

海と地球の情報誌

ISSN 1346-0811
2023年3月発行
(通巻171号)

Blue Earth



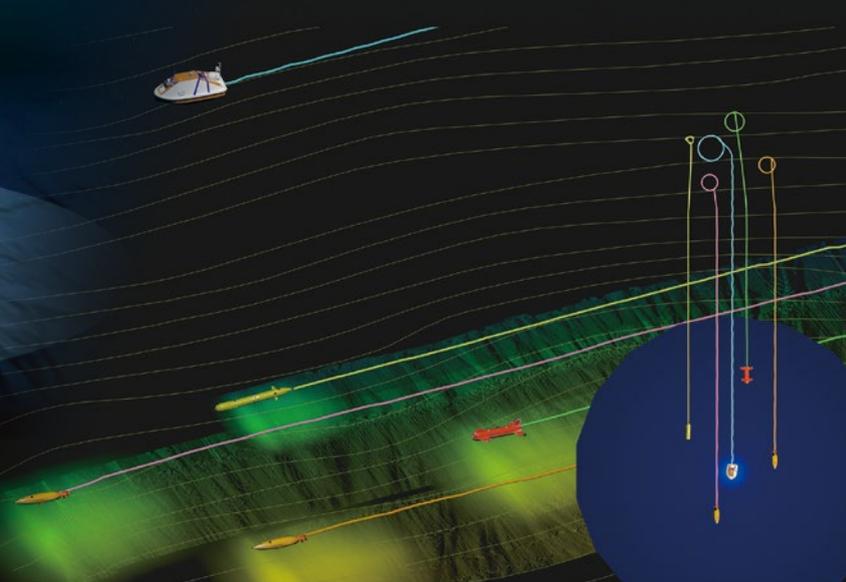
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

171



特集

海洋ロボティクス



全体監修

研究プラットフォーム運用開発部門 技術開発部
海洋ロボティクス開発実装グループ
石原靖久

取材協力

研究プラットフォーム運用開発部門 技術開発部
海洋ロボティクス開発実装グループ
中谷武志／澤 隆雄／前田洋作／各務 均／麻生達也

基盤技術研究開発グループ
志村拓也

深海資源調査技術開発プロジェクトチーム
大澤弘敬

水中光無線通信の試験を行っている自律型無人探査機「AUV-NEXT」。機体の下部にある光無線通信装置から発信された青い光が見える。水中光無線通信は、短距離であれば、水中でよく使われている音響通信より高速で通信できる。2022年には「AUV-NEXT」を用いて、海底に設置した海底設置型観測システム「FFC11K」が撮影した画像データを水中光無線通信によって自動回収することに世界で初めて成功した（詳細は16ページ）。

広く、深く、暗い海。

中でも深海は、光や電波も届かず高い圧力のために、人はもちろん機械ですら容易に近づくことができない。こうした深海の調査研究を実現するのが、海洋ロボティクスである。海洋ロボティクスの定義はさまざまだが、一般的には海洋を調査するための機器およびそれに関連する技術のことをいう。海洋を調査するための機器と聞いてまず思い浮かぶのは、深海へ行く探査機本体だろうか。ほかにも通信装置、センサ、カメラ……と多様な機器があり、それらの関連技術は構造や駆動、制御、解析などと幅広い。

JAMSTECでは、さまざまな革新的海洋ロボティクスを開発・実装することで、深海の調査研究に新展開をもたらそうとしている。その最先端を紹介する。

海洋ロボティクス

JAMSTECの深海探査機

深海とは――。浅い海は太陽の光が届いて明るい、深くなるにつれ届く光の量が減り、海域によって異なるものの水深200mでは到達する光は海面の0.1%になる。植物が光合成できる限界がこのあたりで、200m以深を「深海」と呼ぶことが多い。

水深1,000mになると、光はまったく届かなくなり、水温は2°Cほどだ。それより深くなっても水温はほぼ一定だが、海底から300°Cを超える熱水が噴き出している場所もある。水圧は10m深くなるごとに1気圧ずつ増えていき、地球最深部であるマリアナ海溝のチャレンジャー海淵、水深10,920mの海底では1cm²に1トンもの圧力がかかっている。

暗黒、低温、高圧という過酷な環境に耐えながら深海を調べるため、JAMSTECではさまざまな特長を持つ探査機を運用し、開発も行っている。それぞれの特長を紹介しよう。

無人探査機

無人で深海を探査する。有人潜水調査船が近寄ることができない危険な海域でも調査が可能。自律型無人探査機と遠隔操作型無人探査機がある。

自律型無人探査機 (AUV: Autonomous Underwater Vehicle)

母船とケーブルでつながっておらず、バッテリーを内蔵し、あらかじめプログラムされたルート(シナリオ)に沿って自律航行して調査する。AUVには、高速で移動しながら広い範囲を調査する航行型と、狭い範囲を低速で移動したり停止したりしながら調査するホバリング型などがあり、現在JAMSTECで運用しているAUVは全て航行型である。

深海巡航探査機「うらしま」

音波を扇状に発信して真下だけでなく幅広く水深を測ることができるマルチビーム音響測深機と大容量の電池を搭載しているため、1回の潜航で広範囲の海底地形調査が可能である。全長10mと大きく、調査機器を搭載するペイロードスペースは大人が4人入れるほどの広さがあり、重力計や採水器、磁力計など大型機器も搭載可能。最大潜航深度は3,500m。現在、最大潜航深度8,000mに改造中である。



自律型無人探査機「じんべい」

機体後部のX舵とスラスタのほかに、スラスタ自体の方向を変えることができるアジマススラスタを機体中央の左右に搭載している。海水の化学データを取るときには低速航行のため舵の利が悪くなるが、アジマススラスタによって低速でも安定して航行できる。最大潜航深度は3,000m。



自律型無人探査機「AUV-NEXT」

JAMSTECのAUVの中で現在、最も深い4,000mまで潜航できて、最も速い(最高速力4.5ノット*)。JAMSTECなど国内8機関で結成された「Team KUROSHIO」が参加した海底探査の国際コンペティション「Shell Ocean Discovery XPRIZE」において、ギリシャ・カラマタ沖の地中海を無人の洋上中継機の管制下で24時間以上の長時間連続航行、高精度の海底地形データの取得に成功し、準優勝に貢献した。現在は、開発中のセンサなどを搭載してその性能を試験したり、地震発生帯の海底調査に使われている。

*速力4.5ノットは時速約8.3km。JAMSTECのほかの探査機の最高速力は約3ノット(時速約5.6km)。

有人潜水調査船

人が搭乗して深海を探査する。1回の潜航で調査できる範囲は狭いが、人が直接観察できるので、臨機応変に判断して移動や撮影、試料採取が可能である。

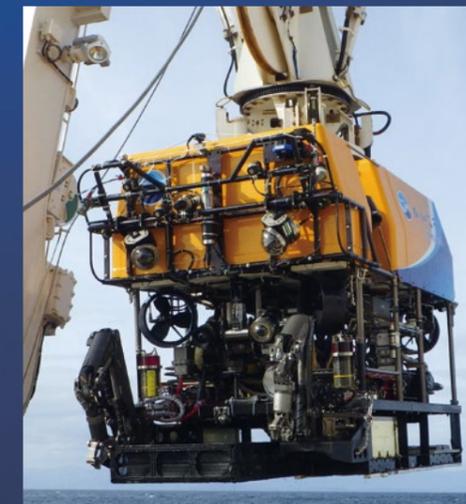


有人潜水調査船「しんかい6500」

乗員数3人。母船とケーブルでつながっていない。前後左右上下へ移動できて機動性が高く、マニピュレータによって海底でのサンプリングや軽作業が可能。母船との通話は、音波を用いた音響通信で行う。最大潜航深度は6,500m。

遠隔操作型無人探査機 (ROV: Remotely Operated Vehicle)

母船とつながったケーブルを介して遠隔操作で調査する。ケーブルがあるため移動できる範囲は狭い。しかし、探査機に搭載されたカメラによる深海の映像がリアルタイムで母船に送られ、その映像を見ながら操作できるため、詳細な調査や試料採取などの細かい作業が可能。またケーブルで電力が供給されるため、長時間の作業や重作業ができる。



無人探査機「ハイパードルフィン」

6基の大型スラスタを備えているため機動性に優れ、マニピュレータによる試料採取や複雑な海中作業が可能。超高感度ハイビジョンカメラを搭載し、生物や海底地形の鮮明な映像を撮影できる。南海トラフで発生する地震と津波を常時観測・監視するため紀伊半島沖から室戸岬沖に展開している地震・津波観測監視システム(DONET)のケーブル敷設、センサ設置、保守整備などの重作業を実施。最大潜航深度は4,500m。

無人探査機「かいこうMk-IV」

水中で250kgの物を持ち上げることができる大出力のマニピュレータ、大型の油圧スラスタ、高解像度カメラなどを備えており、大深度で重作業が可能。機動性、作業性において世界トップクラスの性能を有している。最大潜航深度は4,500m。



日本の周りには深い海と日本のAUV

AUVの主要な任務——それは海底地形データの取得である。

私たちは、地上のあらゆる場所について詳細な地形図をすぐ見ることができる。月や火星でさえ、詳細な地形図がある。ところが海底については、全体の10%ほどしかそれが無い。地上や、海がない月や火星は、人工衛星などから可視光や電波などの電磁波を使って広範囲の詳細な地形データを取得できる。しかし電磁波は水中ですぐ減衰してしまうため、海水に覆われている海底地形調査には使えない。

代わりに使うのが音波だ。船を走らせながら船底から音波を発信し、それが海底に反射して戻ってくるまでの時間を計測することで船底と海底間の距離が分かり、そのデータから海底地形図をつくっている。しかし、船からの音波で得られる地形データの解像度は、人工衛星からの電磁波で得られる地形データの解像

度より低い。しかも水深が深くなるほど船と海底の距離は長くなるため解像度はより低下し、水深数千mにもなると船で得られた海底地形図はとて粗いものになってしまうのだ。

解像度を高めるには、海底に近づく必要がある。それを可能にするのがAUVである。AUVならば、あらかじめ決められたルートに従って海底から100mほどの高度を航行し、詳細な海底地形データを取ることができる。

