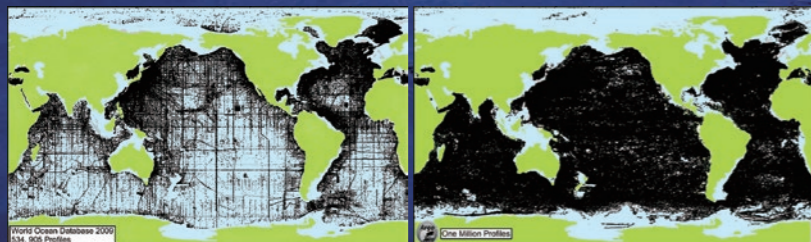
ただしアルゴの観測網だけあればよいわけではない。船による観測は、非常に詳細かつ正確なデータを得ることができる。人工衛星も含め、さまざまな手段によって得られたデータはそれぞれ利点も欠点もある。さまざまな観測を総合することによって、海洋や気候変動などの解明が進んでいくのだ。

7カ国から始まったアルゴ計画は、現在では30カ国以上が参加している。アルゴ計画には、気象観測におけるWMO（世界気象機関）のような、きちんとした国際的な枠組みがあるわけではないことも特徴の1つである。アルゴ計画に賛同する国々が自主的に参加しており、各国で行われているプロジェクトの“有志連合”的な色合いが濃い。ただし有志連合的とはいえ、各国がばらばらに動いているわけではない。計画のまとめ役として参加各国の研究者などの代表によって構成されるのが、国際アルゴ運営チーム（AST）だ。ASTでは1年に1回会合が開かれる。そういった場などで情報交換や調整を行うことで、ASTがアルゴ計画全体のかし取り役を担っている。



地球の貯熱量変化の見積もり。地球温暖化に伴い1970年以降に地球が蓄えた熱量の93%は海洋に蓄積された。破線は貯熱量の合計に対する誤差を示している。アルゴ計画がスタートした2000年ごろから誤差が非常に小さくなっている。
出典：IPCC第5次評価報告書

フランスの船により投入されたアルゴフロート
写真はアルゴ計画のウェブサイト (<http://www-argo.ucsd.edu>) より



右はアルゴによる観測点、左は1870年代の「チャレンジャー号」以降の観測点のうち水深1,000mより深いところまで水温・塩分を計測した場所を示している。アルゴでは空間的に満遍なく観測されているだけでなく、時間的にも満遍なく観測されている。

アルゴフロートは自律型観測ロボット。チェック後のデータは一般公開される。

取材協力

須賀利雄

招聘 上席研究員
地球環境観測研究開発センター
東北大学大学院理学研究科 教授

アルゴフロートは通常、水深1,000mのところまで下がり、海面に向かって浮上していきながら水温や塩分のデータを取得する。海面に浮かび上がっている間に上空の人工衛星へデータを送信し、その後再び水深1,000mへと降りていく。このプロセスを10日ごとに繰り返す。

観測を行わないときに水深1,000mで漂流させることにはいくつかの意味があると須賀さんはいう。「計画のスタート当初、最も心配されていたことはセンサーの劣化でした」。フロートは投入後にメンテナンスなどは行えないので、センサーが劣化すれば使えなくなってしまいます。太陽光が届く比較的浅いところでは、光合成を行う生物が付着してセンサーが劣化する可能性が高い。「水深が深ければ生物活動が不活発な上に水温も安定しています。センサーが長持ちすることから、太陽光の届かない深海で漂流させることになりました」

もう1つの理由が、深海は表層に比べて流れが弱いことだ。アルゴ計画では、フロートが特定の海域

に偏ることなく、300km四方に1台ずつ均等にあることが重要だ。できるだけ投入海域から外れないよう、流れが弱い深海に停留させておくというわけだ。

アルゴフロートにはいくつかの種類があるが、基本的な仕組みはほぼ同じだ。円筒形をしており、上部に水温、塩分、圧力を計測するセンサーや、通信用のアンテナが取り付けられている。アンテナなども含めた全長は1.6~2mほどだ。内部には浮き沈み用のポンプや制御用のコンピュータ、モーターやバッテリーなどが収められている。本体の底部の外側には油室と呼ばれるゴム製の袋がある。フロートが浮上するときにはポンプで油を送り込み、油室の体積を増やすことで浮力を増す。逆に油室から油を抜けば体積が減るので浮力が落ちて沈むという仕組みだ。

「常に圧力をモニターしながら1,000mの深度を維持します。概念としては簡単ですが、大きく浮き沈みしないようにタイミングや油の量を調節するなど、実際に自動で制御するのはなかなか大変です」

と須賀さんはいう。

水深2,000mから海面に浮上したフロートは、水温や塩分などのデータを衛星に送信する。衛星に送られたデータは、各国の地上局に送られた後、「リアルタイム品質管理」と呼ばれる機械的なチェックが行われて明らかなエラーが取り除かれる。リアルタイム品質管理が施されたデータは24時間以内に世界データセンター(GDAC)から公開されるほか、全球気象通信システムを通じて世界各国の気象機関に配信されて気象予報などに活用されることになる。

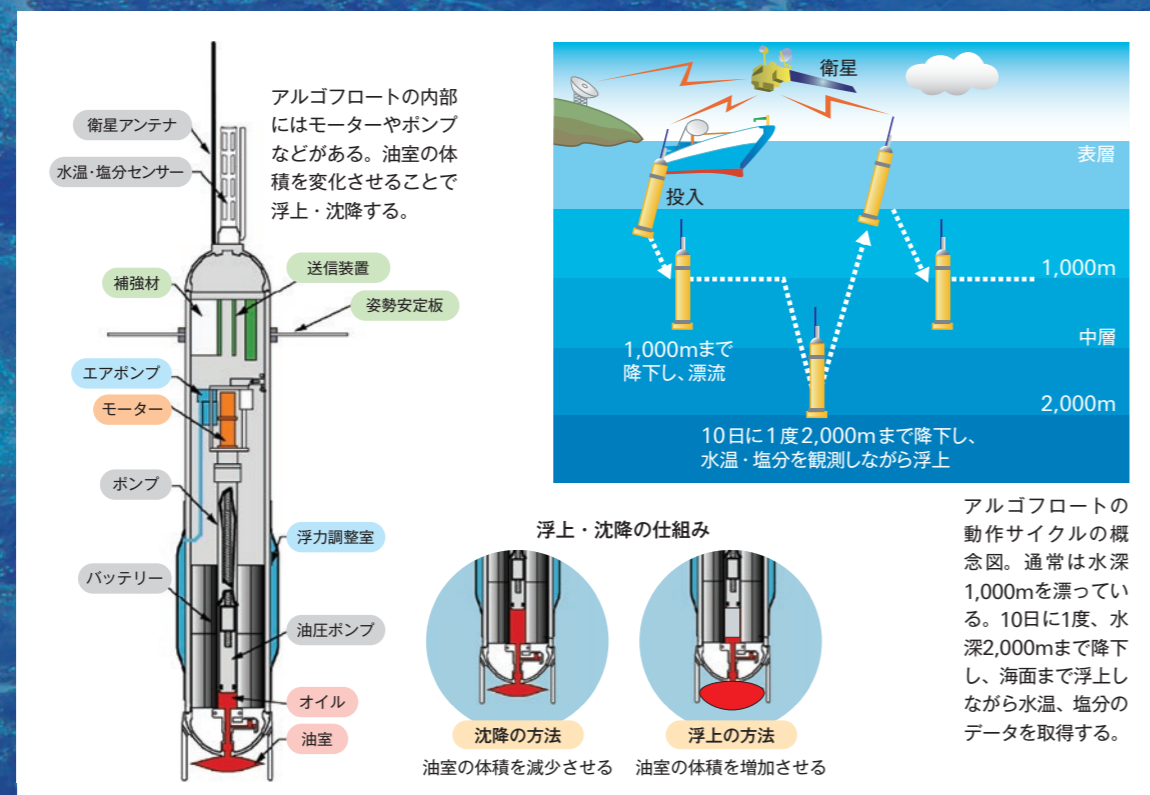
GDACに送られたデータは、さらにもう一度チェックされる。機械的なチェックだけでは取り除けないエラーがあり、そのままでは気候変動などの研究には利用できないからだ。研究に利用できる精

度を担保するために、半年~1年かけてより高精度な「遅延品質管理」と呼ばれるチェックが行われる。海洋研究開発機構(JAMSTEC)をはじめとした研究機関で研究のために使われるのは、遅延品質管理が施された後のデータだ。このようなデータの品質管理は、計画に参加している各国が分担して行っている。日本ではリアルタイム品質管理は気象庁が、遅延品質管理はJAMSTECが担当している。

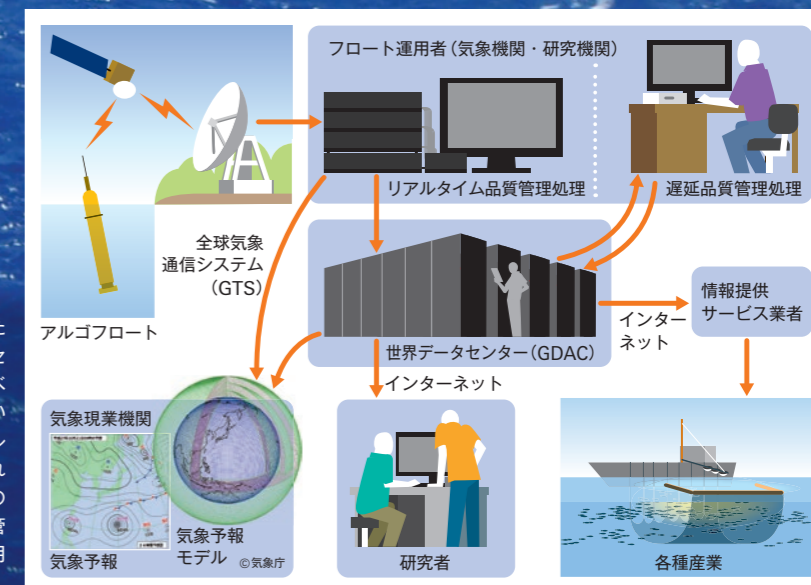
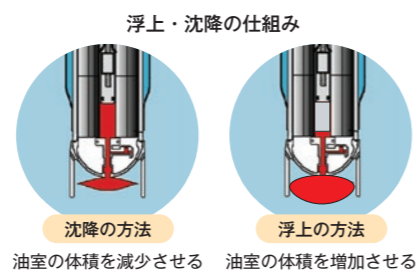
GDACで公開されているデータは、インターネットを通じて誰でも見ることが可能で、たとえば水産業などでも活用されている。「空間的、時間的に満遍なく観測できるようになったことがアルゴ計画最大の特徴ですが、データの配信方法や品質管理もアルゴ計画の特徴の1つです」と須賀さんはいう。「従来の観測プログラムは、観測自体に重きが置かれ、観測によって得られたデータをどうするかは後回しになっていたところがあります。ところがアルゴ計画では、計画の設計段階から、データの配信方法や品質管理のことまで考えたシステムがつけられたのです。これは画期的なことでした」

海面を漂う
アルゴフロート

アルゴフロートは、複数のメーカーからほぼ同等の機能を持った製品が販売されている。全長は1.6~2m、重量は約20~50kgである。運用寿命は3~7年ほどで、搭載電池の容量に依存する。



アルゴフロートの動作サイクルの概念図。通常は水深1,000mを漂っている。10日に1度、水深2,000mまで降下し、海面まで浮上しながら水温、塩分のデータを取得する。



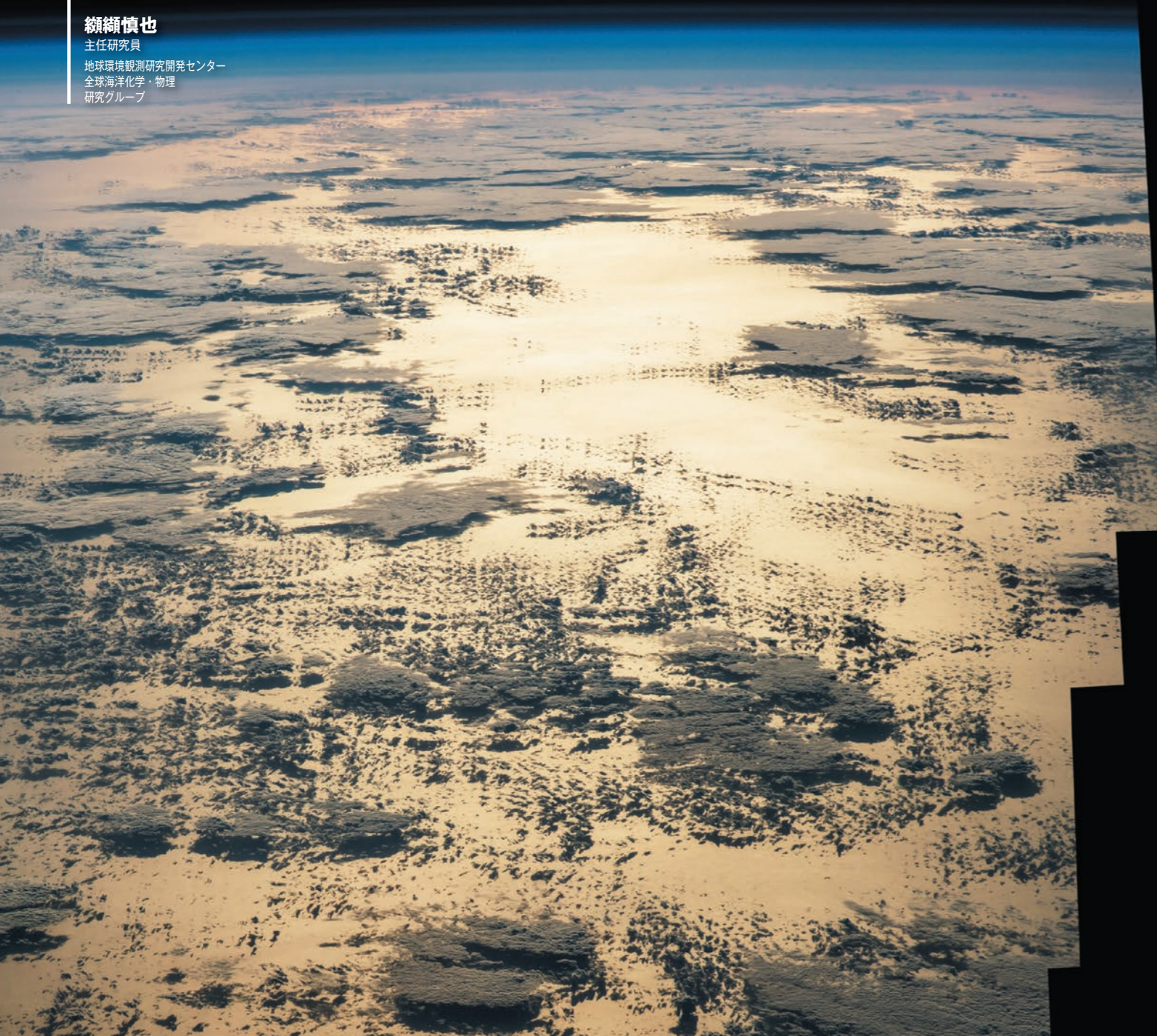
アルゴ計画で得られたデータは、世界データセンターに集められ、すべて一般に公開されている。気象予報にはリアルタイム品質管理処理されたデータが、気候変動の研究などには遅延品質管理処理されたデータが利用される。

