



## アルゴ・ロボットで地球の海を見守る

Blair J. Greenan<sup>1\*</sup>, Annie P. Wong<sup>2</sup>, Tammy Morris<sup>3</sup>, Emily A. Smith<sup>4</sup> and Marine Bollard<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Bedford Institute of Oceanography, Fisheries and Oceans Canada, Halifax, NS, Canada

<sup>2</sup>School of Oceanography, University of Washington, Seattle, WA, United States

<sup>3</sup>South African Weather Service, Cape Town, South Africa

<sup>4</sup>National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Washington, DC, United States

<sup>5</sup>Euro-Argo European Research Infrastructure Consortium (ERIC), Brest, France

皆さんは、科学者たちがどうやって海の中で起きていることについて知るのか、不思議に思ったことはないでしょうか？海面下に潜り、海中からデータを持ち帰ることができるいくつかのタイプのロボットが存在します。そのひとつがアルゴ・フロートと呼ばれるロボットで、海流によって中層を移動し、10日に1度、海面に浮上して、収集した情報を科学者たちに伝えます。現在、約4000台のアルゴ・ロボットが毎日地球の海を見守っています。これらのロボットは、海水温や塩分を測定するほか、化学的・生物学的特性を測定できるものもあります。アルゴ・ロボットは、海がどのようにかはたらき、それが海の生き物だけでなく地球全体にどのような影響を与えるかを科学者たちが調べるための新たなツールとなっています。

### なぜ科学者たちは地球の海を見守っているのか？

海は、食料、医薬品、交通手段、レクリエーションなどを提供してくれるため、人類の繁栄や福祉にとって非常に重要です。また、海には多くの生き物が生息し、そのおかげで人間にとって地球がより親しみやすいものになっています。例えば、海の小さなプランクトンは、私たちが呼吸で利用する酸素の50%以上を作り出しています。海は地球の表面積の70%以上を占め、地球の環境にとっても重要な役割を果たしています。こうした理由から、海を観察し、海をより深く理解し、起こりうる変化を予測することが不可欠であることを、科学者たちは長年にわたって認識してきました。

#### プランクトン

漂流する植物、藻類、および光合成を行う一部のバクテリア。

## 気候

特定の地域における天候の長期的なパターン。通常、少なくとも20年以上にわたって収集されたデータ（気温など）の平均値をもとに推定される。

## 温室効果ガス

二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、フッ素化ガスなど、大気中に熱を閉じ込めるガス。

大気を研究する科学者たちは、日々の天気は海に影響を受けていることから、海を観測することにも興味を持っています。例えば、熱い道路から水が蒸発するのを見たことがありますか？これと同じことが海でも起こり、海面水温が高いところで蒸発が起こり、海から大気へと水が移動します。大気に移った水は、雲、雪、雨の発生を促進します。つまり、海の状態をより良く監視することが、より良い天気予報に繋がります。

科学者たちの中には、地球の気候を研究する専門家もいます。“熱帯気候”の地域には、毎年多くの太陽光が降り注ぎます。そのため海の表面が温かくなり、雲や雨が発生し、これらの地域の気候は一般的に高温多湿となります。しかし、気候は時間とともに変化します。例えば、自動車の利用や家の暖房など、人間活動の中には大気中に**温室効果ガス**を放出して、その濃度を増加させるものがあります。温室効果ガスは毛布のような役割を果たし、熱を閉じ込めて地球の表面を温めます。海は大気から二酸化炭素と熱を吸収し、海流によってそれらを移動させるため、温室効果ガスが気候変動にどの程度影響しているかを理解する上で、海洋観測が重要です。

## アルゴ・ロボット：自由に動き回る海の冒険者たち！

海洋を研究するため、科学者たちは何年にもわたって絶えずデータを収集しなければなりません。この情報を得るための重要な方法のひとつが、船に乗って観測を行うことです（この「[未来のためのフロンティア](#)」の関連記事も参照してください）。しかし、北極や南極など、船が行きにくい場所もあります。また、冬は海が荒れ、船の航行が難しくなります。そこで科学者たちは、季節を問わず世界中の海から観測データを収集するために、アルゴ・ロボットを開発しました（図1）。



図1 (A) アルゴ・ロボットの主要部品を示す図面（画像提供：©トーマス・ヘシグ）。(B) アルゴ・ロボットと高校生グループ。これらの生徒たちは、カナダでフロート「引き取り」プログラムの開発に参加していました。