海底地形図は、地震研究をはじめとする科学研究に不可欠な基本情報である。海底油田開発や海底ケーブル敷設の事前調査などでも高精度な海底地形図が必要とされている。安全保障の観点からも自国周辺の海底地形を知ることは重要だ。

ここで、日本周辺の海を見てみよう。日本の排他的経済水域（EEZ）の面積は世界第6位である。深度ごとの面積比を見ると、4,000mを超え

る海域が約50%を占める。6,000mを超える海域も約6%あり、その面積は世界第1位である。世界の海の平均深度が約3,800mであることから、日本は大深度の海域を広く有していると言える。

現在JAMSTECが運用しているAUVでの最大潜航深度は「AUV-

NEXT」の4,000mである。つまり、EEZのおよそ半分は詳細な海底地形データを取得することができない、という状況なのだ。一方で、4,000m以深についても海底地形データのニーズは高い。特に、巨大地震が繰り返し発生している日本海溝について、詳細な海底地形図が必要とされている。

2011年の東北地方太平洋沖地震は、岩手県沖から茨城県沖にかけての日本海溝沿いの断層が割れ、す

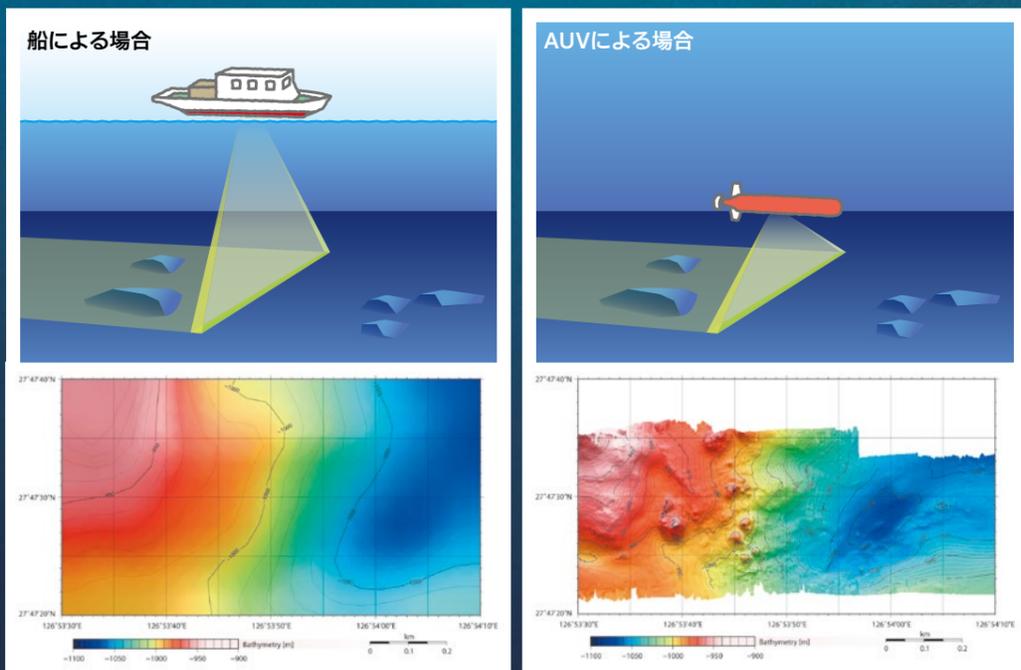
べて発生した。割れ残った南側や北側の領域を震源とする巨大地震の発生が懸念されている。事が起きる前から日本海溝の詳細な海底地形データを蓄積しておくことは、地震発生の切迫度の推定や、発生後の変化を知るのに役立つ。東北地方太平洋沖地震のときは、発生直後に行った調査で取得した海底地形データと過去の調査で取得していたデータの比較から、日本海溝の陸側の海底が

水平方向に約50m移動し、鉛直方向に約10m隆起したことが分かった。ただし船によるデータのため、断層がどのようにすべったかなど地震発生のメカニズムを推定するには、それでは精度が足りなかった。AUVならば地震発生のメカニズム解明にも役立つ高精度なデータを取得できる。

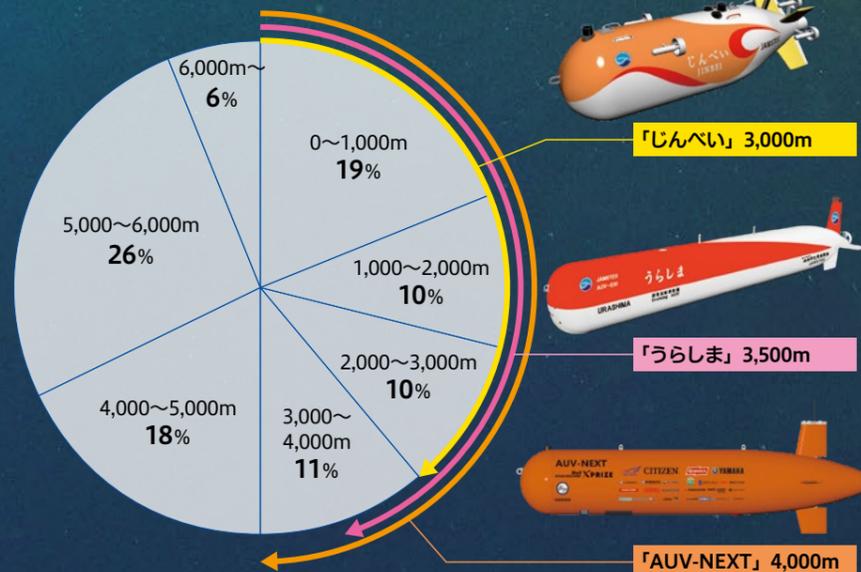
日本海溝の最深部は8,020m。そこまで潜航できるAUVをつくれれば、EEZの98%の調査が可能になる。

海底地形データの取得

船、AUVともに、海底に向けて音波を発信し、海底に反射して戻ってくるまでの時間を計測して海底までの距離を求める。下の画像は、同じ海域について船とAUVそれぞれの測深データから作成した海底地形図である。船の場合は、左から右に向かって深くなっていくという程度の地形情報しか得られない。AUVの場合は、左から右に向かって深くなっていくことは同じだが、細かい起伏も分かる。



日本のEEZの深度別占有面積比とJAMSTECのAUVの最大潜航深度



日本のEEZの深度別占有面積比の典拠：海洋政策研究所「Ocean Newsletter」第123号 (https://www.spf.org/opri/newsletter/123_3.html)

8,000m級AUVを開発する

ターゲットは水深8,020mの日本海溝最深部——。日本海溝では巨大地震が繰り返し起きていることから、早急に8,000m級AUVを実現したい。そこでJAMSTECは、これまでのAUVの開発実績を活用することで早期の運用を目指す、という方法に

踏み切った。新しいAUVを一から開発するのではなく、「うらしま」を改造するのだ。「うらしま」は1998年から開発を始め、2000年に初潜航、2009年に実用機として完成した。長年の運用実績があることが、「うらしま」を選んだ大きな理由だ。

フレーム、フェアリング、アクチュエーター、ソフトウェアなど使用可能なものは、極力活用する。しかし、「うらしま」の最大潜航深度は3,500mだ。搭載している耐圧容器やセンサ、浮力材などは、水深8,000mの水圧に耐えられない。そ

れらは、新たに設計したり選定し直したりする。耐圧容器は肉厚を厚くしなければならないため、重くなる。それでも全体の重量が増加してしまわないように、システムおよび搭載センサの構成を見直し、機材の絞り込みを行うことを検討している。

海底地形を調べる装置も一部変更する。従来の「うらしま」は、測深データを取得するマルチビーム音響測深機、海底の画像を取得するサイドスキャンソナー、海底下数十mの地層情報を取得するサブボトムプロ

ファイラーを搭載していた。8,000m級AUVでは測深データも取得できるサイドスキャンソナーと、サブボトムプロファイラーを搭載する予定だ。

従来の「うらしま」はペイロードスペースの容量が大きく、調査目的に応じて研究者が必要な機器を持ち込むことができる点が高く評価されてきた。8,000m級AUVでも同程度の容量を確保する。

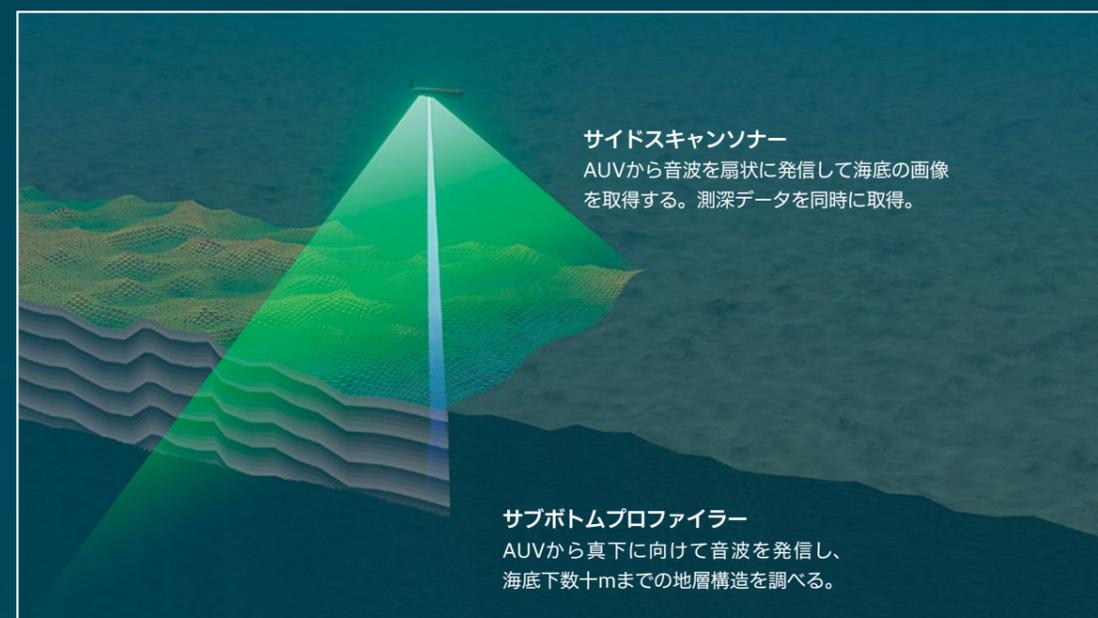
「うらしま」の8,000m級化は、2022年度中に基本設計を終え、2023年度から製作・組み立てを行う。組み立て後は、運用深度において機体が浮きも沈みもしない状態になるようにバランスの調整を行うほか、指定したルートに沿って航行できるかどうかなど、試験を繰り返して確認する。まずは岸壁、次は水深1,000mと浅いところから順に進め、2025年度に水深8,000mで地形データを取得する計画である。通常のAUV開発では考えられない早さだ。しかし、これまでJAMSTECが培ってきた技術と知見が、短期間で運用開始を可能にする。