地球に蓄えられつつある熱の大部分が、海に吸収されていることが確認された。

取材協力

額綱慎也

主任研究員
地球環境観測開発センター
全球海洋化学・物理
研究グループ



海のなかに関して、かつてない情報をもたらしたアルゴ計画。得られたデータは、さまざまところで生かされている。ここからはアルゴがもたらした成果をいくつか紹介しよう。まずは貯熱量に関することだ。

「地球規模の気候変動を考える場合、最も基礎的なことは地球への熱の出入りのバランスです」。そう語るのは額綱慎也さんだ。「現在は地球に入ってくる熱よりも出ていく方が少なくなっています。つまり地球のどこかに入ってきた熱の一部が蓄えられていることになります」

熱が蓄えられる場所として以前から注目されてきたのが海だ。船による観測などから、海に蓄えられている熱の量（貯熱量）が上昇していることは分かっていた。蓄えられている熱の総量も見積もられてはいたが、正確な量は分からないままだった。

海水は空気より温まりにくく、また海洋には膨大な海水が存在する。そのため、大気全体を1℃上昇させるような熱で海洋全体を温めたとしても、海洋の温度は0.001℃しか上昇しない。海水温の変化は非常に小さいため、海の貯熱量を把握するには水温を精度よく計測する必要がある。「アルゴ計画の当初の目的はまさに、全球的な海洋の貯熱量をしっかりと見積もろうということでした」と額綱さん。

そして実際に、アルゴ計画での観測によって貯熱量の実態が見えてきた。アルゴのデータから、少なくともここ10年においては、熱の出入りのバランスが崩れて地球に残った熱のうちの約9割を海洋が吸収していることが分かってきたのだ。「9割がしっかり捉えられたのであれば、地球に蓄えられた熱量のほとんどを把握できたことになります。非

常に重要性が高い研究成果です」

船による観測は、特に南半球で観測の空白域が多かった。しかしアルゴフロートが全球的に展開されてきたことで、南半球の海洋で吸収されている熱量が非常に多いことも分かってきたという。「以前からそういった予想はありましたが、南太平洋の水温上昇がかなり大きいという認識が固まってきたのはアルゴのおかげです」と額綱さんはいう。

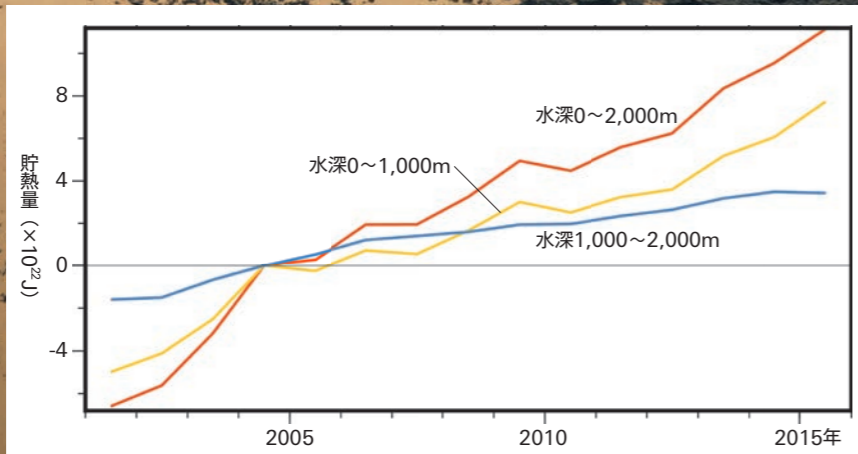
またアルゴのデータによって、気候変動に関するだけでなく、海洋の循環についても詳細が分かるようになってきている。

高緯度から中緯度付近で冷えた水は重くなって沈み込んでいきながら、より低緯度の方へと流れていく。そのとき沈み込んでいく水の流れに沿って水温や塩分の変化も浸透していく。船などによる海洋観測では、同じ場所を頻繁に観測することは難しい。そのため、どのように変化しているのかについてはなかなか把握できなかった。

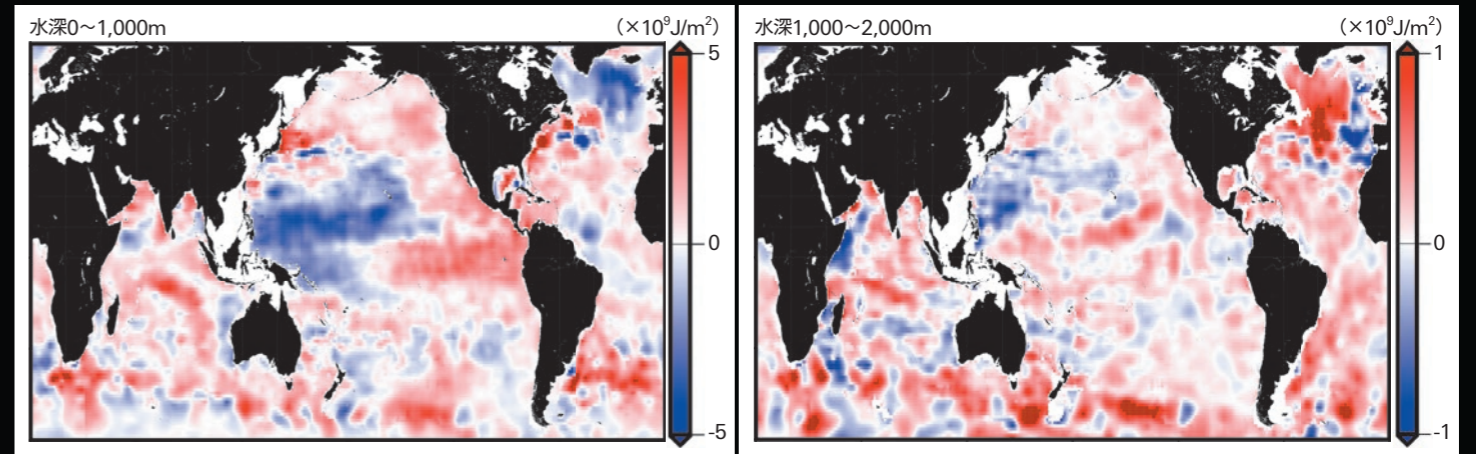
「海洋では、数年から10年スケールの変動現象が卓越しています。長い年月をかけて変化する現象を、たとえば10年に2回観測して、そこから一生懸命想像するしかなかったのです」と額綱さん。

しかしアルゴによって、水深2,000mまでを10日に1度、さらに空間的にも均質に観測を行うことができるようになったことで、水温の変化をより詳細に追うことができ、熱が浸透していく様子が分かるようになってきた。熱が浸透していくスピードは非常に遅いので、浸透の様子を捉えるには長期間観測を続けることも必要だ。海洋の循環が見えてきたのは、アルゴ計画が15年続いたからこそその成果だといえるだろう。

左は水深0~1,000m、右は1,000~2,000mにおける、2004年からの貯熱量の変化。0~1,000mの表層での貯熱量は、エルニーニョやラニーニャ、海洋の10年変動の影響を受け、様ではない。こういった海域による貯熱量変動の差も詳細に把握できるようになった。1,000~2,000mの深い層では、表層と異なり沈み込み海域に近い大西洋北部や南半球高緯度で比較的大きな熱を蓄えている様子が明らかになってきている。



2004年を基準とした全球の海洋の貯熱量の変化を深度別に示した。アルゴフロートにより全球海洋の2,000m以浅の貯熱量変化を刻々と把握できるようになっている。さらに1,000~2,000mという深い層においても、表層の2分の1にあたる熱が蓄えられている様子が明らかとなっている。



太陽光を反射する海面、熱の出入りのバランスが崩れた分の約9割が海に蓄えられている。
写真提供：NASA

取材協力

細田滋毅
グループリーダー代理
地球環境観測開発センター
海洋循環研究グループ

塩分は天然の雨量計。塩分を知ることが地球の水循環を知ることにつながる。

海洋での塩分の計測は水温よりも難しかったため、塩分データの数は水温と比べてかなり少なく、精度も不十分なものが多かった。しかしアルゴ計画が開始されたことによって、水温と同じ場所、そして同じ頻度でデータを取得できるようになり、海洋内部の塩分のデータ量が飛躍的に増え、これまでより塩分変化が捉えられるようになった。「世界の塩分の情報が満遍なく継続的に得られることが非常に重要なポイントです」と細田滋毅さんはいう。

海水の平均的な塩分は35g/kg (3.5%に相当)程度だが、場所によって少しずつ異なり、外洋域では30~38g/kgほどの間で変化する。わずかな違いと思われるかもしれないが、その違いは海洋循環にも大きな影響を与えている。水温とともに塩分の違いが海水の重さに関係するからだ。極域では、冷たくて塩分の高い重い水が深いところへ沈み込んでいき、海洋深層の循環をつくり出すもとになっている。また「海水の塩分の変化を見ていくことで、海

洋での降水・蒸発の変化を知ることができます」と細田さん。陸上と違い、海上で降水や水の蒸発の量を直接計測することは現在でも難しい。しかし雨が降れば海面付近の塩分は下がり、海から水が蒸発すれば塩分は上がるので、塩分を計測することで降水や蒸発が推定できるというわけだ。塩分は天然の雨量計ともいえるのである。

世界の海洋表層における塩分の分布には、基本的な傾向がある。雨の多い赤道域や、海面での蒸発の少ない亜寒帯で塩分が低く、また太平洋より大西洋の方が高くなっているのだ。

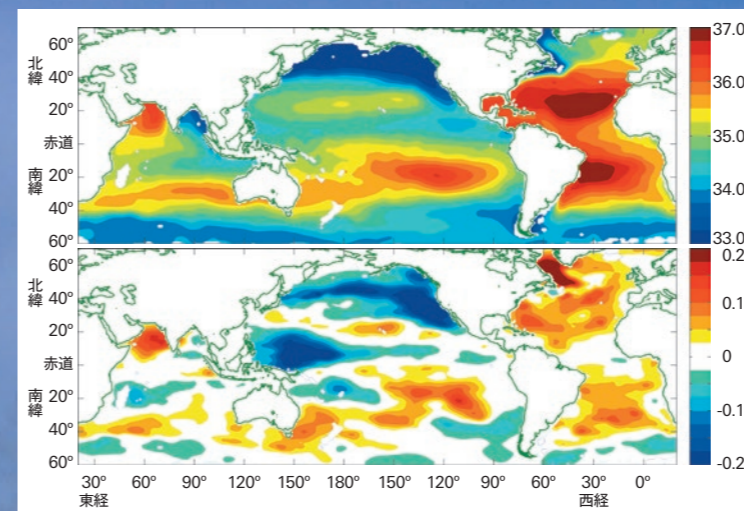
アルゴのデータをもとに、全球的な塩分が30年間でどう変化しているかを細田さんが調べたところ、もともと塩分が高かったところはより高くなり、もともと低かったところはより低くなっている傾向にあることが明らかになった。もともとの塩分のコントラストが、以前よりも大きくなっているのだ。このことは、降水、蒸発が以前より活発になってい

ることを意味している。「降水、蒸発の長期的な変化は、地球の水循環に関わってきます。大気や陸に水を供給する大本は海です。その海から、どれだけ水が出ていくのか、あるいは水が入っていくのかを知ることは、地球規模の水循環を知ることにつながるのです」

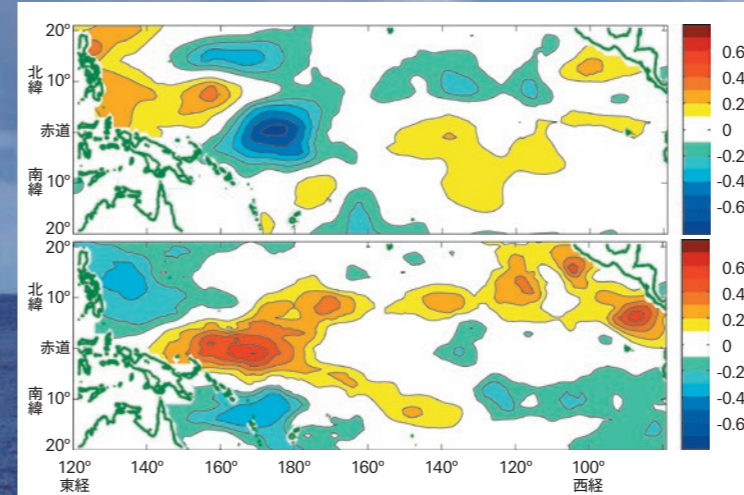
ただし長期的な傾向のなかには、数年~10年程度の比較的短い周期的な変動も入っている可能性があるため注意が必要だと細田さんはいう。「たとえば太平洋の熱帯域では、10年程度の周期で表層の塩分が変化することが分かってきました。西熱帯太平洋では、30年で約0.2g/kgの低塩分化傾向がありましたが、10年程度の周期で0.5~1g/kgの幅で変動していることが分かったのです。このことは、長期にわたる塩分の変化傾向を評価するときに、より短い周期の変動がどの程度含まれているか注意深く検討する必要があることを意味します」最近では人工衛星からも海洋の塩分を計測できる

ようになってきた。しかし衛星で計測できるのは海面だけで、地球規模で海のなかまで満遍なく継続的に計測できるのはアルゴフロートだけだ。「海面付近と海のなかとは塩分変化のメカニズムが違います。海中をきちんと計測しないことには、地球規模の気候や海洋循環の変動を追うことはできません。水深2,000mまでの全世界の海洋を把握することに、アルゴは非常に重要な役割を果たしています」

海中の塩分について、空間的な三次元のマップ、また時間軸まで含めた四次元的なマップを描けるようになったことが、アルゴ計画の大きな成果の一つだと細田さんはいう。そういったマップは、アルゴ以前にはまったく描くことができなかったものだ。最近ではアルゴのデータと、新しいタイプの人工衛星から得られた海面塩分データとを組み合わせることで、精度のよい海盆スケールの塩分変化の解析も各国の研究者によって始められている。



上は、1960~89年に観測船によって得られた塩分データをもとにつくられた、水深100mまでの海洋表層における塩分の年平均気候値(単位はg/kg)。塩分が高いところは蒸発が多い海域、低いところは降水が多い海域とよい一致が見られる。下は、2003~07年に得られたアルゴデータに基づく過去30年間の塩分変化を示している。上の図と見比べ、赤は塩分が高く、青は塩分が低くなったところであるが、この図から、もともと塩分の高い海域でより高く、低い海域でより低くなる傾向が見られ、地球全体の水循環の強化と関連していることが示唆される。



熱帯太平洋域における準10年周期変動に伴って、西熱帯太平洋の表層塩分も大きく変動することが分かってきた。図は2003~05年における海面から水深50mまでの塩分の年平均気候値との差(上)と、2008~10年における海面から水深50mまでの年平均気候値との差(下)の分布図である。この海域では30年で-0.2g/kgの低塩分化傾向だったのに対して、アルゴのデータを使った細田さんらの解析では、準10年周期の塩分変動の幅が0.5~1g/kgと、かなり大きいことが分かった。(Hasegawa et al., 2013に基づき図を作成)