## センサ

物理的環境から何らかの入力を検出し、それに応答する装置。

このアルゴ・ロボットは「フロート（浮き）」と呼ばれ、海のデータを収集するための**センサ**を搭載しています。「フロート」と呼んでいますが、実際には海中を上下に移動します。科学者たちはアルゴ・ロボットを船から海に投入します。ひとたび海中に入ると、フロートは1,000mまで沈み、その深度で9日間海流に乗って自由に移動します。そして10日目になると、2,000メートルまで潜り、その後、海面まで上昇する間に海を観測します。海面に到達すると、取得したデータと位置情報を衛星経由で科学者たちに送信し、これによってその海域に関する情報のデータベースが構築されます。その後、再び1,000mまで潜り、このサイクルを繰り返します（図2A）。科学者たちはコンピュータ・プログラムを使って、観測データの品質をチェックし、その情報をデータベースに転送します（図2B）。この観測データは、ロボットが浮上してから24時間以内に誰でも自由に利用できます（図2C）。

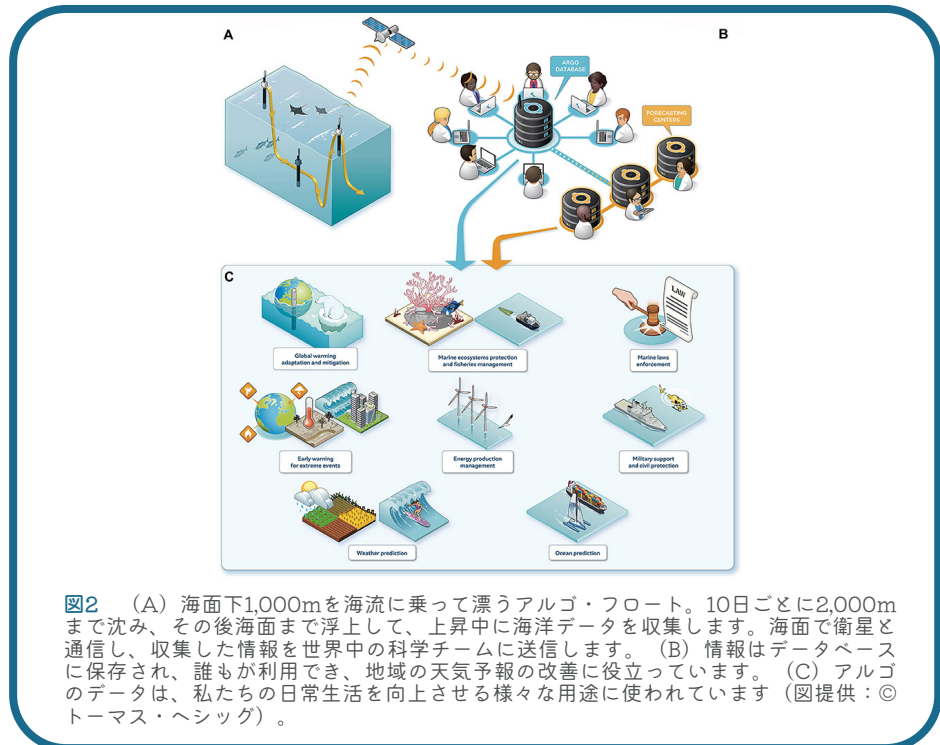


図2 (A) 海面下1,000mを海流に乗って漂うアルゴ・フロート。10日ごとに2,000mまで沈み、その後海面まで浮上して、上昇中に海洋データを収集します。海面で衛星と通信し、収集した情報を世界中の科学チームに送信します。(B) 情報はデータベースに保存され、誰もが利用でき、地域の天気予報の改善に役立っています。(C) アルゴのデータは、私たちの日常生活を向上させる様々な用途に使われています(図提供: © トーマス・ヘシグ)。

## 塩分

海水に含まれる塩の濃度の尺度。塩辛さとも言える。

## 密度

ある物体が有する物質の量(質量)をその物体が占める空間の大きさ(体積)で割ったものの。

アルゴ・ロボットは、圧力、水温、および**塩分**の測定値を記録します。塩分とは、海水に含まれる塩の濃度のことで、海水の**密度**は、塩分と水温で決まります。圧力は、水温と塩分を測定した深度を科学者たちに教えてくれます。海洋では、深さ1メートル(m)は圧力1デシバール(dbar)とほぼ同じです。大気では、気圧の高低が気象システムを作り出します。海洋では、密度の高い場所と低い場所ができることで海流が生じ、大量の水を地球上で移動させます。海洋で水がどのように移動するかを理解することは、気候研究だけでなく、海洋に生息する動植物を保護するためにも重要です。