行って確認する。まずは岸壁、次は水深1,000mと浅いところから順に進め、2025年度に水深8,000mで地形データを取得する計画である。通常のAUV開発では考えられない早さだ。しかし、これまでJAMSTECが培ってきた技術と知見が、短期間で運用開始を可能にする。

AUVは海底地形データの取得以外にも、海底油田・ガス田施設の保守・点検、海底に沈んだ船や航空機の捜索、海洋環境調査などさまざまな用途があり、AUV市場は急速に成長している。ただし、その多くが4,000m級、深くても6,000m級である。中国のAUV「悟空」が2021年に水深10,896mまで潜航したという情報があるものの、大深度対応のAUVは非常に少ない。「うらしま」を改造した8,000m級AUVによる深海調査に大きな期待が寄せられている。



8,000m級AUVによる海底地形調査のイメージ図



サイドスキャンソナー
AUVから音波を扇状に発信して海底の画像を取得する。測深データを同時に取得。

サブボトムプロファイラー
AUVから真下に向けて音波を発信し、海底下数十mまでの地層構造を調べる。

「うらしま」を改造した8,000m級AUVのイメージ。全長10m、幅1.3m、高さ1.5mと、大きさは「うらしま」と変わらない。

水中音響通信をもっと高速に。そして通信と測位の統合も。

電波や光が届かない深海といかに高速に通信するか——。母船とケーブルでつながれていないAUVや「しんかい6500」などにとって、重要な問題である。

海中では電波は吸収されてしまうため、通信には音波が使われる。音波が水中を伝わる速度は、電波が空气中を伝わる速度の20万分の1と非常に遅い。さらに水中での音波は、通信に使える周波数の帯域幅が空中での電波と比べて非常に狭い。周波数帯域幅は道路の幅のようなもので、帯域幅が狭いと、同時にたくさんの情報を送ることができないため通信速度を上げることができない。周波数帯域幅は、周波数が高い方が広げることができるが、周波数が高いと減衰しやすい。つまり水中において遠距離で通信をしようとする、低い周波数を使わざるを得なくなり、使える帯域幅がさらに狭くなって通

信速度は低下してしまうのだ。そうした水中での音波特有の問題に阻まれながらも、JAMSTECでは水中音響通信の高速化に取り組んできた。

「しんかい6500」にはJAMSTECで独自開発した音響通信装置が2018年度から装備されており、観測データやカメラの画像を転送するための装置として実運用されている。この装置では、水深6,500mから最大79.1kbpsの速度で通信をすることが可能だ。水中音響通信では通信速度は距離におおよそ反比例するため、装置の性能の比較には「通信速度 (kbps) × 距離 (km)」という指標を使う。市販されている通信装置は40kbps・kmほどであるのに対して、「しんかい6500」の音響通信装置では500kbps・km以上となる。この性能の違いは、市販品が主に陸上の電波通信の手法を用いているのに対して、「しんかい6500」の装置では水

中音響通信に適した手法を用いていることなどによる。

2019年には、「しんかい6500」と同じ音響通信装置を海底設置型観測システム「FFC11K」に搭載して試験を行った。水深9,230mの海底で「FFC11K」のカメラが撮影した画像データを69.2kbpsで母船に送信することに成功。このときの指標の値は638kbps・kmと、非常に高い。「うらしま」を改造してつくる8,000m級AUVにも、この音響通信装置を搭載する計画だ。これまでAUVが取得したデータは、AUVを回収するまで見ることができなかったが、船上で確認しながら調査を行うことも可能になる。

海中のAUVの位置を知るときにも音波を使う。具体的には、船からAUVへ質問信号を送り、AUVからの応答信号を船で受信することで測位する。測位のための装置は、指令

や画像をやりとりする通信装置とは別に装備されているのだが、現在の測位と通信にはいくつか問題がある。まず、測位の信号と通信の信号が重なってしまうと情報を読み取れないので、測位信号を送信後、重ならないタイミングを計って通信の信号を送らなければいけない。そのため、測位も通信も高頻度ではできない。測位の頻度が低いとAUVの位置を精度よく把握できなくなり、タイミングを計って発信してもAUVに届く信

号が重なってしまうこともある。

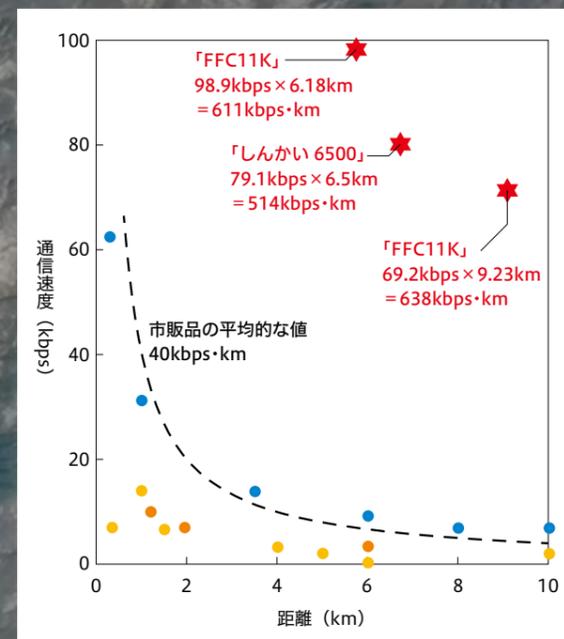
そうした問題を解決するべく考案した方法が、通信と測位の統合だ。これまでは、通信用の送波器と受波器、測位用の送波器と受波器が、別々に装備されていた。新しい装置では、送受波器を通信用・測位用共通にして1つにまとめ、信号の処理も統合して行う。この方法では通信信号の最初の部分を使って測位ができるため、間隔を空けて発信する必要がなく、高頻度で通信と測位が可能になる。

AUVの位置を精度よく把握でき、また効率よく情報を送ることができる。

送波器、受波器が共通化された装置はすでにあるが、信号処理は従来通り通信と測位を別々に行っている。装置としても信号処理としても統合したのは、世界で初めてだ。すでに、この統合装置を搭載したAUVの実海域での運用、しかも複数AUVの同時運用に成功している。今後、さまざまなAUVに実装していく計画だ。

2022年9月に行われたAUV 4機隊列制御試験で潜航を始めたAUV。この試験では、音響通信測位統合装置を搭載した4機のAUVを同時に展開し、洋上中継機を介して隊列制御を行うことに成功した（詳細は18ページ）。

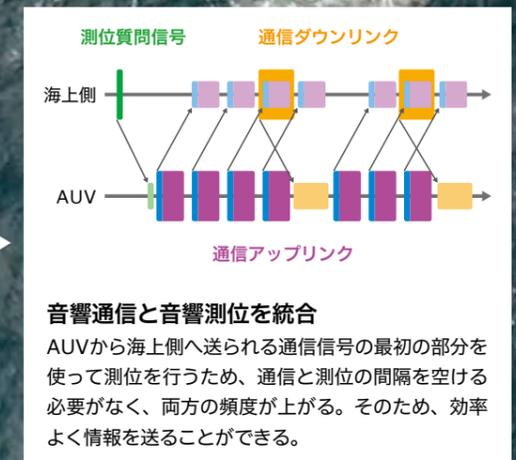
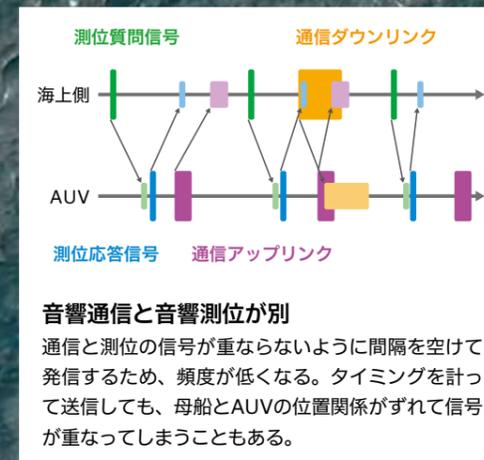
水中音響通信装置の性能比較



海底設置型観測システム「FFC11K」。FFCはフリーフォールカメラシステムの略で、11Kは最大潜航深度が11,000mであることを意味する。海面から自由落下して着底し、海底の撮影や試料の採取などを行う。通常は「FFC11K」を回収するまで海底の情報は分からないが、音響通信装置を搭載することで画像を母船に転送し、船上で確認できる。



「FFC11K」が水深9,230mで撮影し、音響通信装置を用いて母船に送信された画像。2.5秒間隔で画像を送信することに成功した。



新コンセプトの超深海作業型ビーグルシステムを開発する

深海で海底に近づいて目的の試料を探して採取する——。それができるのは、有人潜水調査船やROVだ。現在JAMSTECが運用しているROVの中で最も深くまで潜航できるのは「かいこうMk-IV」で、水深4,500mである。実は、「かいこうMk-IV」単体は水深7,000mまで対応しているのだが、母船と接続する現在のケーブルシステムがこの深度に対応していない。ケーブルで母船と接続されるROVは、光ファイバを用いた高速大容量通信が可能であり、母船上のオペレーターが深海の映像をリアルタイムで確認しながら遠隔操作できる。船舶から大電力を送ることも可能だ。ところがケーブルが長くなると、鋼線の場合、自重による張力増加がケーブルの強度にやがては到達してしまう。安全率を加味すると、鋼線ケーブルを7,000m以上繰り出すのは難しい。この問題を解決できる新素材のケーブルも開発されていない。では、どのようなシステムならば、超深海での試料採取が可能になるのだろうか。