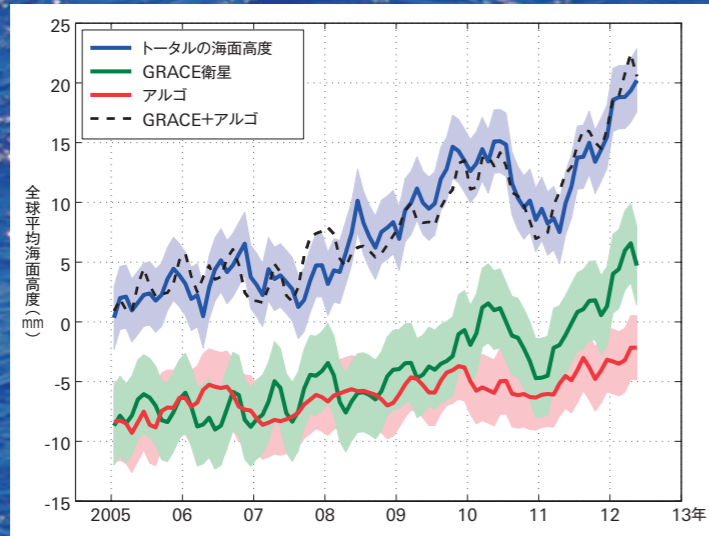
「みらい」から撮影された虹。降雨と蒸発の量によって、海面付近の塩分は変化する。
撮影：柏野祐二/地球情報基盤センター

海面上昇のうち海水の膨張分が判明

取材協力

長船哲史

技術研究員
地球環境観測研究開発センター
海洋循環研究グループ



赤線はアルゴのデータから見積もられた海水の膨張による海面高度の変動分、緑線はGRACEという人工衛星のデータから見積もられた氷床の融解などにより海水が増えたことによる海面高度の変動分を示している。黒い点線はアルゴとGRACEによる値を足したもので、青線は人工衛星観測から得られた海面高度の変動である。

出典：IPCC第5次評価報告書

神奈川県立海洋科学高等学校実習船「湘南丸」から投入されたアルゴフロート
写真提供：神奈川県立海洋科学高等学校

近年、地球温暖化に伴う海面高度の上昇が大きな話題となっている。これは海拔の低い島や、人口の多い沿岸地域への影響などが危惧される重要な問題だ。一方で海面高度は、実は海流とも関係する。大気では気圧の差によって生じる力（気圧傾度力）によって風が吹く。海でも同じように圧力差によって流れが生じる。圧力差の原因の1つが海面の高さだ。高いところには水がたくさんあるので一般的には海面下の圧力が大きくなり、逆に低いところでは圧力が小さくなる。圧力分布は流れの状態を決める、また流れの状態は圧力分布を変える。これらは表裏一体なのだ。

このように海面高度を知ることは、温暖化などに伴う直接的な社会への影響を評価するためだけでなく海洋学にとっても重要なことから、海洋学者はその観測に力を入れてきた。1992年に海面高度を観測するトペックスポセイドン衛星が打ち上げられて以降、広い範囲において数cmという高精度で海面高度の観測ができるようになった。

しかし海面高度がどれだけ上昇したかを知るだけでは、実は十分ではない。「海面高度が海洋環境変動に伴って上昇する理由は大きく2つあります。1つは氷床など陸上の氷が融けて水が増えること、もう1つが海水温の上昇に伴い海水が膨張する効果です」と長船哲史さんは語る。「海面高度の上昇分のなかで、陸上の氷が融けた効果と、海水が膨張した効果とをきちんと分けて理解することが、たとえば将来予測や社会適応などを考える上で重要になってきます」

将来の海面高度の予測は数値モデルで行われる。

しかし「2つの効果についてメカニズムをしっかりと理解しておかなければモデルでの計算が不正確になり、海面高度上昇の予測に大きな不確実性が含まれてしまいます。現在の上昇分の内訳を観測から見積もり、現状をきちんと知ることが、メカニズムの解明や予測精度の向上にとって重要なのです」

海面高度の上昇分の内訳については、アルゴ計画以前から船による海洋観測をベースに見積もりがなされていた。しかし船による観測は時間的・空間的に空白域が多く、推定する際の誤差が非常に大きかった。しかしアルゴ観測網のデータから、海面高度の上昇分のうち海水の膨張分がどれくらいなのかということがかなり正確に分かってきたと長船さんはいふ。

また、最近では海面高度の上昇が加速している可能性が指摘されているという。「加速しているかもしれないということ自体は、正確にはアルゴの観測から分かった成果ではありません。ただし、アルゴのデータによって水の膨張がどれくらい効いているのかを把握することで、今後、膨張分をより気にする必要があるのか、あるいは氷床の融解だけを見ていけばよいのかに分かります。それは、精度の高い将来予測につながります」

数値モデルを用いた予報の精度もアップ

取材協力

増田周平

グループリーダー
地球環境観測研究開発センター
海洋循環研究グループ

海洋の研究では、実際に海の状態を観測するとともに、力学法則をもとに数値計算を行うモデル研究も重要だ。「観測データだけでは、観測点と観測点の間の情報は分かりません。逆に数値モデルだけでは、現実世界をきちんと再現できているのかが分かりません」と増田周平さんはいふ。

そこで、統計学の知識を生かした「データ同化」という手法を応用し、海洋観測データと数値モデル結果とを1つに統合して海洋環境を推定する研究が、さまざまな場面で重宝されるようになってきている。「このデータ統合は、数値シミュレーション側から見ると、観測データを取り込むことでシミュレーション結果を定量的に改善するためのものであり、観測データ側から見れば、観測点と観測点の間の不明な海況を数値シミュレーションで使う方程式を用いて力学的に再現するためのものです」と増田さんはいふ。このようなデータ同化の手法は、日々の天気予報などでも活用されている。

「アルゴは時間的・空間的に偏りのない観測データを取得してくれるので、データ同化手法を用いた海盆スケールの海洋環境推定に向いています。アルゴ計画が進展する一方でコンピュータの性能も上がり、互いの相乗効果で、海洋環境推定のクオリティも上がってきています」と増田さん。実はアルゴのデータがあることで、環境推定がどれだけ改善されるのかについては、用いるモデルや適用するデータ同化の手法に依存するところが大きいという。「いずれにせよ、世界の海洋でこれだけ満遍な

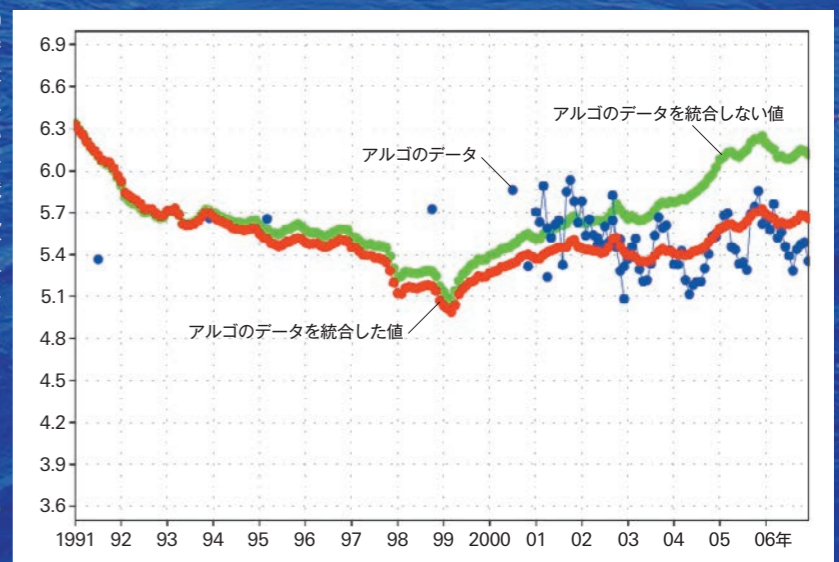
く観測データが得られたことはこれまでありませんでした。その意味では、これまでにないレベルで海洋環境の推定ができてきていることは確かです。逆に、未来のデータ統合を考えていく上で、このような従来なかったタイプのデータをどれだけ効果的に活用できるかは、研究者の想像力にかかっています」

アルゴのデータの有無による海洋環境の予測結果の差を検証したいいくつかの研究では、アルゴのデータを活用する方が観測と予測結果の差が統計的に有意に小さくなることを示している。予測精度の向上にも着実に繋がっているのだ。

海面については従来から、人工衛星などのリモートセンシングにより、水温の推定値は精度よく得られていた。しかし、たとえばエルニーニョが発生するのか、またそれがどのように発達するのかといったことは、水深数十mから数百mの海洋亜表層の状況に大きく左右される。そういう現象の力学解明や予測精度の向上には、継続的な海中の情報が不可欠だ。アルゴのデータが活用された海洋環境推定を進めていくことが、そのための確かな道筋をつくっていることは間違いない。

「アルゴ以前では、定点観測がない海域、定線観測がない期間には海洋環境推定はモデルの精度に大きく依存してしまっていました。その結果、解析や予報に悪影響が出るがありました。現在はアルゴのデータが満遍なく入ることによって、そのような観測データの時間的・空間的な偏りによる影響はずいぶん改善されてきたといえます」

北太平洋北緯47度、西経160度付近における水深255mでの水温の時間変化（1991年から2006年の期間）。緑線はアルゴのデータを統合しないときの、赤線はアルゴのデータも統合したときの海洋環境推定の値を示している。青丸がアルゴのデータ。アルゴのデータを入力した赤線の方が、観測値により近く取れる。



一度投入したらメンテナンスできない。事前の保守と事後のデータ管理は非常に重要だ。

取材協力

佐藤佳奈子

技術主任
地球環境観測開発センター
海洋循環研究グループ

平野瑞恵

技術スタッフ
地球環境観測開発センター
海洋循環研究グループ

船での観測の場合、観測装置などを回収した後で、センサー類を調べてデータの正確性をチェックすることができる。しかしフロートは、投入した後で装置をチェックするのはほぼ不可能だ。そのようなフロートにとって、海に投入する前の保守・整備や、データ取得後の品質管理は非常に重要だ。

「最善を尽くして準備するという意味で、チェックは欠かせません」と語るのは、フロートの保守や整備などに関わる平野瑞恵さんだ。

メーカーから納入されたフロートは、JAMSTECむつ研究所で保管される。むつ研究所ではセンサーや通信機能をはじめとして、さまざまな機能について一通りチェックが行われる。その後、船に搭載され、目的の海域で船から投入されるのだ。

たとえば、センサーとフロートのメーカーが異なる場合など、センサーを取り付ける過程で不具合が発生する可能性もある。また大量生産品ではないため、必ずしも品質が一定しているとは限らない面があるため、チェックは不可欠だと平野さんはいう。

アルゴフロートには、水温、塩分のほかに、圧力を計測するセンサーも搭載されている。アルゴ計画開始当初に定められたセンサーの目標精度は、水温±0.005°C、塩分±0.01g/kg（およそ0.001%に相当）、圧力±2.4dbar（水深2.4m分の圧力に相当）だ。むつ研究所にはセンサーのメーカーと同じ検定装置があり、それを用いてチェックを行っている。「チェックの結果、目標精度の範囲内にな

いものは、再調整をしたり、送り返したりといったことを、メーカーと相談しながら進めています」と平野さん。

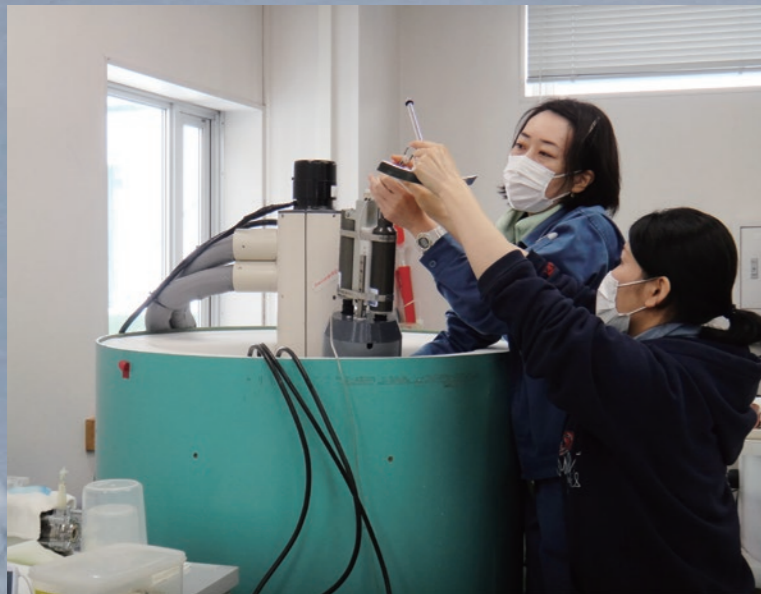
最近のフロートには双方向通信が可能なタイプもあるが、従来からある通信が一方通行のタイプも現役で投入されている。深度やデータ取得の頻度などについて、研究者のリクエストがあれば、事前にフロートに設定する作業なども行う。

投入前の保守・整備とともに重要なのが、取得したデータの品質管理である。海中を長期間漂っているうちに、センサーの基準となる点（ゼロ点）がずれていく可能性が高くなる。データの公開前に、必要に応じてそういったずれなどを補正する必要があるのだ。「データの品質管理は地味ですが非常に重要です。ここが崩れてしまうと、研究者の解析結果も真実性が疑われてしまうことになりかねません」と語るのは、データの品質管理に携わる佐藤佳奈子さんだ。

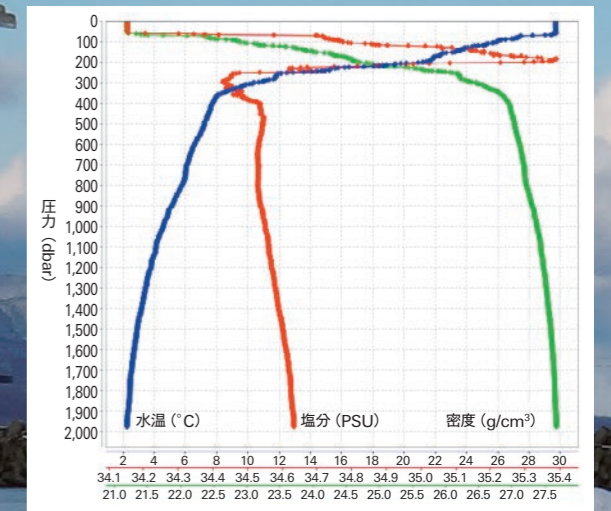
6~7ページで紹介したように、JAMSTECでは遅延品質管理を担当している。遅延品質管理にはデータの取得から半年~1年以上という長期間が必要になる。「品質管理は、アルゴ計画でのデータの取り扱いに関する国際会議で決められた方法ののっけて行います。たとえば塩分センサーの補正については、同じフロートで18サイクル前までのプロファイルを利用して補正することになっています。観測の1サイクルは10日ですから、合計180日かかることになるのです」