科学者たちが1990年代後半にアルゴ・ロボットの観測網を最初に考案した当時、この観測網のデータが、ジェイソンという名の人工衛星が観測する海面高度の情報と補い合うように利用されることを望んでいました。ギリシャ神話では、英雄ジェイソンがアルゴという名の船に乗って金の羊毛を探す航海に出たと伝えられています。それに由来して、海洋学者たちはこのロボットをアルゴ・フロートと名づけました。衛星からの海面高度データをアルゴのデータと組み合わせることで、科学者たちは海流の変化を知ることができます。アルゴ・ロボットは過去20年間にわたって海を動き回り、世界中で200万回以上観測データを収集してきました<sup>1</sup>。現在、約4000台のアルゴ・ロボットが海洋観測を行っています。

アルゴ・ロボットはバッテリーで動作し、一年中24時間稼働しています。このロボットのおかげで、科学者たちが地球の海を監視する能力は、以前とは比べ物にならないほど向上しました。アルゴ・ロボットのバッテリーは通常5年以上持続します。バッテリーを使い切ると、ロボットは活動を停止し、海底に沈みます。これは海にごみを捨てているように見えるかもしれませんが、海への環境負荷は他の汚染物質に比べれば極めて小さく、収集される海洋データは地球の理解に非常に貴重なものです。

## アルゴ・ロボットは海について何を教えてくれるのか？

### 海洋貯熱量

海洋に蓄積されている熱の形態でのエネルギー量。

1970年以降、人間活動で放出された温室効果ガスによって発生した熱の90%以上を海洋が吸収しています。世界の多くの海域で水温が上昇しています。科学者たちがこれを監視する方法のひとつに、水温と塩分の測定値を用いて、**海洋貯熱量**と呼ばれる海洋のある層にどれだけの熱が蓄積されたかを求めるというものがあります(図3)。アルゴ・ロボットが収集したデータを使って、科学者たちは、熱波のような極端現象が、大気と同じように海洋でも頻繁に起こっていることを発見しました。この海洋熱波は、海の動物がより温度の低い水を求めて他の海域に移動する原因となります。しかし、移動できない植物と動物は、この海洋熱波に苦しむことになります。

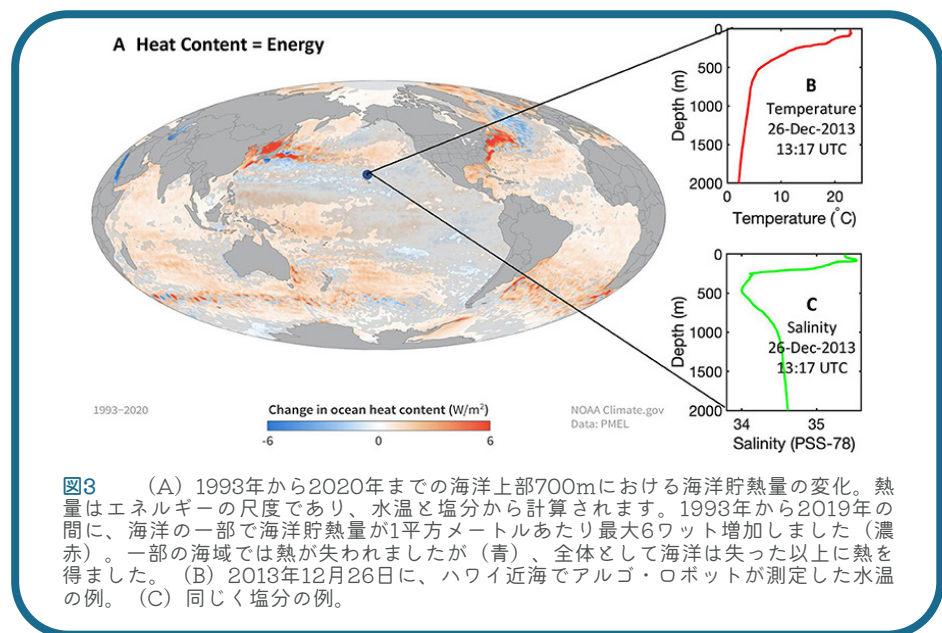


図3 (A) 1993年から2020年までの海洋上部700mにおける海洋貯熱量の変化。熱量はエネルギーの尺度であり、水温と塩分から計算されます。1993年から2019年の間に、海洋の一部で海洋貯熱量が1平方メートルあたり最大6ワット増加しました(濃赤)。一部の海域では熱が失われましたが(青)、全体として海洋は失った以上に熱を得ました。(B) 2013年12月26日に、ハワイ近海でアルゴ・ロボットが測定した水温の例。(C) 同じく塩分の例。