JAMSTECが新概念として掲げているのが、ランダーとビーグルを組み合わせたシステムである。ランダーとは、海面から自由落下して着底し、調査が終わったら重りを

切り離して浮上してくる観測装置のことをいう。着底した場所から動くことはできないが、着底点での採泥や撮影、環境計測などが可能だ。母船とケーブルでつながっておらず、推進機もないシンプルな構造のランダーは、扱いやすいこともあり、超深海の調査によく使われている。これに目を付けた。

ビーグルは、小型のホバリングができる自律型のものを想定している。このビーグルをランダーのペイロードとして搭載し、ランダー着底後にビーグルが離脱し、半径100mほどの範囲を水平移動して目的試料の探索・採取を行う。大電力を用いた重作業は難しいが、光学マッピングや底生生物、小さな岩石などの採取を目指す。

ランダーとビーグルを組み合わせるというのも新しいが、このシステムの最大の特長はランダーと母船間で高速音響通信を行う点だ。これは、前ページで紹介した海底設置型観測システム「FFC11K」を用いた音響通信の試験がヒントになって生まれた。試験では、水深9,230mの海底で「FFC11K」のカメラが撮影した画像を2.5秒間隔で母船に送信することに成功。この技術を使えば、ケーブルを使用しなくても超深海を調査する

のに十分な情報を船上で確認できると考えたのだ。

このシステムでは、ランダーとビーグルそれぞれの得意分野を生かし、役割を分担して調査することができる。まず、ランダー側に重いシステムやたくさんの電池を搭載することで、ビーグルは身軽になれる。移動に関して言えば、ランダーは自重および浮力を用いた鉛直往來ができて、ビーグルはスラスタを用いた水平移動ができる。ランダーは定点観測や採泥を行い、ビーグルは移動しながら光学カメラを用いた海底マッピングや、目的試料の探索および採取を行う。また超深海を移動するビーグルの位置を船から詳細に知ることは難しく、せっかく光学マッピングをしても場所を把握できない恐れがある。このシステムでは、ランダーからビーグルを測位することが可能で、ビーグルの位置が精度よく分かるという測位面でのメリットもある。

現在、このシステムを実現するため、必要となる要素技術開発を行っている。基本となるのが軽量化だ。超深海用の耐圧容器は厚く重くなっていき、それが全体の重量増につながる。そこで、高強度と軽量化を両立できるセラミック円筒型耐圧容器の開発を進めている。またビーグルによる試料採取に不可欠なマニピュレータは、従来のROVシステムでは油圧式のアクチュエーターで動かしているが、大きくて重い。今回のビーグルシステムではそこまでパワーが必要ないので、電動サーボモーターを用いることにして軽量かつ大深度で使用できるものを開発中だ。目的試料の検出は画像処理技術を使い、そのための取り組みも着々と進めている。



開発中の電動サーボモーター。フルデプス（地球最深部の水深10,920m）対応で、精密な位置・速度の制御、陸上のサーボモーターと同等の小型サイズを実現している。新概念の超深海作業型ビーグルシステムにおいて、ビーグルのマニピュレータを動かすアクチュエーターとしての利用が期待できる。



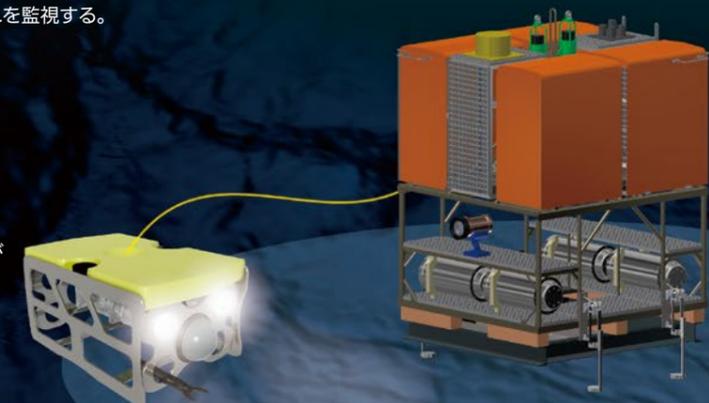
母船



新概念の超深海作業型ビーグルシステムのイメージ。ビーグルはランダーのペイロードとして搭載され、着底後にビーグルから放射し半径100mほどの範囲を水平移動して調査を行う。ランダーと母船間で高速音響通信を行い、超深海での調査状況を船上で確認できる。音響通信の遅延を考慮し、船上から全て遠隔操作するのではなく、システムを自律・自動化し、船上でそれを監視する。



高速音響通信



ランダー

- 得意なこと
- ・定点観測
 - ・生物の受動的採取
 - ・大容量電源
 - ・静穏（音響通信に良い環境）
 - ・ビーグル測位

ビーグル
(小型のホバリングができる自律型)

- 得意なこと
- ・水平移動
 - ・光学マッピング
 - ・底生生物や小型岩石の能動的採取

画像処理技術で深海生物を検出する、海底の3次元形状を復元する。

カメラでの顔認識、車の自動運転、製造現場での検品など、画像処理技術は、身近なものになっている。JAMSTECでは、そうした画像処理技術を深海調査に活用する取り組みを進めている。例を2つ紹介しよう。

1つ目は、機械学習を利用した深海生物の検出だ。深海の映像は、単調な景色が続く。視界が悪いことも多い。研究のためとはいえ、そうした映像を長時間見続けるのは大変だ。深海生物を自動で検出できたらいいのに、と思っている研究者は多いのではないだろうか。

自動検出のためには、まず目的とする生物が映っている映像をたくさん用意し、何が映っているか、例えばこれはエビ、これはカニという情報を付けていく。それをコンピュータに学習させることで、指定した映像に映っている生物を、これはエビ、これはカニと検出できるようになる。深海映像の場合、海域や撮影条件によって色味やゆがみなどが変わるため、さまざまな見え方を学習させることが、検出

精度の向上には重要だ。

今後、ROVが深海で撮影した映像を用いてリアルタイムに処理できるか検証することを計画している。さらに、前のページで紹介した超深海作業型ビークルシステムにおいて、ビークルが撮影した映像を搭載コンピュータでリアルタイムに処理して生物を検出し、目的の生物を採取することを目指す。それができるようになれば、観測の自動化、探査機の自律化が大きく進む。

2つ目の取り組みが、SfM(Structure from Motion)の利用である。SfMとは、被写体をさまざまな角度から撮影した複数の画像を解析して被写体の3次元形状を復元する技術で、測量や土木分野でよく使われている。この技術を使い、深海映像から海底の3次元形状の復元を目指している。

熱水チムニーの模型で試した例を紹介しよう。まず、模型をさまざまな方向から撮影する。32枚の画像をSfMで解析した結果、チムニー模型の3次元形状を復元できた。SfMは、

各画像の撮影位置も復元できる。

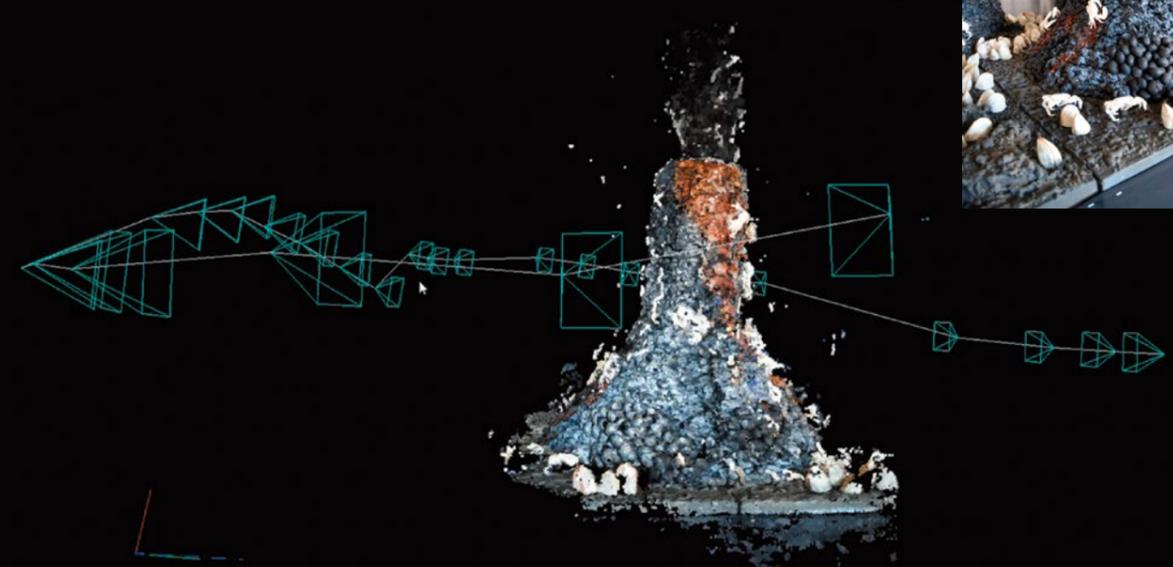
「しんかい6500」が撮影した映像からも、海底の3次元形状と撮影位置の復元に成功した。JAMSTECでは、過去の潜航で撮影した映像をたくさん保有している。それらを活用しない手はない。例えば、地震などイベントが発生する前の映像から復元した海底の3次元形状と、発生後の映像から復元した海底の3次元形状を比較することで、映像では分からなかった発見があるかもしれない。ただし、海域によって濁りや海底の状態が異なるので、対象とする海域に合わせた処理やチューニングが必要になる。これにもJAMSTECが保有しているさまざまな海域で撮影した映像が役立つ。

海底の3次元形状復元の機能も、探査機に搭載することを計画している。撮影位置、つまり探査機の位置も復元できることから、自分が走ってきた経路が分かる。探査機には慣性航法装置や速度検出器が搭載されていて、加速度や速度の情報から現在の自分の位置を推定している。しか