データについてはあらかじめ合格ラインを設定しておく。そしてその合格ラインから外れてエラーの可能性のあるものを機械的にピックアップする。そこで出てきたデータをさらに人の目で厳しくチェックしていくのだ。データをチェックする際は、水深2,000m付近の深海のデータを利用する。海面付近は日射や風、降雨など比較的短期間の変化により海洋環境が変わりやすい。一方で深海は環境変化が小さく、10日サイクルであれば場所も大きく移動することがないので、センサーにずれが生じているかどうか比較的分かりやすいからだ。

「そのフロートに近い海域に投入されている別のフロートや、船で計測したデータなどとの整合性があるかどうかといったチェックを行っています」と佐藤さん。エラーが見つかった場合、やはり国際会議で決められた方法で補正を行うことになっている。



水温・塩分の検定装置に、フロートのセンサーを入れているところ。検定装置に入れる際には、フロートからセンサーを取り外す。検定後に再び組み立てるときには細心の注意が必要となる。



アルゴフロートから得られる水温（青）、塩分（赤）、密度（緑）のプロファイルの例。縦軸は圧力で、1dbarは水深ほぼ1mに相当し、海面付近から水深2,000mまでのプロファイルが表示されている。最終的には人の目で見てチェックが行われる。なお、上のグラフでは塩分の単位はPSU（実用塩分の単位で1PSUは1g/kgに相当）となっている。

フロートの通信試験は屋外で行われる。データの送受信などを確認する。

より深くを目指したDeep NINJA、中規模変動の観測を目指したINBOX。

取材協力

小林大洋

主任技術研究員
地球環境観測研究開発センター
海洋循環研究グループ

井上龍一郎

主任研究員
地球環境観測研究開発センター
海洋循環研究グループ

JAMSTECでは、将来に向けた先駆けとなるような、アルゴフロートやその発展型のフロートを使ったパイロット研究も進めてきた。「Deep NINJA」と「INBOX（北西太平洋統合物理-生物地球化学海洋観測実験）」だ。

Deep NINJAは水深4,000mを目指したものだ。アルゴフロートは2,000mまで観測できる。しかしさらに深いところでも海洋環境の変化があり、海洋全体の貯熱量変化などに対しても思っていた以上に影響があることが最近分かってきた。そこでJAMSTECでは、より深いところを観測するためのフロートを、小林大洋さんが中心となり企業と協力して開発してきた。

Deep NINJAは季節海水域での観測も視野に入

れて開発されたもので、浮上するとき海表面に氷があることが予想される場合は、アンテナなどの損傷を防ぐために、それ以上浮上しない仕組みも採用した。また、水深の浅いところで海底に着底してしまったときに一時的に浮上して水深の浅い海域を脱出できるように設計されているなど、従来のアルゴフロートにはない機能も備えている。1年中氷がある海域などを除き、世界の海洋の体積のおよそ9割に及ぶ場所の観測が可能だ。

2012年8月から10月にかけて、北海道南東沖でDeep NINJAによる水深4,000mまでの観測試験が行われた。その成功を受け、12月に4台のDeep NINJAが南極海に投入されて観測を開始した。3台のDeep NINJAが観測を行っていた南極アデリー

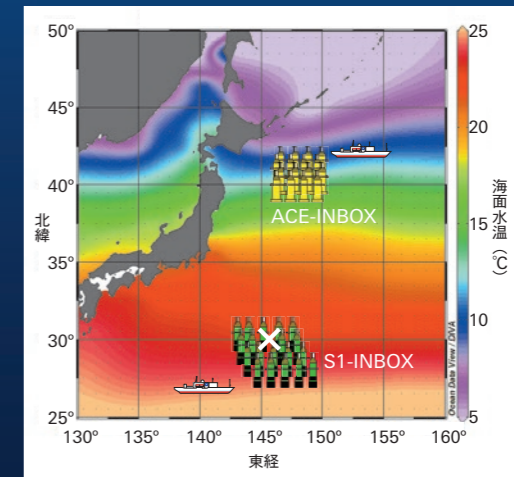
海岸沖では、2013年6月になると海が氷に閉ざされたためかDeep NINJAからの通信が途絶えた。しかし、その間もDeep NINJAは自律的に観測を続けていた。11月になって暖かい時期になると、Deep NINJAは海面まで浮上して通信を再開した。水深4,000mまでの水温・塩分のデータを越冬しつつ観測することに成功し、より深い場所での季節変化の様子を明らかにすることができた。

「その後も7~8台のDeep NINJAを南極付近で投入しました。2015年にはインド洋や太平洋の熱帯域にも投入し、現在もデータを取得中です。それらの海域に投入したのは、各海域での深海の環境変動の把握が目的です。また、JAMSTECで試みられている海洋環境推定（13ページで紹介）にこれらの観測データを反映させることで、ユニークな海洋環境変動研究が可能になります」と小林さん。

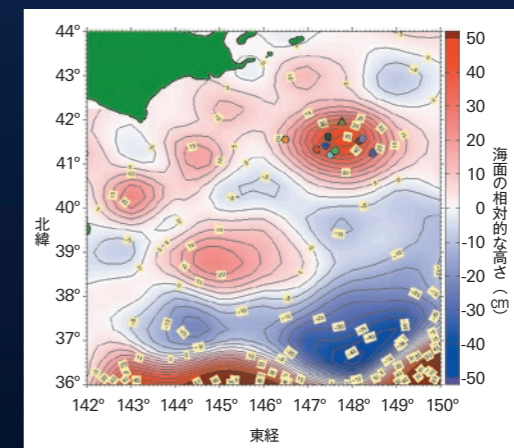
一方、INBOXは日本近海の黒潮続流の南北2カ所で、2011年（S1-INBOX）と2012年（ACE-INBOX）の2度にわたって行われた。通常のアルゴ観測網は、大規模な海洋の変動を捉えることが目的だが、INBOXは数カ月・数百km以下のスケールで起きる中規模変動とそれに伴う現象を観測することを目指したものだ。

S1-INBOXが行われた黒潮続流の南側の海域は、海のなかに太陽の光が届く範囲（有光層）において、夏季に栄養塩が枯渇する場所である。「150km四方ほどの海域に20数台のフロートを投入し、2日に1度のサイクルで観測しました」と語るのは、INBOXに参加する井上龍一郎さんだ。INBOXは通常のアルゴ観測網と比べて、空間的・時間的な解像度が非常に高いことが特徴だ。S1-INBOXに使われたフロートには、水温・塩分センサーに加え溶存酸素センサーが搭載されていた。

海のなかで植物プランクトンが生息するのは有光層だ。S1-INBOXの海域では、冬は海の表面の水が冷やされて、深いところの水温が相対的に高くなるため対流が起きて栄養塩が下から上がってくる。それに対して、夏は表面付近の水が温められ冬のような対流は発生しないため、植物プランクトンに食べ尽くされて有光層の栄養塩が枯渇する。しかしそのような海域でも、中規模渦と呼ばれる中規模スケールの渦状の流れの影響で、下の方から栄養塩が湧き上がってくることもある。栄養塩が来れば、植物プランクトンの活動が活発になり、植物プランクトンの光合成によって酸素濃度が変動する。その変動を

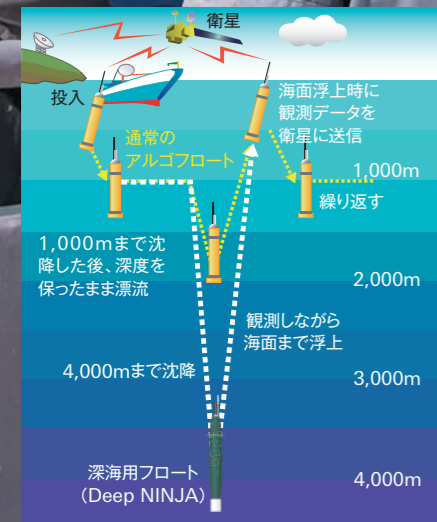


INBOXは黒潮続流の南北2カ所で実験が行われた。中規模スケールの変動を捉えるため、通常のアルゴフロートよりも密にフロートが投入され、観測サイクルも通常より短かった。



ACE-INBOXで投入されたフロートの分布。○や△は、それぞれフロートや海面漂流ブイの位置を示している。背景場は海面の起伏を表し、フロートが投入された暖色のエリアが観測対象の暖水渦を示す。

2012年8月、観測試験のために水産研究・教育機構 東北水産研究所の「若鷹丸」から投入されるDeep NINJA。写真提供：国立研究開発法人 水産研究・教育機構 東北水産研究所



Deep NINJAは水深1,000mに10~30日間停留し、4,000mまで沈降した後、海面に向けて浮上しながら水温、塩分のデータを取得する。

溶存酸素センサーで捉えようというのだ。

渦の周辺で詳細な観測を行うことで、海洋の中規模の現象が植物プランクトンの活動にどう影響を及ぼしているのかを解明するべく、生物学、地球化学、物理学という異なる領域の研究者が共同で解析を進めている。

ACE-INBOXが行われた黒潮続流の北側の海域は、暖流の黒潮と寒流の親潮の水がぶつかり合い、海水の構造が複雑になっている場所だ。ここでは黒潮側から流入した暖かい水を含んだ渦が親潮のなかに形成される。ACE-INBOXとは、その渦のなかにフロートを大量に投入し、渦の変化の様子や、渦のなかで熱がどのように移動するかなどを調べようというものだ。こちらでは15台ほどのフロートが投入され、観測頻度も1日1回だった。

渦の構造を見るため、通常の停留深度より浅い数百mにフロートを停留させ、1年半にわたりフロートの動きを追い掛けた。その結果、「季節ごとに、黒潮や親潮の変化に合わせてほかの渦と相互作用したり、熱がどのように運ばれていたのかが徐々に分かってきました」と井上さんはいう。

アルゴのデータを十分に使いこなしたとき、本当の意味での海洋観測の革命が始まるかもしれない。

取材協力

須賀利雄

招聘 上席研究員
地球環境観測開発センター
東北大学大学院理学研究科 教授

増田周平

グループリーダー
地球環境観測開発センター
海洋循環研究グループ

細田滋毅

グループリーダー代理
地球環境観測開発センター
海洋循環研究グループ

2016年3月、国際アルゴ運営チーム（AST）の会合がJAMSTEC横浜研究所で開催された。ASTの会合は毎年1回行われているが、日本で開催されたのは初めてのことであった。会合では、全球観測網を維持し、そしてさらに発展させるための方策などについて議論された。

気候変動に伴う海洋の大規模で長期的な変化を捉えるには、アルゴによる海洋観測を継続し品質管理されたデータをさらに蓄積していくことが重要だ。アルゴ観測網を維持するためには、今後も常にフロートを投入し続けていく必要がある。電池の寿命でフロートが動作しなくなったり、漂流したりすることで、フロートの空白域ができてしまうからだ。「空白域をうまく補填しながら、現在の状態を維持していく必要があります」と細田さんという。

アルゴ計画は当初、外洋域にフロートを展開していた。最近では地中海や日本海などの縁辺海や太平洋の島々の付近など、当初のアルゴ計画には含まれていなかった海域まで含めて満遍なく全球観測を行っていくという動きもあるという。

アルゴの発展に向けた主な将来展望としては、以下の2つの方向性がある。

1つは、16～17ページで紹介したDeep NINJAのように、水深2,000mより下を目指そうという「ディープアルゴ」だ。より深いところでの海洋環境変動や温暖化などの影響をきちんと評価するには、深海においても現在のアルゴ計画のように時間的・空間的に満遍なく観測を行う必要がある。近年の技術革新によってそれが可能になってきたのだ。Deep NINJAの最大観測深度は4,000mだが、海外では6,000mまで観測可能なフロートも登場している。JAMSTECでも近々、6,000mまで沈降できるフロートを試験的に投入することを検討中だ。

もう1つの方向が、溶存酸素やクロロフィルなど、水温・塩分以外のセンサーを追加していく方向だ。生物地球化学的な変量を計測することで、海洋酸性化の進行度や海洋中の炭素循環の変化、さらには生物多様性の変遷など海洋環境をより深く知ろうというもので、生物地球化学の英語Biogeochemicalを略して「BGCアルゴ」と呼ばれることもある。地球規模での炭素の循環を詳しく知るためには、海洋のなかの状態を知ることが重要だが、現状では海中の炭素に関するデータはほとんどない状態なのだ。

「BGCアルゴについては、2016年1月にキックオ

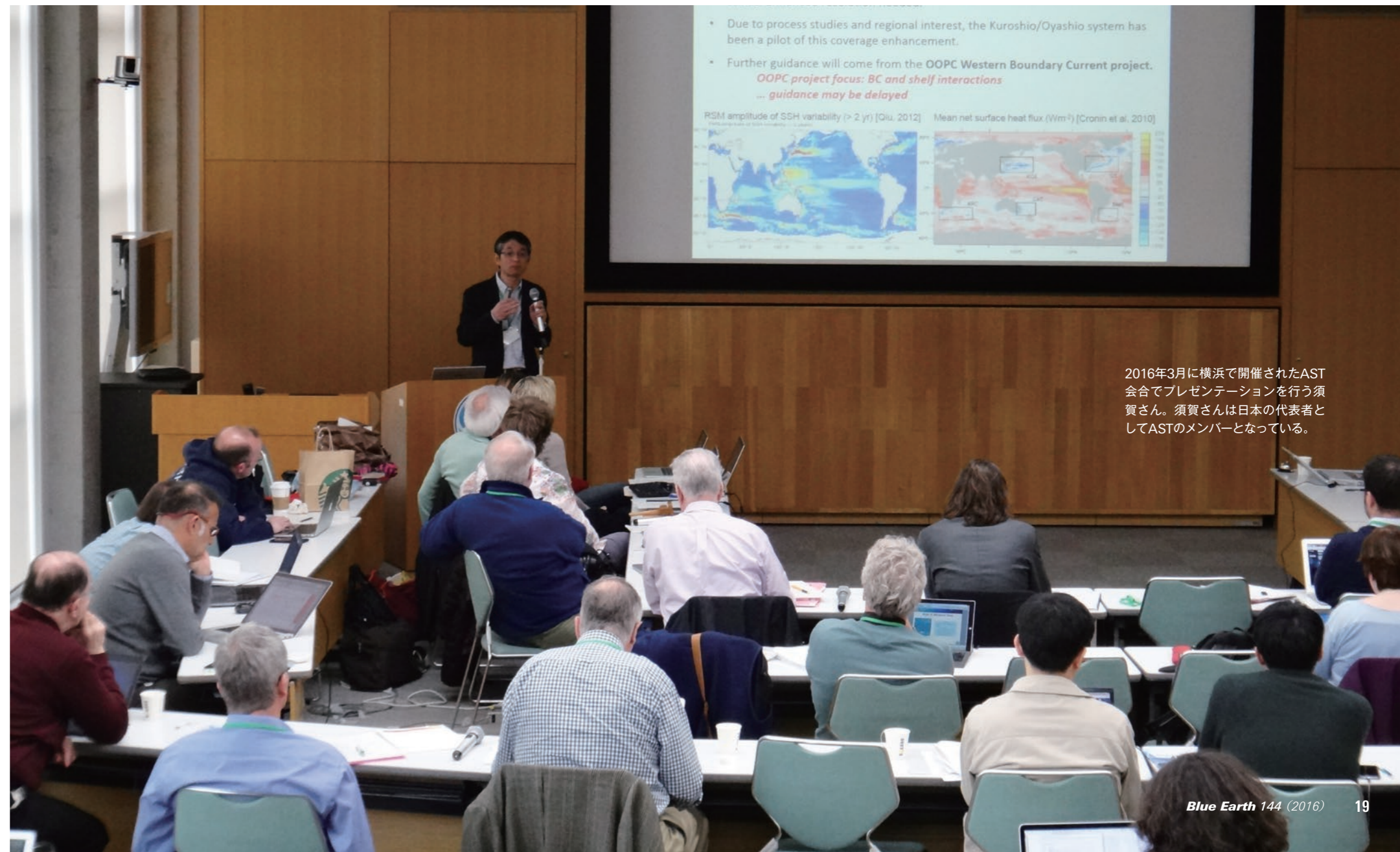
フミーティングが行われました。BGCアルゴ観測網によってどんな研究テーマに取り組むことができ、そのために必要なセンサーは何か、また世界にどれくらいフロートを展開したらよいかといったことを議論しました。JAMSTECでは、すでに溶存酸素センサーを搭載したフロートを集中投入したINBOXのような経験を持っていますが、将来的にはアルゴ観測網のように、BGCアルゴのフロートを全球に1,000台ほど展開し、物理的・生物地球化学的に海洋を監視することを、各国の研究者が協力して検討しているところだ」と細田さん。