気候変動のもう一つの大きな影響として、世界的な海面上昇が挙げられます。海の水が温まると膨張し、これが海面上昇の主な原因の一つです。海面上昇は、洪水や浸食を引き起こし、塩分を含んだ海水と混ざり合って淡水が飲めなくなるため、私たちの日常生活に大きな影響を与える可能性があります(海面上昇に関する詳細はこの「[未来のためのフロンティア](#)」の記事を参照してください)。アルゴ・ロボットは地球の海がどのように変化しているかを見守っているため、世界の海面上昇を監視する上で重要なツールとなっています。

### コンピュータモデル

地球の大気や海洋など、現実世界のシステムを模倣するためにコンピュータ上で動作するプログラム。

海洋を把握することは、天気予報の向上にも繋がっています。アルゴ・ロボットが送信する水温と塩分のデータを利用して、科学者たちは海洋の**コンピュータモデル**を気象予測計算に組み込みました。このモデルに実際の海洋データをインプットすることで、大気と海洋がどのように相互作用しているかについて科学者たちの理解を深めることができます。これは、温かい海の表面から多くのエネルギーを得て発達するハリケーン、サイクロン、台風のような強烈な暴風雨を予測する上で非常に重要です。

## より深く、そして新たな方向へ

これまで、アルゴ・ロボットの観測は、世界の海洋体積の50%未満に相当する海洋の上層2,000mに制限されていました。海底まで移動できるロボットを設計するのは非常に難しいですが、科学者とエンジニアたちは最近、深さ6,000mまで潜れるロボットの開発に成功しました<sup>2</sup>。海面から海底まで測定することにより、科学者たちは熱や淡水の含有量の変化をより詳細に理解することができるようになり、これによって世界の海面上昇に関するより正確な情報が得られるようになります。

今、私たちは新たな時代の幕開けを迎え、アルゴ・ロボットが海洋の化学および生物学に関連する観測を行えるようになりました<sup>3</sup>。これにより、例えば海洋中の酸素や二酸化炭素の量の変化に関する情報が得られます。現在、地球の海は酸素を失い、大気からより多くの二酸化炭素を吸収しています。これらの変化は、多くの人々の食糧を支える水産資源を含む海洋生態系に影響を与えています。

アルゴ・ロボットは海洋学者の工具箱の中の1つのツールです。また、アルゴ・ロボットは「全球海洋観測システム (GOOS)」と呼ばれるグローバル・システムの一部でもあります。GOOSを構成する他のパートナーと一緒に、アルゴ・ロボットの進歩は、海のパフォーマンスとそれが時間とともにどのように変化しているかを全球的に把握するのに役立つでしょう。あなたもこの海洋観測に参加することができます。どうやって？ [好きなフロートを自分のものとして「引き取る」んです。](#)あなたはアルゴ・ロボットを選び、名前をつけ、世界中を旅する様子を追うことができます。アルゴ・オンライン・[スクール](#)や[オーシャン・オブザーバーズ](#)でも、アルゴについてさらに学ぶことができます。海の冒険があなたを待っています！

## 参考文献

1. Wong, A. P. S., Wijffels, S. E., Riser, S. C., Pouliquen, S., Hosoda, S., Roemmich, D. et al. 2020. Argo data 1999–2019: two million temperature-salinity profiles and subsurface velocity observations from a global array of profiling floats. *Front. Mar. Sci.* 7:700. doi: 10.3389/fmars.2020.00700
2. Roemmich, D., Alford, M. H., Claustre, H., Johnson, K., King, B., Moum, J. et al. 2019. On the future of argo: a global, full-depth, multi-disciplinary array. *Front. Mar. Sci.* 6:439. doi: 10.3389/fmars.2019.00439
3. Bittig, H. C., Maurer, T. L., Plant, J. N., Schmechtig, C., Wong, A. P. S., Claustre, H., et al. 2019. A BGC-argo guide: planning, deployment, data handling and usage. *Front. Mar. Sci.* 6:502. doi: 10.3389/fmars.2019.00502