し、移動時間が長くなるにつれて誤差が大きくなっていく。SfMによって復元された探査機の位置も使うことで、その誤差を小さくできる可能性がある。これもまた、観測の自動化、探査機の自律化に大きく貢献する。

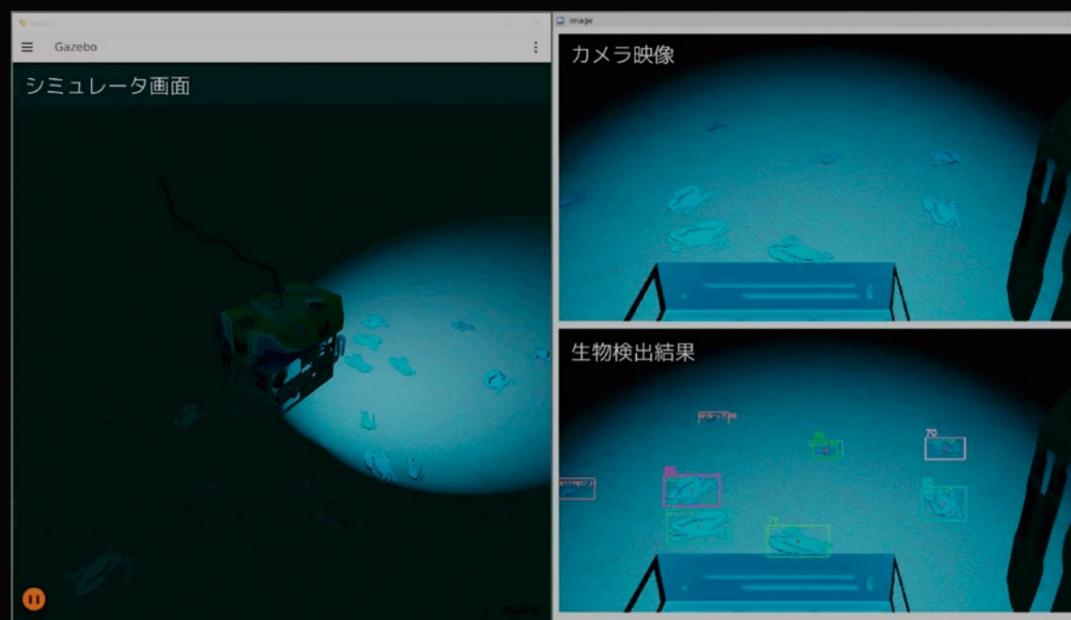


チムニーの模型(右)とSfMによって32枚の画像から復元されたチムニー模型の3次元形状(下)。周囲の四角錐は、各写真が撮影された推定位置と画角を示す。



「しんかい6500」によって撮影された映像からSfMによって復元された海底の3次元形状。周囲の四角錐は、「しんかい6500」のカメラの推定位置と画角を示す。

機械学習による深海生物の検出の例。「かいこうMk-IV」のカメラ映像(実際の映像ではなくシミュレーションによるもの)から生物を検出することができた。画面手前に映り込んでいるのは「かいこうMk-IV」のサンプルバスケットとマニピュレーターである。



船や人に頼らない自動観測の世界を開く

海洋観測の自動化——。これは探査機の大深度化と並んでJAMSTECが掲げている大きな目標の1つである。

海洋観測の自動化の鍵を握るのが、自律型無人探査機（AUV）の運用方法である。「自律型」と付いているが、その運用方法は、自律という利点を活かし切れているとは言い難い。まず、AUVは船に乗せられ港から調査海域まで連れてきてもらう。海中に投入されたAUVはあらかじめプログラムされたルートに従って自律航行で調査するのだが、数秒に1回、AUVの状態などに関するさまざまな情報を音響通信で船に送るように設定されている。

この船との音響通信が一定時間途切れていると、AUVは機体内部で音響通信装置に異常があると判断し、調査を終了して浮上する。異常と判断するまでの時間はあらかじめ設定されているが、AUVと船の位置関係によっては規定時間を超えて通信が途切れてしまうこともある。音響通信は船とAUV間の情報のやりとりをつかさどる部分であり、AUVの航行自体には影響を与えていないが、何かあったときにすぐさま船からAUVに指示を出すことができるように安全を考慮した設計思想となっている。

調査を終了すると、AUVは船上に揚収されて帰港する。

このようにAUVの運用は、船に依

存し、多くの人の手がかかっている。

また、船の調査航海の予定は1年以上前に決まり、枠は埋まってしまう。だからAUVで調査をしたくても、1年、2年と待たなければいけない。これではAUVの運用頻度が増えない。

理想は、船や人に頼ることなく運用することだ。つまり、AUVは岸壁から調査海域に向かい、調査をして、岸壁に戻ってくる。そうなれば、海洋観測のやり方が変わり、自動化が進む。

例えば、海底地震観測。海底地震計は、重りを付けて船から自由落下させて海底に設置して観測を行う。観測が終わると、船から信号を送って重りを切り離し浮上させて回収し、代わ

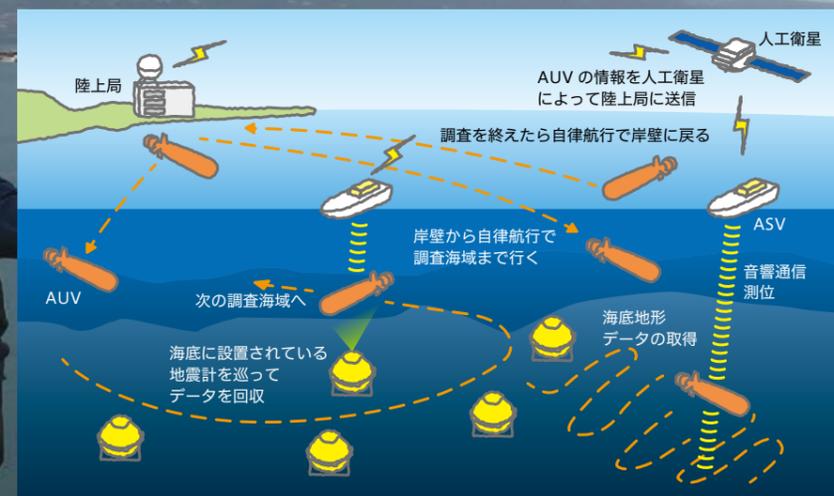
りの海底地震計を設置する。海底地震計の設置・回収は、船と人手を必要とする大変な作業だ。また、観測データは装置を回収しなければ取得できない。自由落下で設置するやり方では同じ場所に設置できず、観測の連続性が途切れてしまうという問題もある。そこで、海底に設置されている地震計にAUVが近づき、観測データを回収することができれば、海底地震計の設置・回収の作業が減り、観測の連続性も維持できる。地震が発

生したら、すぐにAUVが向かい観測データを回収してくることも可能だ。

AUVが岸壁を出発し、海底に設置されている観測装置を次々に巡って

観測データを回収し、岸壁に戻る。こうした海洋観測の自動化の実現を目指し、さまざまな技術の開発が進められている。

海洋観測の自動化のイメージ図



JAMSTECなど国内8機関で結成された「Team KUROSHIO」が参加した、海底探査の国際コンペティション「Shell Ocean Discovery XPRIZE」（2018年）では、AUVは洋上中継機（ASV）にえい航されて岸壁から調査海域に向かい（写真）、調査を終えると一緒に戻ってきた。人が乗った船がまったく関わらずに実海域で大規模な海底調査を行った例はこれまでなかったが、「Team KUROSHIO」はそれを成功させた。ASVは、海中のAUVを音響測位し、AUVから音響通信で届けられた情報と合わせて衛星通信によってオペレーションを行う陸上へ送信する無人の船舶型ロボット。陸上にいるオペレーターと海中を航行するAUVの間を中継していたため、洋上中継機と呼ばれる。

水中光無線通信によって観測データを自動で“収穫”する

AUVで海底の観測装置からどのようにデータを回収するか——。水中の無線通信は音波が主流だが、可視光という選択肢もある。音波には及ばないが、可視光の青色～緑色も水中で100m以上届く。そして、可視光は音波より速度と周波数が桁違いに高いので、短距離であれば音波よりも高速大容量の通信が可能になる。

2022年2月、「AUV-NEXT」を用いて光無線通信によって海底の観測装置からデータを回収する試験を行った。まず、海底設置型観測システム「FFC11K」を駿河湾の水深840mの深海底に設置。AUVを、「FFC11K」の上を繰り返し通過する航路で自律航行させる。両方に光無線通信装置を搭載し、AUVが「FFC11K」の上を通過するときに、「FFC11K」のカメラが撮影した画像データの自動回収を試みた。

その結果、画像データの回収に2回成功した。1回目は10秒間で3枚の画像データを、2回目は12秒間で1枚の画像データを回収することがで

きた。AUVが水中光無線通信によって観測装置からデータを自動回収したのは、世界で初めてである。相模湾の水深1,420mで行った試験でも、水中光無線通信による画像データの自動回収に成功している。

水中におけるデータの自動回収には、さまざまな難しさがある。AUVは、秒速約1m、徒歩より少し遅いくらいの速度で、「FFC11K」の30mほど上方を通過する。そのわずかな時間で、通信を確立させなければならない。そのため光無線通信装置には、素早く応答して効率よく通信できるように、光学フィルターを用いるなど技術的な工夫が加えられている。

また、AUVが「FFC11K」の真上ではなく、ずれたところを通過することもある。光のビーム幅は狭い方が、通信速度が上がり、また通信距離も長くなる。しかし、あえてビーム幅を広くした。そうすることで、AUVの通過位置が多少ずれてもデータを回収できるようになる。