将来的にディープアルゴやBGCアルゴが実現すると、さらに大量のデータが生み出されることになる。その受け皿はすでにあると増田さんという。

現在、アルゴに限らず船舶観測データなど入手可能な観測データと数値シミュレーションの結果を、四次元変分法データ同化手法によって1つのデータセットに統合した、四次元変分法海洋環境再現データセット（ESTOC）がJAMSTECで公開されている。これは過去55年分の海のなかの状態を統計学に基づいて客観的に推定したものだ。

「ディープアルゴやBGCアルゴのデータも、原理的にはすぐにESTOCに組み込めるようになっていきます。ディープアルゴやBGCアルゴが実現したとき、多大な労力や費用をかけた分、有効にデータを活用しないと非常にもったいない。ESTOCは有望な受け皿の1つとしてユニークな海洋環境研究に貢献できると信じています」と増田さん。

アルゴ計画がスタートして15年が経過した。須賀さんは、これから海洋研究の世界に入ってこようという若い人たちに期待している。「私のようにアルゴ以前から海洋観測に関わってきた研究者は、時間まで入れると四次元の時空に満遍なく広がるアルゴのデータを十分に使いこなす発想をしていない可能性が高い。たとえば生まれたときからインターネットがあった人とそうでない人とでは発想が違うところがあります。同じように海洋研究の世界に入ったとき、すでにアルゴのデータがあることが当たり前だった研究者は、私たちとはまったく違う発想をするのではないかと期待しています。そういう人たちがアルゴのデータを本格的に使い始めるとき、海洋研究の革命が起きるかもしれません」**BE**



2016年3月に横浜で開催されたAST会合でプレゼンテーションを行う須賀さん。須賀さんは日本の代表者としてASTのメンバーとなっている。

アルゴ計画を支えるフロートの投入協力

取材協力 平野瑞恵
地球環境観測研究開発センター
海洋循環研究グループ 技術スタッフ



アルゴ計画の目的は、全世界の海洋の水温や塩分などの状況をリアルタイムで監視・把握することである。そのために現在、世界で3,800台余りのアルゴフロートが稼働している。この台数によって当初の計画通り300km四方、緯度・経度にして3度四方におよそ1台という観測網が構築できているが、フロートの密度は流動的だ。

フロートの寿命は3~7年。寿命を待たずに故障するものもある。観測網を維持するには、毎年1,000台くらいずつ新しいフロートを投入していかなければならないのだ。日本では年に数十台を投入している。海洋研究開発機構（JAMSTEC）が所有する船舶だけではなくすべてを投入できないため、関係省庁の調査船や大学・水産高校の実習船、民間企業の船舶にもご協力いただいている。アルゴ計画を支えるフロートの投入協力について紹介しよう。

（独）海技教育機構（JMETS）の「海王丸」から投入されるアルゴフロート。この航海では3台が投入され、それぞれ海君、王君、丸君と名付けられ、本体に名入れもされた。写真は丸君。
（写真提供：海技教育機構 [JMETS]）



神奈川県立海洋科学高等学校の「湘南丸」での投入準備。マニュアルに沿って破損がないかなどを確認していただく。（写真提供：神奈川県立海洋科学高等学校）



「湘南丸」から投入する前に、本体に寄せ書きをする神奈川県立海洋科学高等学校の学生たち。（写真提供：神奈川県立海洋科学高等学校）



青森県立八戸水産高等学校の「青森丸」にて。フロートは全長1.6~2m、重さ約20~50kg。移動は2人以上で行う。（写真提供：青森県立八戸水産高等学校）



日本郵船の船舶から梱包したまま投入されるアルゴフロート。段ボールが緩衝材になるので、航行中や甲板の高い船舶からでも投入できる。多くの船舶にご協力いただけるように開発した投入方法である。（写真提供：日本郵船）

「全国の水産高校の会合があると聞き、これはチャンスだと、アルゴフロートのパンフレットを抱えて出掛けていったこともあります。私はアルゴフロートの営業担当ですね。」そう言って笑う平野瑞恵さんは、投入に関する業務に携わって10年ほどになる。

アルゴフロートは世界の海洋に満遍なく展開する必要があるため、投入すべき海域がJAMSTECの船舶の航路から離れていることもある。アルゴフロートの投入のためだけに船舶を運航するのは、過密な運航スケジュールや限られた予算のなかでは難しい。そこで、投入が必要な海域の近くを航行する船舶にご協力いただいているのだ。「外部による投入協力がなければ、アルゴフロートの観測網は維持できません。日本以外の国でも同様です。特に日本では無償のボランティアをお願いしているため、人と人とのつながりや地道な営業活動が不可欠です」

投入協力をお願いするとき、平野さんは心掛けていることがある。「アルゴフロートの仕組みや目的を、専門用語を使わずに分かりやすい言葉で説明するようにしています。そして、観測データは、気候変動や地球温暖化の研究、漁業や海運にとって重要な海流の予測などに使われ、社会の役に立っていることを必ず話します」

水産高校の会合でアルゴフロートの投入協力について説明すると、青森県立八戸水産高等学校の校長先生が興味を示してくれた。アルゴフロートはJAMSTECのむつ研究所で整備している、という、むつ市の高校に勤務していたことがある、と話も弾んだ。そして、八戸水産高校の実習船「青森丸」によるハワイへの実習航海の際、アルゴフロートを投入していただけることに。「ほかにもいくつもの水産高校や大学の実習船にご協力いただいています。教育機関に協力をお願いする背景には、学生たちに将来、アルゴの観測データを漁場や航路の決定に活用したり、研究に使ったり、ユーザーとしてもアルゴ計画を支えてほしいという期待もあります」。依頼があれば、研究者が出前授業を行うこともある。

2010年からは日本郵船(株)にもご協力いただいている。民間企業としては初めてだ。海流の影響でフロートが分散してしまい観測密度が低くなりやすいが、協力機関の船舶があまり航行しない海域がある。そうした海域への投入をお願いしている。なぜ民間企業が協力してくれるのだろうか。「社会貢献の1つとして捉えてくださっているようです。とてもありがたいこと」と平野さん。

投入していただく船舶が決まると、アルゴフロートと投入海域を記載した書類、マニュアル、野帳を届ける。整備は終わっているので、船上ではマニュアルに沿って簡単なチェックを行い、投入していただく。投入後、フロートの製造番号と投入日時、緯度・経度、気象情報を野帳に記入し、メールやFAXで報告していただいて作業は終了となる。

「どの船舶も厳しい条件のなか、投入に最善を尽くしてくれます。『ちゃんと動いている?』と、投入したフロートの様子を気に掛け、問い合わせしてくれることも。実はデータが取れていないんです、とはいいたくありません」と平野さん。「私は整備にも携わっているので、確実にデータを取れるように整備に万全を期すことで、皆様のご協力に応えていきたいと思います」

BE

展示されているバンダイハコネサンショウウオ。ハコネサンショウウオの分類が整理され、2014年11月に新種認定された。

水のきれいな清流、水温の低い場所にバンダイハコネサンショウウオは生息している。研究者の方に相談して生息地を伺い、2015年5月下旬に展示用のバンダイハコネサンショウウオの採集に出掛けた。

水のせせらぎと鳥の声を聞きながら、静かに石をひっくり返す。運がよければ2~3匹のバンダイハコネサンショウウオがたたずんでいる。一方の手でもう一方の手のひらにゆっくりと追い込んでいく。3~7cmほどのバンダイハコネサンショウウオが手のひらに収まったら、川の水ごとすくい上げて、そっと容器へ移す。結局、手がよいのだ。網だとすくい上げたときに身体を傷つけてしまうこともある。手の感覚を使って水と一緒に運ぶことで、貴重なサンショウウオを無傷のまま採集できる。

福島には、6種類のサンショウウオが生息している。アクア

マリナーいなわしろカワセミ水族館では、バンダイハコネサンショウウオを含む5種類のサンショウウオをそれぞれ20cm角の水槽に入れて展示を行っている。多種類のサンショウウオを同時に見てもらうことで、福島の豊かな自然と生物多様性について考えてもらうためだ。

バンダイハコネサンショウウオの飼育を開始した2015年当初、とにかく餌を食べさせるのが大変だった。1年目の幼生は全長3cmほど、2年目の幼生でも全長6~7cmほどだ。小さな口に合うように熱帯魚の餌などに使われる冷凍赤虫の解凍したものを少量、ピンセットで目の前に持っていき、赤虫が生きているかのように、目の前でゆらゆらと動かしてみせる。これで食べてくれれば万々歳だが、あまり食いがよくない。次に香りの強いカワエビを小さくして、やはり揺らしながら与えてみる。それでも食べない個体がいる。次は清流にいるカワゲ

らだ。いろいろ試みている間に機嫌を損ねると、しばらくはもう何も口にしてくれない。朝の餌やりがうまくいかなければ夕方まで待って、一からやり直し。

そんなふうにして何とか食べさせていくバンダイハコネサンショウウオの飼育には、乗り越えなければならない大きな壁がある。どうしても成体にまで育たないのだ。サンショウウオの幼生は、^{がいさい}外鰓と呼ばれるえらが頭部の後ろ側から飛び出している。2年目の初夏にはそれが少しずつ小さくなり、自然界では7~8月くらいにかけて水から陸へと生活空間を変え、幼生と成体の中間体である幼体になると考えられている。ところが飼育下では、どうしても幼体にならない。普通、サンショウウオは幼体になり上陸できるようになる



清流にいたバンダイハコネサンショウウオ。福島県には、このバンダイハコネサンショウウオのほかにも、ハコネサンショウウオ、タダミハコネサンショウウオ、クロサンショウウオ、トウホクサンショウウオ、トウキョウサンショウウオが生息している。



犬顔や人顔として話題になったバンダイハコネサンショウウオ。まだら模様がちょうど顔の中心に来ているため、そのように見える。頭の周りに広がっているのが外鰓。

と、それまで食べていたカワゲラなどの水生の餌を、アリやバッタ、ミミズなど陸上の餌に変える。しかし、まさに上陸寸前という時期の、いわば中間の餌がうまく見つからないのである。

水族館で何とかバンダイハコネサンショウウオを上陸させたい。そしてゆくゆくは、水族館内で繁殖させ、成体まで育て上げる。そのために、バンダイハコネサンショウウオの目の前で、ピンセットで挟んだ餌を今日も朝からゆらゆらと揺らしている。

BE

取材協力：平澤 桂 / アクアマリンいなわしろカワセミ水族館 飼育員

◆ **Information:** アクアマリンいなわしろカワセミ水族館
〒969-328 福島県耶麻郡猪苗代町大字長田字東中丸3447番地4
TEL 0242-72-1135
URL <http://www.marine.fks.ed.jp/kawasemi/kawasemi.html>

私が
IODPで
解きたい謎

阿部なつ江

海洋掘削科学研究開発センター
マントル・島弧掘削研究グループ
主任技術研究員

あべ・なつえ。1967年、神奈川県生まれ。博士（理学）。1997年、金沢大学大学院自然科学研究科地球環境科学専攻修了。オーストラリア・マククォリー大学ポスドク研究員などを経て、2003年、JAMSTEC（海洋科学技術センター、現・海洋研究開発機構）深海研究部研究員。2014年より現職。専門はマントル岩石学、海洋底科学。

IODP第335次研究航海に参加した阿部なつ江さん（右）。2011年4～6月、中米コスタリカ沖東太平洋において、「ジョイデス・レゾリューション」により、超高速で拡大する海嶺で形成された海洋プレート下部海洋地殻の掘削が行われた。
©William Crawford, IODP/TAMU

天文・南極・隕石・マントル

——高校生のころは、大学で何を学びたいと思っていましたか。

阿部：天文学に興味があり、星の研究をしたいと漠然と思っていました。でも星は手で触れることができません。地球も星（惑星）の1つです。自分の手で触れることができる惑星である地球の研究をしたいと、地学を志望しました。地学に岩石学という分野があることを知ったのは金沢大学に入った後です。

岩石は、できるときの温度や圧力によって、かたさや重さが異なるものになります。岩石の性質の違いにより、さま

生のマントルから 惑星地球の過去と未来を 知りたい

国際深海科学掘削計画（IODP）では、日本の地球深部探査船「ちきゅう」のほか、アメリカの深海掘削船「ジョイデス・レゾリューション（JR）」、欧州が提供する「特定任務掘削船」により、多様な研究テーマについて、さまざまな分野の研究者がそれぞれの視点から地球の謎を解き明かそうとしている。

阿部なつ江さんは、最近では2015年12月～2016年1月のJRによるIODP第360次研究航海に参加し、南西インド洋海嶺アトランティス海台を調査した。

阿部さんがIODPで解きたい謎とは？



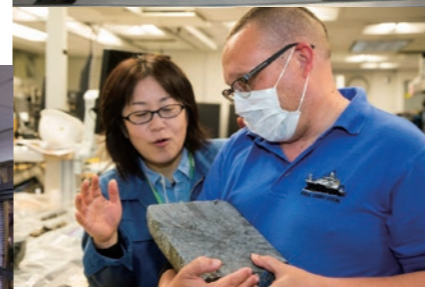
ざまな地形ができます。多様な地形を生み出す岩石のことを学びたいと思いました。

——マントルの岩石を研究するようになったきっかけは？

阿部：いろいろな場所に行き、さまざまな岩石を調べたいと思っていたところ、大学に南極観測に関わっている先生がいることを知りました。ぜひ南極に行ってみようと思いました。日本の南極地域観測隊は隕石の調査でも有名です。隕石について学ばば観測隊に参加できるかもしれないと考え、岩石学が専門の荒井章司教授に相談しました。隕石

の試料は貴重で荒井教授も扱ったことはありませんでした。そこで、隕石に似た地球の石をまず観察してみなさい、と渡されたのが、マントルを構成する主要な岩石である「かんらん岩」です。それがとても美しいのです。かんらん岩の主成分はかんらん石で、ペリドットと呼ばれる宝石にもなっています。