受領: 2022年5月13日

受理: 2023年9月21日

オンライン公開: 2023年10月06日

編集者: Pedro Morais, Florida International University, United States

科学メンター: Laura Lorenzoni and Sagi Dalyot

利益相反: 著者らは、本研究が利益相反の可能性があると解釈されるような商業的または経済的関係がない状態で実施されたことを宣言する。

## 若手レビューアー

### デニス, 12歳

こんにちは、私の名前はデニスです。星を見たり、友達と一緒にビデオゲームをするのが好きです。好きな星団はメシエ45で、好きな星座はオリオン座の三つ星です。お気に入りのビデオゲームはコール オブ デューティ 2です。

### レオ, 12歳

レオはフロリダで生まれ、ビーチが好きで、特にシュノーケリングが趣味です。彼は歴史と神話が好きで、特に水中に関するものに興味があります。チェロを弾き、2匹の犬を飼い、空き時間にはビデオゲームを楽しんでいます。





### オマー, 14歳

私は国際政治に興味があり、政治、哲学、歴史についての本を読むのが好きです。ニンテンドー・スイッチやパソコンでゲームをするのが好きで、音楽を聴いたり、D&Dやウォーハンマー40Kなどのロールプレイング・ゲームをするのも好きです。

## 筆者

### ブレア・J・グリーン

ブレア・グリーンは、カナダのノバスコシア州ハリファックスにあるベッドフォード海洋研究所の科学者です。国際アルゴ計画でのカナダの活動を統括しています。彼の研究は、沿岸地域社会が海洋気候変動に適応できるよう支援することに重点を置いています。気候変動による地域ごとの海面変動の情報を科学的根拠に基づいたツールで提供することで、社会基盤問題にも取り組んでいます。



### アニー・P・ウォン

アニーは米国のワシントン州シアトルにあるワシントン大学の科学者です。彼女は海洋学者であり、最初は船舶で海洋データを収集する海洋科学から研究を始めました。現在はアルゴデータを用いて海洋の塩分を研究し、特に南極周辺の海に興味を持っています。アルゴデータ管理チームの一員として、アルゴデータの公開にも貢献しています。



### タミー・モリス

タミー・モリスは南アフリカのケープタウンに拠点を置く南アフリカ気象局の海洋部門のシニア科学者です。海洋観測の専門家であり、アルゴ・フロート、漂流ブイ、係留ブイなどの海洋観測機器を使用し、調査船に乗り数カ月海上で過ごした経験があります。彼女の研究はアガラス海流システムに焦点を当てたもので、最近ではこの海流と南極海との相互作用について研究しています。



### エミリー・A・スミス

エミリーは、米国のアルゴ計画、全球海面水位観測システム(GLOSS)、境界流での海洋グライダー観測、海洋貯熱量プロダクトなど、複数のプログラムのマネージャーです。彼女は観測システムの予算管理と戦略プランニングを担当しています。また、米国と海外の学校とのパートナーシップを促進するドリフター「引き取り」プログラムのコーディネーターでもあり、各学校が漂流ブイを追跡し、そのデータをリアルタイムで授業に活用できるようサポートしています。NOAAに勤める前、彼女は数年間、中学校で教師をしていて、このプログラムは彼女が教育界との繋がりを保つのに役立っています。



### マリン・ボラード

マリンは、ユーロ・アルゴ欧州研究基盤コンソーシアム(ERIC)のアウトリーチ活動を担当しています。ERICは、海洋のより良い理解と予測、気候システムにおける海洋の役割の解明、海洋の健全性の改善を支援することを目的として、アルゴ全球海洋監視システムに対する欧州の長期的貢献を推進しています。彼女は水文地質工学と科学ジャーナリズムの2つの修士号を取得しました。ユーロ・アルゴに来る前は、教育目的や一般向けに科学普及の本や記事を数年間出版していました。



引用: Greenan BJ, Wong AP, Morris T, Smith EA and Bollard M (2023) Keeping an Eye on Earth's Oceans With Argo Robots Front. Young Minds 11:943491. doi: 10.3389/frym.2023.943491

翻訳: Tetsuichi Fujiki, Kanako Sato and Toshio Suga  
著作権 © 2023 グリーン、ウォン、モリス、スミス、ボラード。  
これはクリエイティブ・コモンズ表示ライセンス (CC BY) の条件下で配布されるオープンアクセス記事である。原著者および著作権者のクレジットを明記し、学術的に認められる慣行に従って本誌の原著を引用することを条件に、他のフォーラムでの使用、配布、複製を許可される。これらの条件に従わない使用、配布、複製は許可されない。