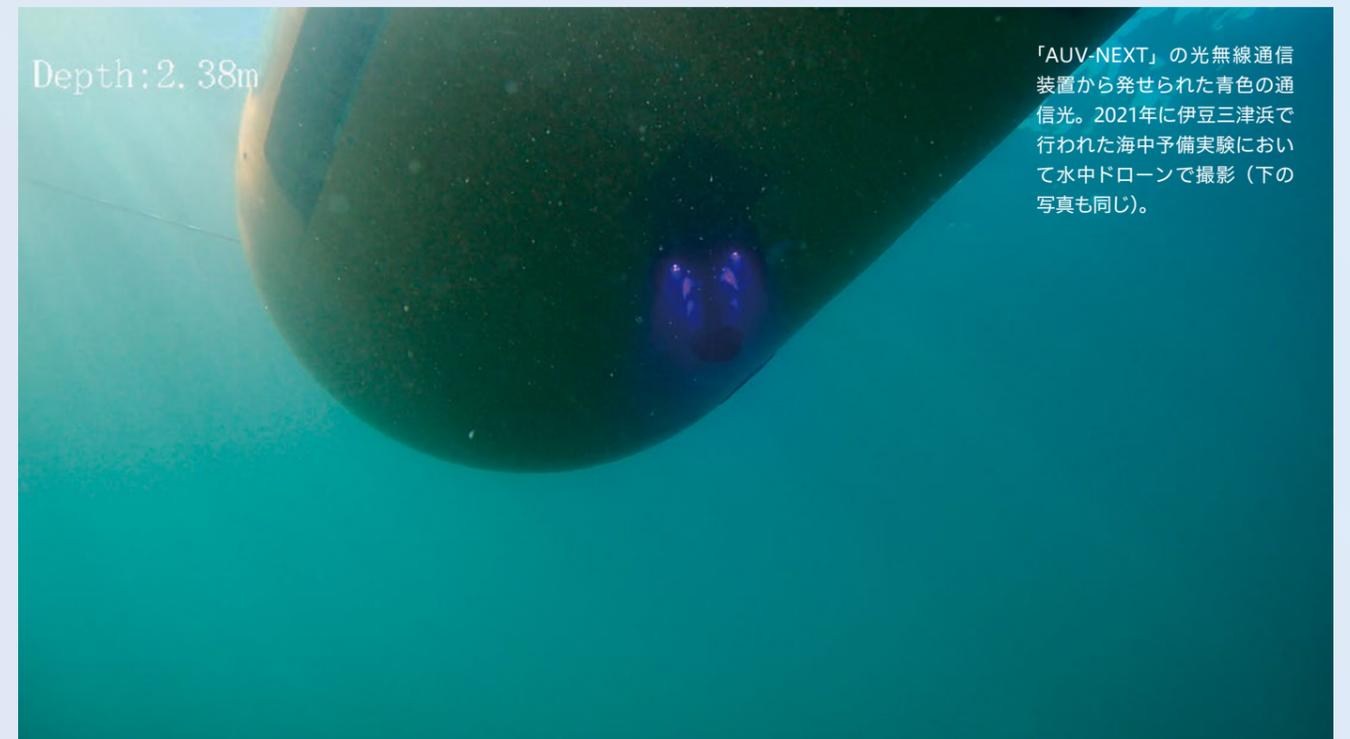
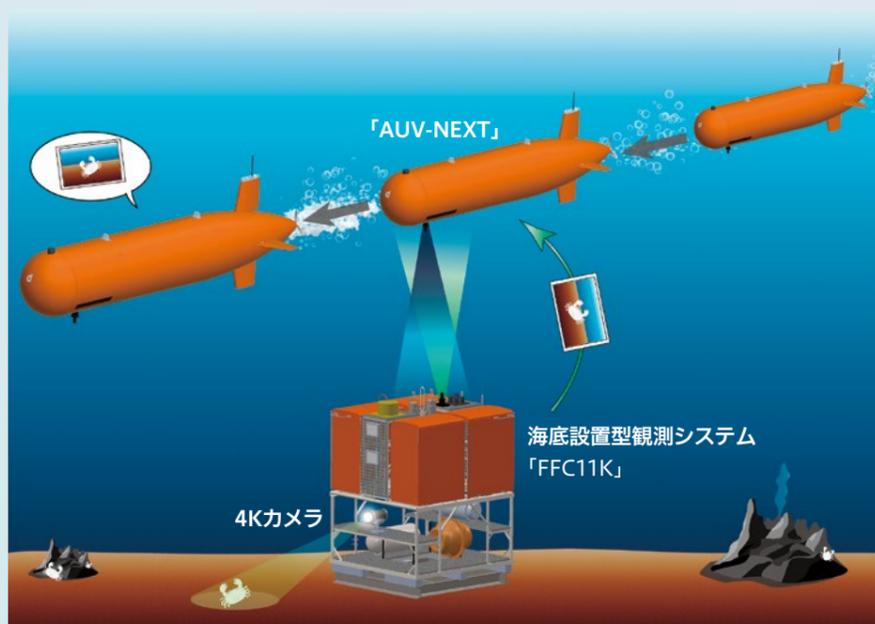
観測データの回収は「ハーベス

ティング」とも呼ばれる。穀物や果物などの収穫という意味で、太陽光エネルギーを太陽電池で回収することをハーベスティングと呼んだことに倣ったものだ。

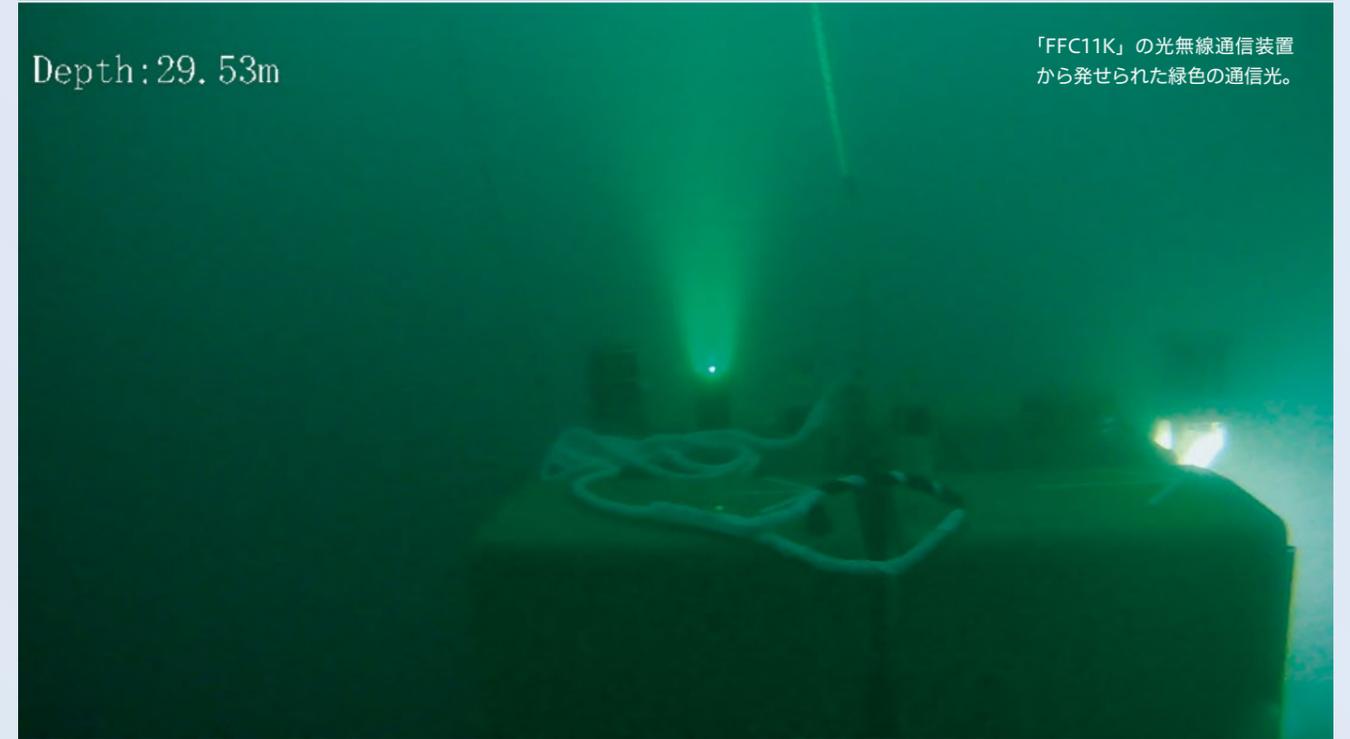
青色LEDが普及して小型・高出力で、応答が速い光源ができたことで、水中光無線通信は急激に発達し、現在は複数のメーカーから水中光無線通信装置が販売されている。しかし、それをどう用途で使えばいいのか、誰もがまだ模索中のように見える。ハーベスティングは、水中光無線通信の新しい、そして実用的な使い方と言えるだろう。

次なる目標は、AUVを用いて水中光無線通信によって海底地震計のデータ回収を行い、地震研究に役立てることである。さらには、海底に設置されているたくさんの観測装置を次々と巡り、水中光無線通信によってデータを回収していくことを目指す。海洋観測の自動化に向けた大きな前進である。

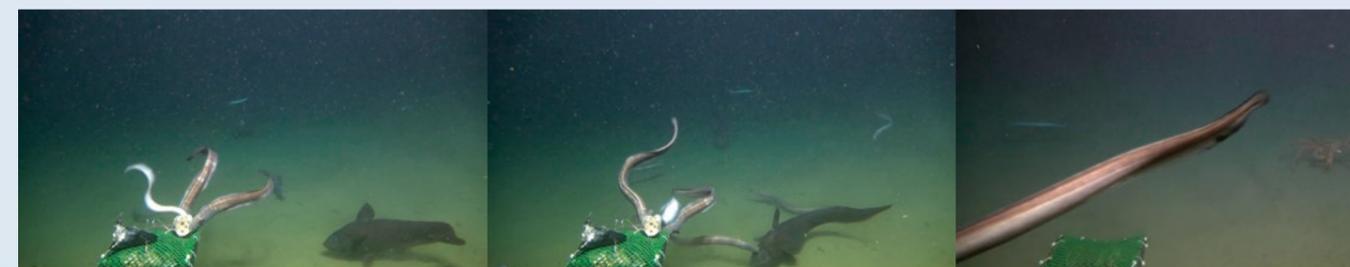
画像データの回収。「FFC11K」のカメラで撮影した画像データを、「AUV-NEXT」が「FFC11K」の上方を通過するとき、水中光無線通信で回収する。波長多重といって2つの異なる波長の光を通信に使い、「FFC11K」は緑色の通信光、AUVは青色の通信光を発する。また、「FFC11K」は青色光だけを通すフィルターを、AUVは緑色光だけを通すフィルターを付ける。これによって待ち時間のない双方向通信が可能となり、AUVが「FFC11K」の上を通過するわずかな時間で通信を確立し、データを回収することができる。なお「FFC11K」は、海底の様子を連続して撮影しており、撮影データに画像処理を施すことで生物などが写っている特徴的な画像を抽出してAUVに送信している。