その後、荒井教授は国立極地研究所から隕石の試料を借りてくださり、私はその観察を行いました。その隕石は本当にかんらん岩とそっくりでした。そのような隕石に似た組成の微惑星が集積して原始地球が形成され、高温のマグ



阿部さんが参加したIODP第360次研究航海。2015年12月～2016年1月、「ジョイデス・レゾリューション」により、南西インド洋海嶺アトランティス海台の掘削が行われた。17カ国から研究者や広報スタッフが参加。
©Bill Crawford, IODP/JRSO

マの海のなかで、重い鉄とニッケルが分離して地球中心部に沈み込み核（コア）を、またケイ酸塩がコアの周りのマントルをつくったと考えられています。

大学院に進むとき、マントルの研究を進めるか隕石の研究にするか迷いましたが、せっかくマントル岩石学の第一人者である荒井教授がいらっしやるのだから、マントルを学ぶことにしました。——マントルまで掘削して岩石が採取された例はまだありません。どのようにしてマントルの岩石を調べるのですか。

阿部：地表でもマントル由来の岩石を手にすることができます。その1つが、マグマが周りのマントルの岩石を取り込み、地表に上昇してきたマントル捕獲岩です。私は修士課程では秋田県の一ノ目潟の周辺、博士課程では岡山県や島根県など西南日本でマントル捕獲岩を採取して、そこに含まれるかんらん岩の性質の違いなどを比較しました。

初めての海洋掘削航海

——海洋掘削航海に参加するようになったのはいつからですか。

阿部：1997年3月に博士号を取得した翌月、4月から6月まで「ジョイデス・レゾリューション（JR）」に乗船したのが、初めての海洋掘削航海です。ポルトガルを出港して大西洋中央海嶺を目指しました。JRには各国から集まった約30人の研究者が乗船していて、日本からは私を含めて2人だけ。最初はとても不安でした。でも、岩石の性質を記載するという仕事の内容が分かると、楽しめるようになりました。岩石の記載は大学時代に鍛えられた私の得意分野でした。ほかの研究者からも頼りにされました。そのときの掘削試料は、かんらん岩が水と反応して変質した蛇紋岩がほとんどでした。大学で研究していたマントル捕獲岩とは性質の異なる岩石です。私は試料のなかから、なるべく変質していない鉱物を探し出して性質を調べました。下船するころには、名残惜しい気持ちになっていましたね。

その後、東京工業大学やオーストラリアの大学でマントルの研究を続けましたが、海洋底の調査に参加する機会はありませんでした。

海洋掘削科学の先駆者JR

——なぜJAMSTECに？

阿部：「ちきゅう」を建造してマントル掘削を目指すことを知り、ぜひ参加したいとJAMSTECに応募しました。JRの乗船経験やマントルの研究を続けてきたことをアピールしました。

2003年にJAMSTECに入って以降、いままでに5回、JRによる掘削航海に参加しました。行くとたびに、これは何だ!? という初めて見る岩石に出会うことができます。毎日、採りたての岩石を前に、それがどうやってできたのか、みんなで推理します。初めから推理が一致することは少なく対立ばかり（笑）。JRにはさまざまな専門分野の研究者が乗船しています。同じ分野の研究者とは推理が食い違い、違う分野の人と一致することがあります。その議論がとても楽しいですね。

2ヵ月間、研究者も乗組員も生活を共にするので、一体感が生まれます。そこで培った国際的な人脈が、研究においてとても役立っています。

JRには米国に留学しているアジアや東欧、南米の研究者も参加しています。JRは海洋掘削科学の国際的な普及に大きく貢献してきました。日本でもJAMSTECの平朝彦理事長たちの世代が、JRでの経験をもとに、国内に海洋掘削科学を広めていきました。

海とプレートテクトニクスの惑星

——陸上で手に入るマントル捕獲岩などがあるのに、わざわざマントルまで掘削する必要があるのでしょうか。

阿部：よく聞かれる質問です。私は陸上で手に入るマントルの岩石を魚の干物や細切れの刺し身に例えます。水分もなくなり変質した干物や断片の刺し身から生きた魚のを知るのは難しいですよ。陸上に上がってくる過程でマントルの岩石は変質し、水分などの揮発性成分が抜けてしまいます。やはり「生」のマントルを調べる必要があります。

そもそも地球の体積の80%以上はマントルです。生のマントルを調べることで、私は惑星地球の過去と未来を知りたいのです。

——地球という惑星にはどのような特徴がありますか。

阿部：地球の表層は、十数枚のかたい岩板であるプレートで覆われています。マントルの一部が溶けて海洋地殻をつくります。その海洋地殻とマントルの最上部が海洋プレートです。海洋プレートは中央海嶺で生まれ、移動し、やがて海溝で地球内部に沈み込みます。そこで大陸地殻ができると考えられています。

このようなプレートテクトニクスが現在起きていることが確認されている惑星は、太陽系で唯一、地球だけです。地球表層の水や炭素が海洋プレートと共に沈み込みます。その一部は火山活動によって再び表層へ戻ります。このようなプレートテクトニクスに伴う表層と内部の物質のやりとりによって、大気中の二酸化炭素濃度などが安定し、生物がすめる環境が保たれ続けてきたと考えられています。

なぜ、地球にだけプレートテクトニクスが見られるのかよく分かっていませんが、地球に海、つまり大量の液体の水があることが重要な鍵を握っているのは間違いありません。

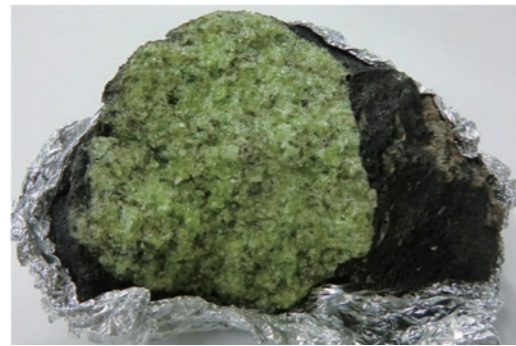
——阿部さんは、「ちきゅう」ではなく、JRへの乗船が多いのはなぜですか。

阿部：現在まで「ちきゅう」によって掘削された地層のほぼすべてが、基盤となる岩石層の上の堆積層です。私が興味を持つ海洋地殻の掘削は、JRや欧州が提供する特定任務掘削船によって行われてきました。そもそも、現在までに科学掘削された試料のほとんどは堆積層で、海洋地殻は約3%にすぎません。

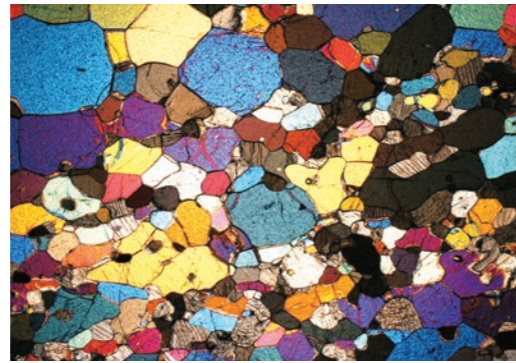
——JRによるどのような掘削航海に乗船してきたのですか。

阿部：主に、海底下の比較的浅い場所にマントルがあると考えられる場所の掘削航海に参加してきました。大西洋やインド洋の中央海嶺は海洋プレートが作られて海底が拡大する速度が遅い場所です。そこでは、拡大する海底を埋めるように海洋地殻の下部やマントルのかんらん岩などが上昇してドーム状の高まり「海洋コアコンプレックス」が形成されていることが、1990年代に発見されました。現在では、大西洋やインド洋の中央海嶺で数多くの海洋コアコンプレックスが確認されています。

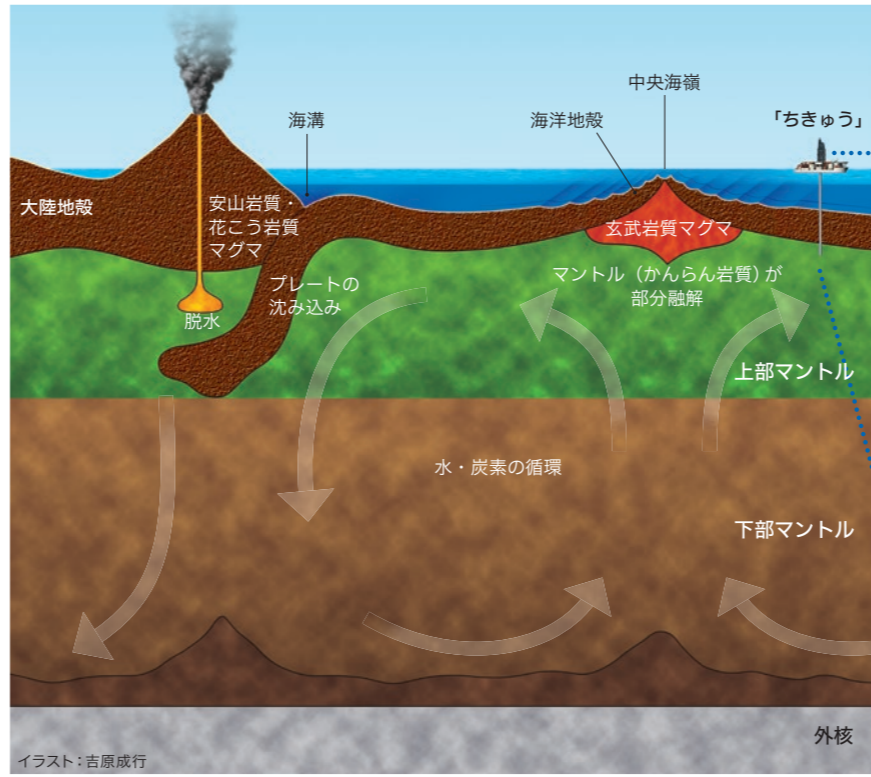
2015年末に私が参加したJRによるIODP第360次研究航海の掘削地、南西インド



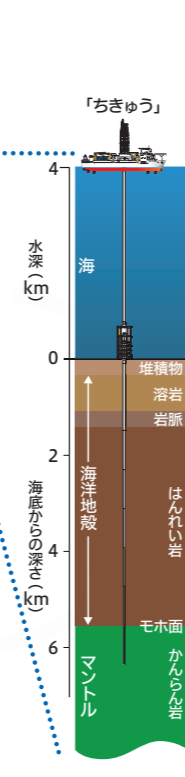
マントル捕獲岩。周り（黒色）がマグマ由来の玄武岩、緑色がマントル由来のかんらん岩。



かんらん岩の偏光顕微鏡写真



イラスト：吉原成行



プレートテクトニクスと「ちきゅう」によるマントル掘削

太陽系の惑星でプレートテクトニクスが起きていることが確認されているのは地球だけである。「ちきゅう」によるマントル掘削では、「生」のマントルを手に入れるだけでなく、初めて海洋地殻を貫通して連続的な試料を採取して調べることに大きな意義がある。

洋海嶺アトランティス海台も、海洋コアコンプレックスがある場所です。

大西洋のアトランティス岩体と呼ばれる場所でも海洋コアコンプレックスが形成されていて、地震波の観測に基づく構造解析で、海底下800mというとても浅い場所に変質していないかんらん岩があると期待されました。そこをJRで掘削する2005年のIODP第305次研究航海に私も参加しましたが、きれいなかんらん岩を手に入れることはできませんでした。

構造解析の技術も進歩していますが、解析のもとになる地下の岩石の情報が圧倒的に足りません。掘ってみないと、どんな岩石があるのか分からないことがまだ多いですね。掘削によって実際に海底下の岩石を採取して、地震波などの観測データと突き合わせることで、プレートテクトニクスを成り立たせる海洋プレートがどのような仕組みでつくられるのかを理解することができます。

——「ちきゅう」による海洋地殻の掘削も計画しているそうですね。

阿部：太平洋プレートが沈み込む日本海溝の海側を「ちきゅう」で掘削する計画です。そこは約1億3000万年前に生まれた太平洋プレートが沈み込んでいる場所です。沈み込む前に海洋プレ

トは大きく変形して、アウターライズと呼ばれる地震が起きて深さ30~40kmの断層ができます。その断層にどれだけの量の水がどの深度まで入り込み地球内部へと沈み込んでいくのかを掘削して調べたいと思います。

また、沈み込むときに海洋プレートのかたさが変わる可能性があります。物性を調べることで海洋プレートはなぜ地球内部へ沈み込むことができるのかを解明していくつもりです。

生のマントルから分かること

——マントル掘削により、生のマントルが手に入れば、具体的にどのようなことが分かって期待していますか。

阿部：マントルにどれだけの水が含まれているかが大きな注目点です。海水は海洋プレートの沈み込みとともに地球内部へ吸い込まれています。もし現在のマントルに含まれている水の量が少なければ、まだ水を吸い込む余地が十分にあり、何億年後には海はマントルに吸い尽くされるといったシナリオが考えられるかもしれません。

また、含まれる水の量によってマントルのかたさは異なり、マントルの対流速度やプレートの厚さも変わります。JAMSTEC地球深部ダイナミクス研究

分野 主任研究員の吉田晶樹さんたちは、マントル対流などによってプレートが運動して大陸が離合集散の様子を過去から未来にわたってシミュレーションしています。そのようなシミュレーションでは、マントルのかたさや対流速度は推定値を入れて計算します。マントルの実際のかたさを計測することができれば、より確かな数値を用いて地球の過去や未来を描き出すことができます。——掘削孔はどうするのですか。

阿部：掘削孔は貴重なマントル観測点になります。そもそもマントルの正確な温度すら分かっていません。掘削孔に温度計を入れて1年間くらい計測したい

と思います。マントル最上部の温度勾配が分かれば、深さ2,900kmまで続くマントル層の温度をより正確に推定することができます。

将来は、掘削孔に地震計を設置したいですね。地震波トモグラフィという技術で、マントル内部に沈み込んだ海洋プレートがマントルの底まで落ちる下降流や、マントルの底から湧き上がる上昇流があるらしいことが分かってきました。マントル掘削孔で地震波の観測ができれば、従来よりも格段に高い解像度でマントル内部を描き出すことができます。

阿部さんが参加した国際深海掘削計画（ODP）第209次研究航海。2003年5~7月、「ジョイデス・レゾリューション」により大西洋中央海嶺の掘削が行われた。



生命の起源とマントル

——生命が誕生したことも惑星地球の大きな特徴ですね。

阿部：私は生命の起源とマントルの関係についても研究を進めています。原始地球の海底の熱水噴出孔のような場所に生命の材料となる高分子有機化合物が供給され、化学進化が進んで、最初の生命が誕生したと考えられています。では、その有機化合物はどこでつくられたのでしょうか。一説には、電気ショックや高圧条件など、通常の地表とは異なる条件が必要だといわれています。

実は、陸上で採取されたマントル由来のかんらん岩のなかに、炭素33個までの高分子有機化合物が発見されており、「マントル有機物」と呼ばれています。それとほぼ同じ種類の高分子有機化合物が隕石からも発見されています。マントル有機物の起源は、①生物の死骸が海洋プレートの沈み込みとともにマントルに供給された、②隕石のなかの高分子有機化合物がマントルで保持されていた、③マントルの高温・高圧の環境でメタンなどから化学合成された、という主に3つの可能性が考えられます。

生のマントルを調べることで、どの説の可能性が高いのかを判断する重要な手掛かりが得られます。最初の生命の材料の一部は隕石中の高分子有機化合物だという説がありますが、マントルで化学合成されたものも含まれていたかもしれません。

生マントルの岩石学を始めたい！

——現在、探査機「はやぶさ2」が小惑星リュウグウに向かっています。弾丸をリュウグウに撃ち込んで孔を掘り、風化していない“生”の岩石試料を2020年に地球に持ち帰ってくる計画です。

阿部：もちろん、とても興味があります！私のなかでは隕石も小惑星の岩石も、地球のマントルも区別していません。いずれも惑星を理解する手掛かりだと思っています。私もぜひ生のリュウグウ岩石を分析してみたいです。それと生マントルを比較することで、惑星の理解を深めることができるはずですよ。

私たちは、10年以内にマントル掘削を開始したいと考えています。早く生のマントルの岩石学を始めたいですね。 **BE**

太古の深海熱水環境から探る 生命と地球の物語

地球情報館公開セミナー 第189回
(2015年4月18日開催)

西澤 学 海洋地球生命史研究分野 研究員

生命がどのように誕生し、どのように進化してきたのか——それを明らかにすることが、私の研究における究極のゴールです。生命の起源は、まだ謎に包まれています。研究者がそれぞれ仮説を立て、その確からしさを検証しているという段階です。ここでは、私たちの調査や研究から明らかになってきたことを、仮説も交えて紹介します。

インド洋の深海熱水環境へ

まず、深海熱水環境とはどういうものかを紹介しましょう。



図1：インド洋の熱水活動域ソリティアフィールド
チムニーから熱水が噴き出し、周りにはうろこを持つ巻き貝スケリーフットなど化学合成生物の群集が見える。

私は2013年、有人潜水調査船「しんかい6500」世界一周航海「QUELLE 2013」の一環であるインド洋調査に首席研究者として参加しました。私はこのとき初めて「しんかい6500」に搭乗し、水深2,600mの深海を調査しました。深海は真っ暗で、「しんかい6500」のライトが届いて様子が見える範囲は10mほどです。そういうなか熱水活動域を探して進んでいきます。深海では生物を見掛けることはまれですが、突然、生物の群集が出現することがあります。それを見ると、近くで熱水が噴き出しているぞ、と

期待が高まります。

水は1気圧では100℃で沸騰しますが、深海では大きな水圧がかかっているため熱水は300℃を超えることもあります。一方で深海の海水は2~4℃なので、噴き出した熱水が混ざるとかげろうのように揺らいで見えます。熱水が噴き出しているところには、チムニーと呼ばれる構造物ができます。チムニーは、熱水に溶けている金属成分が海水で冷やされて沈殿し、煙突状に堆積したものです。熱水活動が長期間続いているところでは10mを超えることもあります。チムニーの周りには、いろいろな生物がたくさんいます(図1)。

熱水は極上のだし

現在発見されている深海熱水環境は、中央海嶺に沿って分布しています。中央海嶺は地球の表面を覆う岩板であるプレートが生まれる場所で、高温のマグマが海底近くまで上昇してきています。海底に染み込んだ海水がマグマで熱せられ、密度が小さくなって上昇し、海底から熱水として噴き出すのです(図2)。

なぜ熱水環境には生物がたくさんいるのでしょうか。熱水環境に生息する大型生物を支えているのは微生物です。微生物を直接食べたり、自分の体内にすまわせた微生物がつくる有機物を食べたりして生きています。微生物は、熱水や周囲の海水に含まれる化学物質を食べ、それらが化学反応するとき生じるエネルギーを使って、生体物質をつくり代謝を行ったりしています。

微生物の餌となる熱水中の化学物質は、熱水が海洋地殻の岩石と化学反応することで岩石の成分が海水に溶け込

深海の海底から熱水が噴き出している場所は現在、世界中で500ヵ所以上見つかっています。

全生物の遺伝子系統樹で根元付近に位置する微生物が深海熱水環境に多数生息していることや、30億年以上前の微生物化石の詳細な解析などから、熱水環境は生命誕生の場の最有力候補といわれています。

では、生命が誕生したと考えられている40億年前の熱水環境はどのようなもので、そこではどのような生命活動があったのでしょうか。

最新の研究から明らかになってきたことを紹介します。また、土星の衛星エンセラダスの海底でも熱水活動が起きていることが、最近分かってきました。そこに生命はいるのでしょうか。

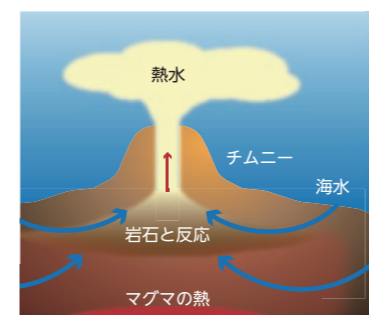


図2：熱水が形成される仕組み
海底に染み込んだ海水がマグマによって熱せられ、軽くなって上昇し、海底から熱水として噴き出す。熱水には、マグマの揮発成分や岩石の成分など、さまざまな化学物質が豊富に含まれている。

んだものです。熱水は、微生物にとって“極上のだし”なのです。私たちは“熱水の味”といいますが、熱水の化学組成は、海水の成分や温度、岩石の種類、海水を温めるマグマに含まれている揮発成分によって決まります。熱水の味は場所によって異なり、そこに生息する微生物の種類や量も変わります。

生命の故郷といわれる理由

私たちがインド洋などで熱水環境の調査を精力的に行うのは、深海熱水環境が私たちにつながる生命の故郷であるといわれるからです。その根拠として2つの記録が挙げられています。

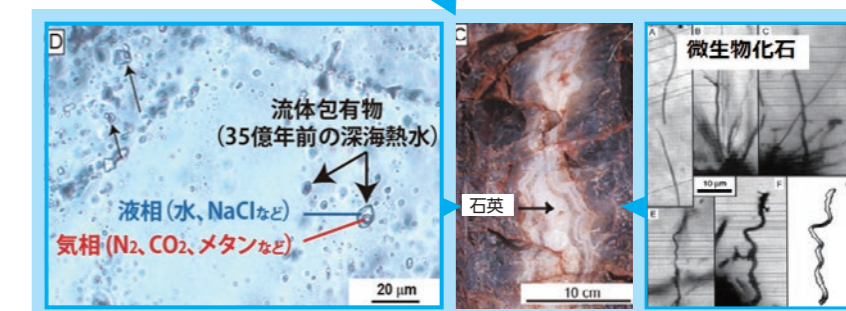
1つは、生物の遺伝子に刻み込まれた記録です。遺伝子の解析から生物の類縁関係や進化の道筋が明らかにされ、系統樹がつけられています。系統樹の根元に近いほど古い時代に出現した生物で、根元が私たちにつながる最初の生命を表しているとされています。根元近くに位置する生物の生育温度は80~120℃と高温であることから、最初の生命は高温

環境で生まれたのではないかと考えられています。そして、高温環境の有力な候補として深海の熱水環境が挙げられているのです。実際、現在の熱水環境には高温を好む生物が多く生息し、122℃で生育するメタン菌も発見されています。それは生物の生育温度の世界記録です。

もう1つは、古い地質体に残された記録です。オーストラリアの西オーストラリア州には35億年前の地質体が残されています。地球が誕生したのは46億年前なので、誕生から10億年しかたっていないころの地質体です。当時の海洋地殻の上には堆積層が重なり、海洋地殻の部分には白い岩脈が多数走っています(図3)。それは当時の熱水の通路であり、熱水に溶けていたシリカが冷たい海水と混合する過程で石英として沈殿



図3：35億年前の熱水活動と微生物の存在を記録する地質体
オーストラリア・西オーストラリア州のノースポール地域には、35億年前の海洋地殻と海底堆積物から成る地質体が残されている。海洋地殻に見られる白い岩脈は35億年前の熱水の通り道であり、熱水から析出した石英が埋めている。そこには、当時の熱水を閉じ込めた流体包有物が含まれている。また、白い岩脈の周辺に見られる黒い線状のものはメタン菌の化石で、地球最古の生物化石である。写真提供：東京工業大学 上野雄一郎 准教授



にしざわ・まなぶ。1977年、東京都生まれ。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(東京工業大学)を経て、2009年よりJAMSTEC研究員。専門は生物地球化学。生命と地球の初期進化や現在の海洋の窒素循環を研究。

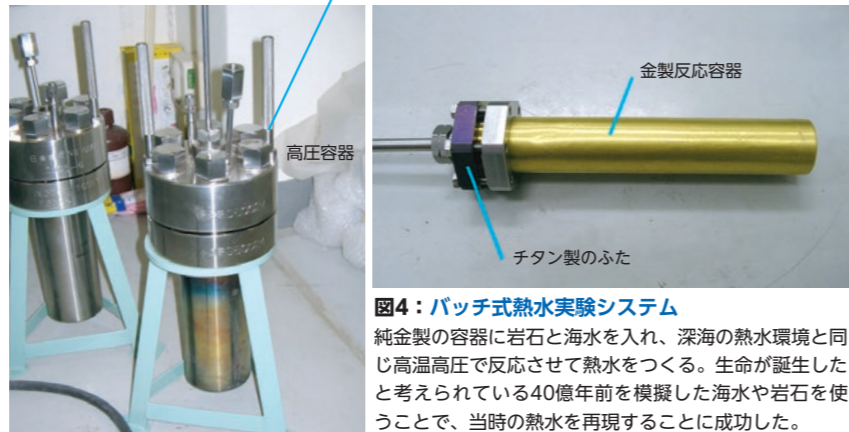
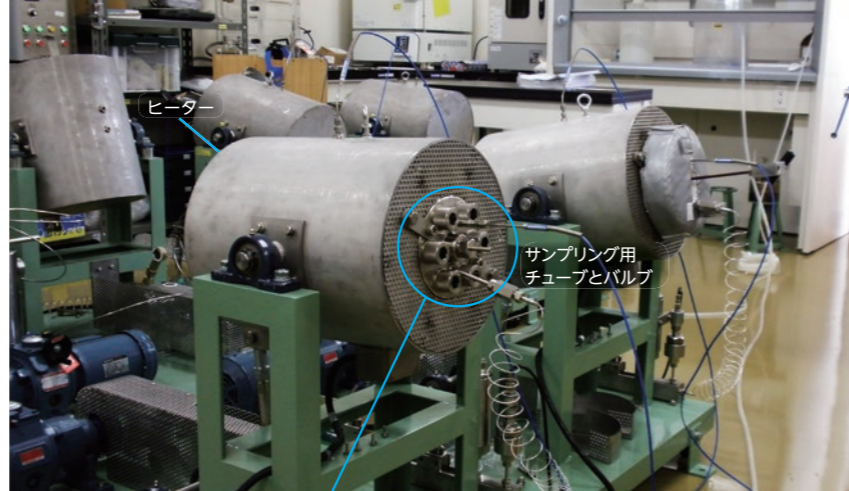


図4：バッチ式熱水実験システム
純金製の容器に岩石と海水を入れ、深海の熱水環境と同じ高温高压で反応させて熱水をつくる。生命が誕生したと考えられている40億年前を模擬した海水や岩石を使うことで、当時の熱水を再現することに成功した。

水素からメタンを合成し、そのときに生じるエネルギーを使って生体物質をつくらせたり代謝を行ったりして生きています。メタン菌は、系統樹で根元近くに位置し、現在の熱水環境にも生息しています。

生命はチムニー内部の穴で誕生？

35億年前の深海には熱水環境があり、微生物がいたことが地質体の記録から明らかになりました。では、深海熱水環境で生命はどのように誕生したのでしょうか。

深海から採取してきたチムニーの断面を顕微鏡で観察すると、小さい穴がたくさん開いています。この穴が細胞のような働きをして、そこで生命が誕生したのではないかと仮説があります。

多様な物質が豊富にある高温の熱水環境ではさまざまな化学反応が起きて、多様な分子が作られる。それがチムニー内部の穴に閉じ込められて濃縮され、さらに化学反応が進み、生命の材料となる有機物が合成されていく。やがて、それらを包む膜状の高分子ができて、細胞のような構造を持つ生命となった、というのです。私もその仮説には共感できる部分があります。

煮込み釜で原始の熱水をつくる

生命の誕生や初期の進化を明らかにするため、私たちは原始地球の熱水を再現しようとしています。そのための装置がバッチ式熱水実験システム、通称、煮込み釜です(図4)。反応容器に岩石の粉末と海水を入れ、深海の熱水環境を模擬した高温高压条件で岩石と海水を反応させて、どのような化学成分を持つ熱水ができるかを調べます。600℃、600気圧まで

の実験が可能です。

現在の海洋地殻は玄武岩ですが、原始地球の海底にはコマチアイトという岩石が広く露出していたと考えられています。しかし、古い地質体に保存されているコマチアイトは風化していて実験に使えません。そこで私たちは、岩石を人工的に作る装置と技術を開発し、コマチアイトをつくってしまいました。海水の化学組成は、原始地球では海水中の二酸化炭素濃度が非常に高かったという推測や、35億年前の地質体で見つかった流体包有物の化学組成などを参考にしています。

実験の結果、現在の熱水と原始の熱水はpH(水素イオン指数)が大きく違うことがわかりました。現在の熱水は酸性です。一方、合成したコマチアイトと当時の化学組成を再現した海水を高温高压で反応させると、水素が大量に発生しました。原始の熱水は水素に富んだ強アルカリ性だったのです。

原始熱水で生きられる微生物を探す

実験でつくった原始の熱水を使い、その環境でどのような微生物が生きられるかを調べています。この実験は、私が担当しています。具体的には、原始の熱水

環境に似ていると考えられているインド洋の熱水環境で採取した微生物を、実験でつくった模擬原始熱水のなかで培養し、その環境で生きられる微生物を絞り込んでいきます。

実験の結果、超好熱メタン菌は原始の熱水環境でも生きられることがわかりました。しかも、それは“窒素固定”を行うことが確かめられました。窒素固定とは、窒素分子からアンモニアをつくることです。窒素は生物の体をつくる原材料として不可欠な元素ですが、窒素分子は化学的に安定で壊れにくいので、多くの生物は窒素分子を体づくりに直接使うことができません。それにもかかわらず地球上に生物がたくさんいるのは、一部の微生物が窒素固定代謝を行い、それをほかの生物が利用しているからです。誕生した生命が進化し生態系を拡大させていくには窒素固定ができる生物が必要ですが、窒素固定がいつから始まったのかは分かっていませんでした。

オーストラリアの35億年前の地質体で見つかった微生物化石もメタン菌です。私は、メタン菌の化石に含まれる窒素成分と、流体包有物に閉じ込められていた窒素分子の同位体比を比較し、そのメタン菌が窒素固定をしていたという説を

2014年に論文発表しました。同位体とは同じ元素でも重さが異なるものことで、窒素には質量数14と質量数15の同位体があります。

再現した原始熱水を用いた微生物の培養実験の結果と35億年前の地質体の解析から明らかになったことを併せて考えると、35億年前の深海熱水環境にはメタン菌が生息していて、窒素固定をしていたようです。だからこそ、熱水環境で誕生した生命が進化し、海洋表層まで生態系を拡大できたのです。