「AUV-NEXT」の光無線通信装置から発せられた青色の通信光。2021年に伊豆三津浜で行われた海中予備実験において水中ドローンで撮影（下の写真も同じ）。



「FFC11K」の光無線通信装置から発せられた緑色の通信光。



「FFC11K」搭載の4Kカメラで撮影し、「AUV-NEXT」が水中光無線通信によって回収した深海画像の例。

深海資源の調査効率を飛躍的に向上させる

2022年9月、駿河湾。4機のAUVが、次々と海に投入され潜航していく――。内閣府が進める戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期の課題「革新的深海資源調査技術」が実施する試験だ。日本周辺の深海底には、熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、レアース泥、マンガング塊などが存在しており、レアメタルの供給源として注目されている。レアメタルは電子機器や次世代自動

車に不可欠で需要が拡大しているが、日本の場合全て輸入、しかも特定の国に依存している。国家安全保障の観点からも自国の排他的経済水域（EEZ）から供給できた方がよい。そうした背景から、深海資源の調査効率を飛躍的に向上させることを目指し、技術開発を行っているのだ。

広範囲の海底を調査するには、複数のAUVが隊列を組んで動いた方が効率的だ。そこで、隊列を制御す

る技術の開発を進めてきた。冒頭は、異機種AUV 4機隊列制御試験の様子である。4機のAUVは、メーカーも性能も異なる。同一機種の方が制御しやすいが、同じAUVを複数用意できることはまれなので、現実的な設定で試験を行った。

複数機が隊列を組んで調査するときに問題になるのが、通信と測位である。洋上中継機（ASV）が、各AUVの位置や速度を把握し、隊列か

ら外れたり海底地形を調べるセンサーが音響干渉を起こしたりしないように、位置の補正や速度を指示する。しかし、1機ずつ順番に測位と通信をしていたのでは、4機目を終えたときには1機目の状況が変わってしまっている。そこで、ASVと各AUVには、9ページで紹介した高頻度で通信と測位ができる音響通信測位統合装置が搭載されている。AUVごとに使用する信号の周波数を変えるこ

とでASVから4機同時に高頻度な通信と測位が可能になり、高精度な隊列制御を実現できる。これをマルチユーザー音響通信測位と呼んでいる。

2022年9月の試験では、水深1,400mの海域において隊列を組んで航行し、高精度の海底地形データを取得することに成功。さらに、シミュレーションによって、異機種AUV 10機の隊列制御が可能であることを確認している。

複数のAUVで効率よく海底地形を調査できる技術を確認できたが、複数機ならではの課題もある。AUV

の投入と揚収の作業は、特殊な機材と人手と時間が必要で、危険も伴う。その回数が増えてしまうのだ。また、調査海域の水深が深いほど、潜航と浮上に時間がかかる。そのため、一度潜航したら長時間にわたって調査を続けた方が効率が良い。しかし、AUVのバッテリー容量には限界がある。そうした問題を解決するため、深海ターミナルの開発を進めてきた。

AUVは、海底に設置した深海ターミナルに自動で接近、ドッキングして、非接触で充電する。このとき、取得したデータを深海ターミナルに伝送する。データ伝送には、16ページで紹介した水中光無線通信の技術を使っている。充電とデータ伝送を終えたAUVは、深海ターミナルから離脱し、再び調査に出発する。2020年10月に実海域でドッキングと非接触での充電・データ伝送の試験に成功している。深海ターミナルの実現によって、1回の潜航で長時間の調査が可能になる。深海ターミナルとさまざまな海中機器の組み合わせにより、広域な海洋観測やそれらの自動化にも貢献すると期待されている。

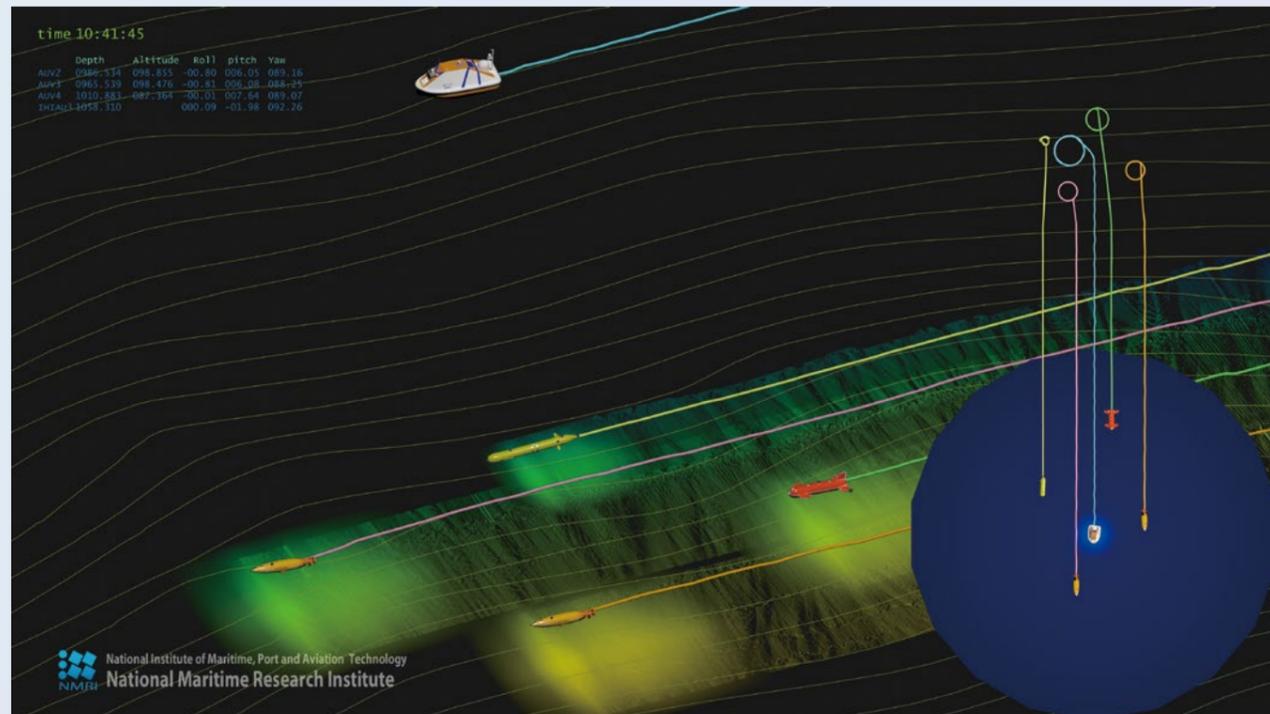
SIP第2期は2022年度で終了する。SIPでは、技術を開発して終わりではなく、社会実装することが強く求められている。深海資源調査を効率化するために開発してきた技術を、浅い海や資源調査以外の分野にも展開していこうとしている。例えば、海底パイプラインや洋上風力発電における海底・海中構造物の点検、海底ケーブルの点検、海洋環境調査、沖合養殖の給餌や水質・魚のモニタリング……。深海の調査研究のために開発され、新たな展開をもたらしてきた技術が、私たちの身近で使われる日も近い。

（文・鈴木志乃/フォトンクリエイト）



隊列制御試験を行った性能とメーカーが異なる4機のAUV。右から国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所のNMRI航行型AUV2号機、3号機、4号機、株式会社IHIのAU3。ASVには「KaiKoo（かいこう）」を使用した。

AUV 4機隊列制御試験結果のアニメーション。駿河湾水深1,400mの海域において、1機のASVを介して4機が隊列を組んで東西方向を往復し、1mメッシュ程度の分解能で極めて高精細な海底地形データを取得することに成功した。