原始の熱水環境での生命誕生過程についての研究は進行中です。新しいことが分かったら、またご紹介します。

土星の衛星エンセラダスで熱水活動

深海熱水活動があるのは地球だけではなく最近明らかになり、注目を集めています。熱水活動が見つかったのは、

土星の衛星エンセラダスです。

エンセラダスの表面は水で覆われています。土星探査機カッシーニの観測から、エンセラダスの南極付近には厚い氷の下に液体の水の海があること、氷の割れ目から海水が間欠泉のようにときどき噴き出していることがわかりました(図5)。さらにカッシーニに搭載されたダスト分析器のデータから、噴出している海水中にナノシリカの粒子が含まれていることが明らかになりました。ナノシリカは主に二酸化ケイ素から成るナノメートルサイズ(1nmは100万分の1mm)の微粒子です。温泉に浮いている湯の花の正体ですが、宇宙で検出されることはまれです。

エンセラダスの海水にナノシリカ粒子が含まれていることを知った東京大学の関根康人 准教授と海洋研究開発機構(JAMSTEC) 海洋地球生命史研究分野の渋谷岳造 研究員たちは、ナノシリカが

できる条件を調べてみようと考えました。エンセラダスの海水の化学組成はカッシーニの観測から分かっています。また海の下にあるコア(核)は、かんらん石や輝石から成ると推定されています。その岩石と、さまざまな温度やpHの海水を反応させる実験を行った結果、90℃以上でpH8~9のアルカリ性の熱水と岩石が反応するとナノシリカが作られることがわかりました。つまり、ナノシリカの存在は、エンセラダスの海底で熱水活動があることを示しているのです。木星の衛星エウロパなど水や氷を持つ衛星はほかにも見つっていますが、熱水活動など内部の様子が明らかになったのは、エンセラダスが初めてです。

エンセラダスには、生命が誕生し得る環境があります。では、生命はいるのでしょうか。私たちは現在、エンセラダスにあると予想される岩石と90℃のアルカリ性の熱水を反応させる実験を行い、生物の餌になる化学物質として何がどれくらいできるかを調べているところです。たとえば、水素がたくさんできれば、水素を使ってエネルギーを得る微生物がいるかもしれない、と予測できます。

エンセラダスに無人探査機を送り込み、噴出した海水を採取して地球に持ち帰り、生命が存在しているかどうかを詳しく調べようという計画も検討されています。地球から土星に到着するまでに10年、試料を持ち帰るまでに20年かかります。私たちの世代はその試料を手にするかぎりぎりですが、次の世代の皆さんによって地球外生命がいるのかいないのか、1つの答えが得られると期待しています。そのときのために、私たちはいまだできることを一生懸命やっています。 **BE**

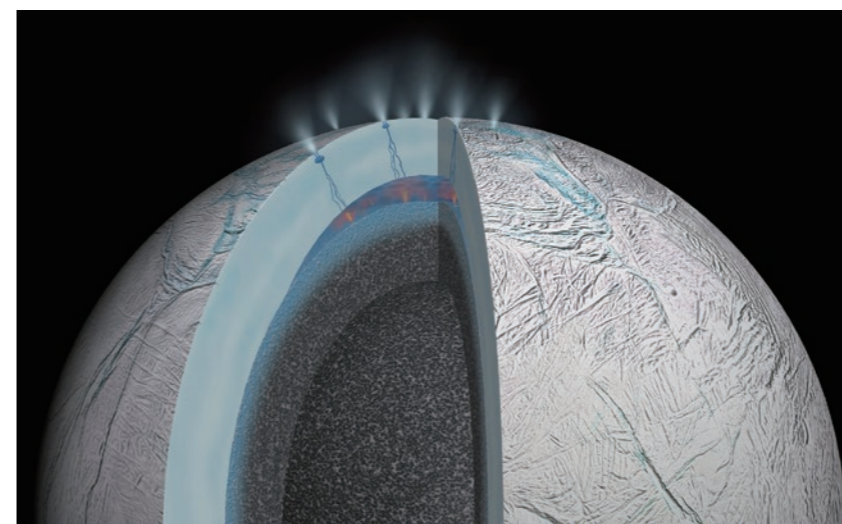


図5：土星の衛星エンセラダスの内部構造の想像図
エンセラダスは直径500kmほどで、表面を厚い氷の氷で覆われている。南極付近では氷の下に液体の海があり、氷の割れ目から海水が間欠泉のように噴き出している。海底には熱水環境が存在していると考えられる。(写真提供：NASA/JPL-Caltech)

「全球海洋観測システム『アルゴ』」は、いかがだったでしょうか。従来の海洋観測では、観測船が決められた測線に沿って航行し、決められた海域で停船して観測機器を海中につり下げ、水温や塩分のデータを取得してきました。または、定期航路を航行する貨物船などに依頼して、自動計測装置による計測が行われてきました。海面のデータは人工衛星から広く高精度で取得できます。しかし、海中のデータは時間的に偏りが大きく、グローバルな海洋観測データというには程遠いものでした。「アルゴ計画」によって2000年から全自動計測フロート（立派なロボット！）の投入が開始され、いまではおよそ300km四方に1台ずつ投入された合計3,800台余りのフロートによって全海洋の水温や塩分をリアルタイムで捉えることができる素晴らしい時代となりました。

私は1990年代初め、海洋における音波の長距離伝搬の研究のために水深2,000mまでの水温と塩分データを集めたことがありました。当時は、アメリカ海洋大気庁（NOAA）や日本海洋データセンター（JODC）などで統計処理された過去のデータしか入手できませんでした。一方、2年ほど前に行った研究では、「アルゴ」のデータサイトから任意の日時の太平洋全域の水温・塩分データをダウンロードして簡単に音速プロファイルを計算できるという夢のような現実に、目まいすら覚えました。

これからの海洋環境変動などの研究者は「アルゴ」データを前提として研究を進めることになるでしょう。一方で、より深海域や極域など「アルゴ」が展開されていない海域でのデータ取得も積極的に進めなければなりません。そして、先人たちが苦勞しながら取得してきた膨大な観測データの蓄積があればこそ地球的規模の新しい理解が得られる、という事実を肝に銘じておいてほしいものです。（T. T.）

『Blue Earth』定期購読のご案内

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

1年度あたり6号発行の『Blue Earth』を定期的にお届けします。

■ 申し込み方法

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

■ 支払い方法

お申し込み後、振込案内をお送り致しますので、案内に従って当機構指定の銀行口座に振り込みをお願いします（振込手数料をご負担いただけます）。ご入金を確認次第、商品をお送り致します。
平日10時～17時に限り、横浜研究所地球情報館受付にて、直接お支払いいただくこともできます。なお、年末年始などの休館日は受け付けておりません。詳細は下記までお問い合わせください。

■ お問い合わせ・申込先

〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25
海洋研究開発機構 横浜研究所 広報部 広報課
TEL.045-778-5378 FAX.045-778-5498

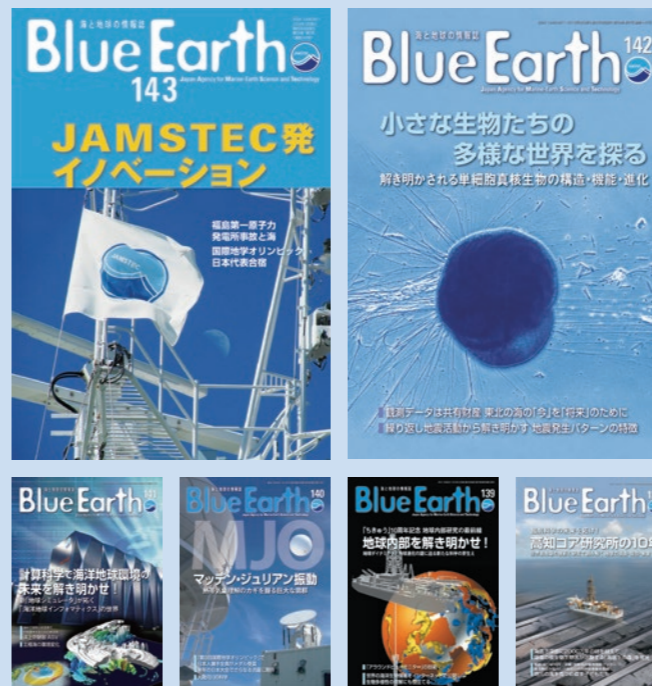
Eメール info@jamstec.go.jp

ホームページにも定期購読のご案内があります。上記URLをご覧ください。

*定期購読は申込日以降に発行される号から年度最終号（148号）までとさせていただきます。
バックナンバーの購読をご希望の方も上記までお問い合わせください。

■ バックナンバーのご案内

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



*お預かりした個人情報は、『Blue Earth』の発送や確認のご連絡などに利用し、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。

JAMSTEC メールマガジンのご案内

URL <http://www.jamstec.go.jp/j/pr/mailmagazine/>

JAMSTECでは、ご登録いただいた方を対象に「JAMSTECメールマガジン」を配信しております。イベント情報や最新情報などを毎月10日と25日（休日の場合はその次の平日）にお届けします。登録は無料です。登録方法など詳細については上記URLをご覧ください。

海と地球の情報誌 Blue Earth

第28巻 第4号（通巻144号）2016年9月発行

発行人 田代省三 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 広報部

編集人 松井宏泰 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 広報部 広報課

Blue Earth 編集委員会

制作・編集協力 有限会社フォトンクリエイト

取材・執筆・編集 立山 晃 (p24-27)、鈴木志乃 (p20-21、p28-31、裏表紙)
岡本典明／ブックブライツ (p1-19)、坂元志歩 (p22-23)

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。

賛助会（寄付）会員名簿 2016年8月20日現在

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

株式会社IHI	海洋エンジニアリング株式会社
あいおいニッセイ同和損害保険株式会社	海洋電子株式会社
株式会社アイケイエス	株式会社化学分析コンサルタント
株式会社アイフエンタープライズ	鹿島建設株式会社
株式会社アクト	川崎汽船株式会社
朝日航洋株式会社	川崎重工業株式会社
アジア海洋株式会社	川崎地質株式会社
株式会社天野回漕店	株式会社環境総合テクノス
株式会社アルファ水工コンサルタント	株式会社キュービック・アイ
株式会社安藤・間	共立インシュアランス・ブローカーズ
泉産業株式会社	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
株式会社エス・イー・エイ	株式会社きんでん
株式会社エスイーシー	株式会社熊谷組
株式会社SGKシステム技研	クローバテック株式会社
株式会社エヌエルシー	株式会社グローバルオーシャン
株式会社NTTデータ	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	神戸ペイント株式会社
沖電気工業株式会社	広和株式会社
オフショアエンジニアリング株式会社	国際石油開発帝石株式会社

国際ビルサービス株式会社	第一設備工業株式会社
コスモス商事株式会社	大成建設株式会社
株式会社コノエ	株式会社コノエ
株式会社コベルコ科研	ダイハツディーゼル株式会社
五洋建設株式会社	大陽日酸株式会社
株式会社コンボン研究所	有限会社田浦中央食品
相模運輸倉庫株式会社	高砂熱学工業株式会社
佐世保重工業株式会社	株式会社竹中工務店
三建設備工業株式会社	株式会社地球科学総合研究所
三洋テクノマリン株式会社	中国塗料株式会社
JFEアドバンテック株式会社	中部電力株式会社
株式会社JVCケンウッド	千代田化工建設株式会社
株式会社ジーエス・ユアサテクノロジー	株式会社鶴見精機
シチズン時計株式会社	株式会社テザック
シナネン株式会社	寺崎電気産業株式会社
株式会社シーフロアーコントロール	電気事業連合会
清水建設株式会社	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	トビー工業株式会社
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
株式会社ソリッド・ソリューションズ・インク	日油技研工業株式会社
損害保険ジャパン日本興亜株式会社	株式会社日産電機製作所

ニッシイマリン工業株式会社	株式会社マックスラジアン
株式会社日放電子	松本徽章株式会社
日本アキユムレータ株式会社	マリメックス・ジャパン株式会社
日本SGI株式会社	株式会社マリン・ワーク・ジャパン
日本エヌ・ユー・エス株式会社	株式会社丸川建築設計事務所
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	三井住友海上火災保険株式会社
日本海洋計画株式会社	三井造船株式会社
日本海洋事業株式会社	三菱重工業株式会社
一般社団法人日本ガス協会	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	三菱電機株式会社
日本水産株式会社	三菱電機特機システム株式会社
株式会社日本製鋼所	株式会社森京介建築事務所
日本電気株式会社	株式会社モンベル
日本マントル・クレスト株式会社	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
濱中製鋼工業株式会社	郵船ナフテック株式会社
東日本タグポート株式会社	株式会社ユー・エス・イー
日立造船株式会社	ヨコハマゴム・マリン&
深田サルベージ建設株式会社	エアロスペース株式会社
株式会社フクロジャパン	株式会社落雷抑制システムズ
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	
株式会社ベッツ	

国立研究開発法人 海洋研究開発機構の事業所

横須賀本部	〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2番地15 TEL. 046-866-3811 (代表)
横浜研究所	〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173番25 TEL. 045-778-3811 (代表)
むつ研究所	〒035-0022 青森県むつ市大字関根字北関根690番地 TEL. 0175-25-3811 (代表)
高知コア研究所	〒783-8502 高知県南国市物部乙200 TEL. 088-864-6705 (代表)
東京事務所	〒100-0011 東京都千代田区内幸町2丁目2番2号 富国生命ビル23階 TEL. 03-5157-3900 (代表)
国際海洋環境情報センター	〒905-2172 沖縄県名護市宇豊原224番地3 TEL. 0980-50-0111 (代表)

デッキでの記念撮影（左）、ロギング実習（右上）、船上ツアー（右下）。

Pick Up
JAMSTEC



「ちきゅう」国際乗船スクール開催 海洋科学掘削を目指す若い世代が参加

世界25カ国が参加する国際深海科学掘削計画（IODP）。地球深部探査船「ちきゅう」はIODPの主力運航船の1つとして運用されている。世界の研究者が期待を寄せる科学掘削船だ。

2016年7月3～6日、海洋科学掘削を目指す世界中の若い世代を対象に「ちきゅう」国際乗船スクールが開催された。日本、米国、欧州をはじめ5カ国から13人の大学院生、研究者、教育関係者が参加し、「ちきゅう」の船上で講義、実習、議論を通して研究を体験した。実習は、すべて英語で行われた。

スクール初日は船上ツアーが行われた。参加者は、「ちきゅう」の中心部であるドリルフロア、ヘリデッキ、ブリッジ、4階建ての研究室など、全長210mの巨大船を約半日かけてじっくり見学した。研究室内での実習は3種類。深海底下から採取された地質試料（コア）の観察と記載、3D CTスキャンなどの非破壊分析、そして掘削孔内で連続的に計測された各種物性データから地層を解析するロギング（検層）である。参加者は、それぞれの実習結果を統合し、最終日の課題であるプレゼンテーションに臨んだ。

講師は、海洋研究開発機構（JAMSTEC）および日本地球掘削科学コンソーシアム（J-DESC）会員機関の研究者が担当した。参加者からは、スクールに対する満足の声とスクール継続の要望が寄せられた。異なる国からの参加者同士の交流も、スクールで得られた大きな成果である。

（小俣珠乃 技術主任 地球深部探査センター科学支援部）