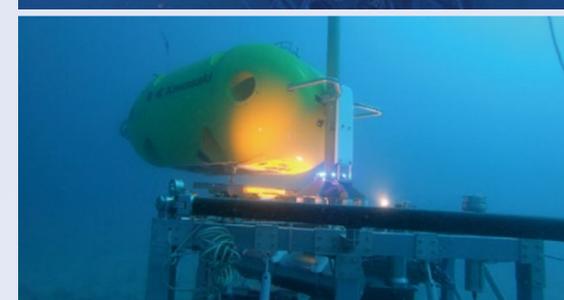
深海ターミナルドッキング試験の様子



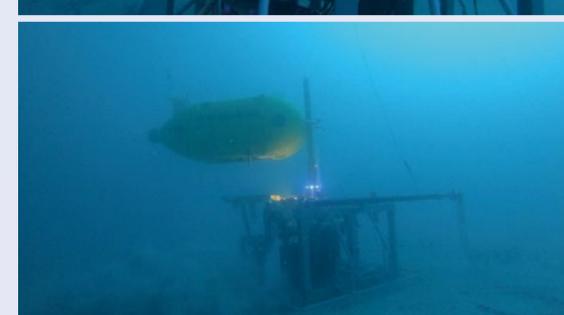
AUVが音響通信で深海ターミナルに接近。LEDライトで誘導。



深海ターミナルにドッキング

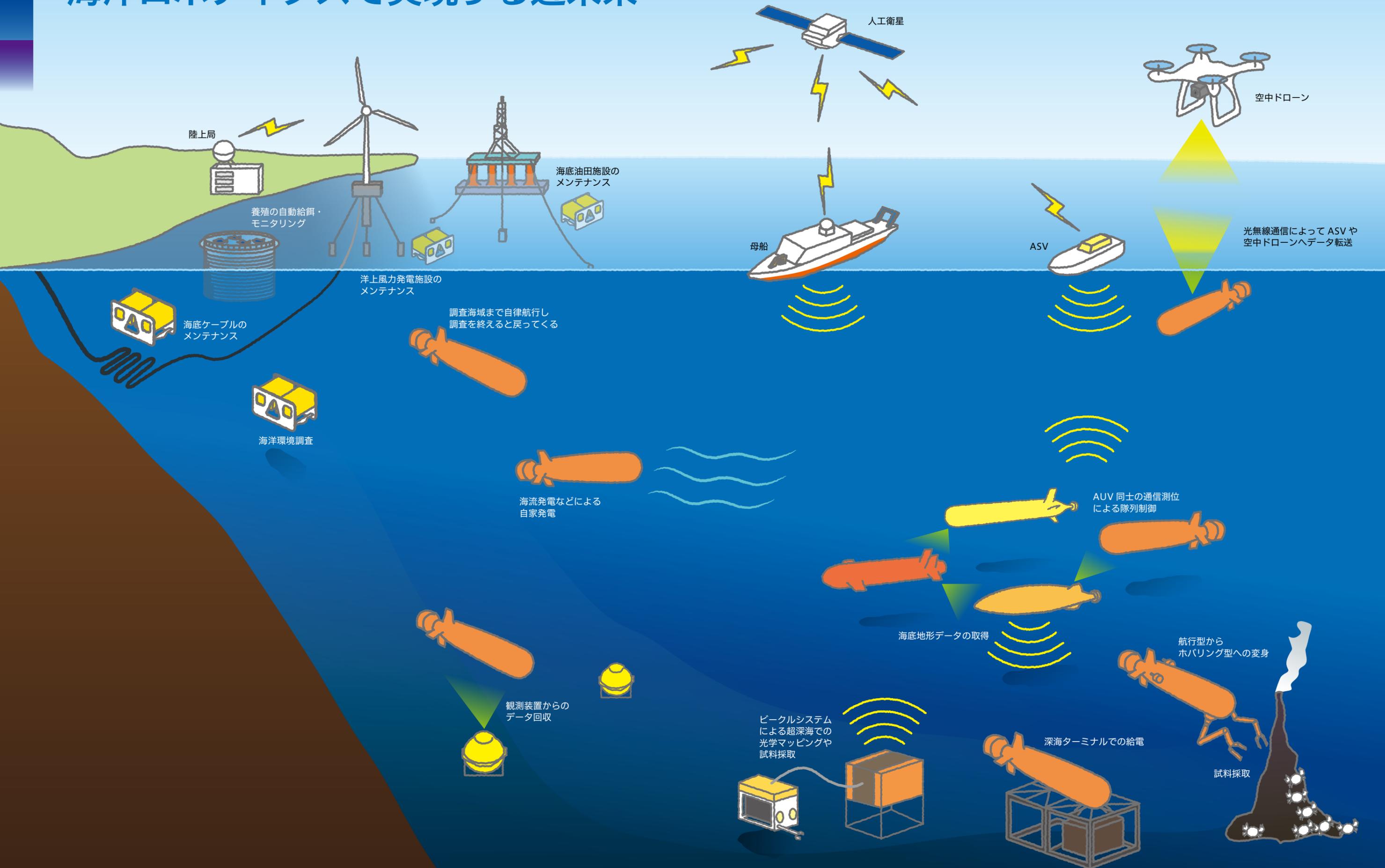


給電・データ伝送用パッドに着座。非接触で充電を行い、光無線通信によってデータをターミナルへ伝送する。



給電・データ伝送用パッドから浮上し、深海ターミナルから離脱。AUVは新たな調査海域へ。

海洋ロボティクスで実現する近未来



Pick Up
JAMSTEC

海と地球の情報サイト
JAMSTEC BASE



JAMSTEC BASEへ!

JAMSTEC BASEは、海と地球の情報サイトです。海洋・地球・生命の研究開発に関する情報をサクッと分かりやすく、時にはがっつき深く、JAMSTECならではの視点で発信しています。研究の日常で見てきた興味深い景色をピックアップする「JAMSTEC EYE」、研究者の日常とは一般の人のそれとは違うのか? 研究者の生態に迫る「LIFE×研究者」、気になる話題を専門家が解説する「研究者コラム」、興味が深まる・理解が深まる「海と地球の“深”知識」、「研究者オススメの一冊」など、連載も豊富です。イベントやセミナー、関連サイトの案内やパンフレットのダウンロードもJAMSTEC BASEへ。『Blue Earth』のバックナンバーもご覧いただけます。



JAMSTEC BASE▶
<https://www.jamstec.go.jp/j/pr/>

賛助会 (寄付) 会員名簿 2023年2月28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IH
- 株式会社IH原動機
- 株式会社アイケイエス
- 株式会社アクト
- 朝日航洋株式会社
- アジア海洋株式会社
- 株式会社天野回漕
- 株式会社アルファ水工コンサルタンツ
- 株式会社安藤・間
- いであ株式会社
- 株式会社伊藤高圧瓦斯容器製造所
- 伊藤忠テクノソリューションズ
- 株式会社
- 一般社団法人インダストリスパコン
- 推進センター
- 株式会社INPEX
- 潮冷熱株式会社
- 株式会社宇津木計器
- 海のみらい静岡友の会
- 株式会社エス・イー・イー
- 株式会社エスイーシー
- 株式会社SGKシステム技研
- 株式会社エヌエルシー
- 株式会社NTTデータCCS
- 株式会社エノ島マリンコーポレーション
- MOLマリン&エンジニアリング
- 株式会社
- 株式会社MTS雪氷研究所
- 株式会社OCC
- 岡本硝子株式会社
- 株式会社OKIコムエコーズ
- 沖電気工業株式会社
- 海洋エンジニアリング株式会社
- 海洋開発株式会社

- 海洋電子株式会社
- 株式会社化学分析コンサルタント
- 鹿島建設株式会社
- 株式会社カネカ
- 川崎近海汽船株式会社
- 川崎重工株式会社
- 川崎地質株式会社
- 株式会社KANSOテクノス
- 株式会社キュービック・アイ
- 京セラ株式会社
- 共立インシュアランス・ブローカーズ
- 株式会社
- 共立管財株式会社
- 極東貿易株式会社
- 株式会社きんでん
- 株式会社熊合組
- クローバテック株式会社
- 株式会社グローバルオーシャン
- ディベロップメント
- 株式会社KSP
- KDDI株式会社
- 京浜急行電鉄株式会社
- 興研株式会社
- 株式会社構造計画研究所
- 神戸ペイント株式会社
- 広和株式会社
- 株式会社COAST
- 国際ビルサービス株式会社
- コスモ商事株式会社
- 株式会社コノエ
- 五洋建設株式会社
- 株式会社コンボン研究所
- 相模運輸倉庫株式会社
- 佐世保重工業株式会社

- 三洋テクノマリン株式会社
- 三和化成工業株式会社
- 株式会社ジエス・ユアサテクノロジ
- 株式会社JSP
- JX石油開発株式会社
- JFEアドバンテック株式会社
- 株式会社JVCケンウッド
- 静岡市
- シチズン時計株式会社
- 株式会社SIX VOICE
- シナネ株式会社
- 清水建設株式会社
- 清水港振興株式会社
- シモダフレンジ株式会社
- ジャパンマリンユナイテッド株式会社
- シュルパルジェ株式会社
- 株式会社昌新
- 株式会社商船三井
- 鈴与株式会社
- セイコーウォッチ株式会社
- 株式会社清友農材センター
- 株式会社関ケ原製作所
- 石油開発サービス株式会社
- 石油資源開発株式会社
- セナードバーンズ株式会社
- 株式会社ソルトン
- 損害保険ジャパン株式会社
- 国際ビルサービス株式会社
- 大成建設株式会社
- ダイハツディーゼル株式会社
- 太陽日酸株式会社
- 有限会社田浦中央食品
- 株式会社地球科学総合研究所
- 中国塗料株式会社

- 中部電力株式会社
- 株式会社鶴見精機
- 株式会社帝國機械製作所
- 株式会社テザック
- 寺崎電気産業株式会社
- 株式会社寺本鉄工所
- 東亜建設工業株式会社
- 東海交通株式会社
- 洞海マリンシステムズ株式会社
- 東京海上日動火災保険株式会社
- 東京製綱繊維ロープ株式会社
- 株式会社東チタニウム
- 東北環境科学サービス株式会社
- 東洋建設株式会社
- 株式会社東陽テクノカ
- 株式会社東和製作所
- トーホーテック株式会社
- 株式会社NAT
- 西芝電機株式会社
- 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
- 株式会社ニッスイ
- ニッスイマリン工業株式会社
- 日鉄エンジニアリング株式会社
- 日東電工株式会社
- 株式会社日放電子
- 株式会社日本インテリジェントビジネス
- 日本エヌ・ユー・エス株式会社
- 日本海工株式会社
- 日本海洋株式会社
- 株式会社日本海洋科学
- 日本海洋事業株式会社
- 一般社団法人日本ガス協会
- 日本軽金属株式会社
- 日本サルヴェージ株式会社
- 日本電気株式会社
- 日本ペイントマリン株式会社
- 日本マントル・クレスト株式会社
- 日本無線株式会社

- 日本郵船株式会社
- 野村建設株式会社
- 株式会社ハイドロシステム開発
- 濱中製鎖工業株式会社
- 東日本タグポート株式会社
- 東立造船株式会社
- 株式会社風力エネルギー研究所
- 深田サルベージ建設株式会社
- 株式会社フログジャパン
- 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
- 株式会社FullDepth
- 古野電気株式会社
- 松本徽章株式会社
- マリメックス・ジャパン株式会社
- 株式会社マリン・ワーク・ジャパン
- 株式会社マルト
- 三鈴マシナリー株式会社
- 株式会社三井E&Sマシナリー
- 三井住友海上火災保険株式会社
- 三菱重工業株式会社
- 三菱重工マリタイムシステムズ
- 株式会社
- 三菱造船株式会社
- 三菱電機株式会社
- 三菱電機ソフトウェア株式会社
- 三菱電機特機システム株式会社
- 株式会社森京介建築事務所
- ヤンマーパワーテクノロジー株式会社
- 株式会社ユー・エス・イー
- 郵船商事株式会社
- 機河電機株式会社
- 株式会社落雷抑制システムズ
- 株式会社ラジアン
- 若築建設株式会社