

# 無人海底探査システムの開発と運用

三井 E&S 造船 設計本部 艦船・特機設計部 各務 均

## Development and Operation of Unmanned System for Seafloor Survey

Hitoshi KAKAMI

### 1. はじめに

三井 E&S 造船は、国内研究機関や民間企業で構成される「Team KUROSHIO<sup>①</sup>」の一員として、海底探査技術を競う国際コンペティション「Shell Ocean Discovery XPRIZE<sup>②</sup>」(以降、本コンペティション)に参画し、準優勝を獲得した。本コンペティションは、超広域・超高速海底マッピングの実現を目標とするもので、決められた制限時間の中で海中ロボット等により取得した海底地形データの面積や正確性を競うものであった。

本報では、本コンペティションへの挑戦を通して開発した無人海底探査システム全体を概説するとともに当社が担当した部分について解説する。

### 2. 現状の海底探査

海底地形データは、水深が比較的浅いところでは海上交通を支える重要な基礎データである。また、水深が深いところでは海底ケーブル・パイプラインの敷設や油田開発における事前情報として利用されているほか、防衛分野においても非常に利用価値の高いものとなっている。従来、海底地形データは、調査船が時間をかけて測量を行うことで得られるものであったが、水上船舶からの音響測深による特性上、特に大水深においては詳細な地形データを得ることは困難であった。

そこで近年では、海底により接近して調査ができる自律航行型の海中ロボット (Autonomous Underwater Vehicle : AUV) の利用が注目されており、当社でもこれまで様々な AUV の開発・製造・運用支援を行ってきた<sup>③</sup>。

しかしながら、AUV を運用するためには、調査海域まで AUV を運搬し、展開・回収することや、AUV が海中を航行している間、監視を行うために運用者や研究者が母船に乗り込む必要があるといった制約が課題となっていた。

このような背景から、海中ロボットによる海底探査をより効率化し、広域な調査を短時間で進行する技術開発を促進する目的で開発されたのが本コンペティションである。

### 3. 課題解決に向けた取り組み

Team KUROSHIO で開発した無人海底探査システムの概要を図 1 に示す<sup>④</sup>。本システムは、従来、有人母船が担ってきた AUV の運搬と展開・回収及び監視を無人の洋上中継器 (Autonomous Surface Vehicle : ASV) が担当することで海底探査を実現するものである。以下に示す手順で本システムを運用することで、オペレータ自身は調査海域に行くことなく、海底地形データの取得が可能となる。

まず、ASV と AUV が結合した状態で岸壁を出港し、無人航

行により調査海域に進出する。調査海域到着後、予定ポイントで AUV を展開し、AUV は潜航して海底に接近しながら地形データの取得を行う。AUV が航行中、ASV は AUV を追跡しながら海上で AUV を監視し、その様子を陸上管制局に伝送する。陸上管制局にいるオペレータは衛星通信を介して ASV と通信し、更に ASV が装備する水中音響通信により AUV と通信することで、陸上に居ながらにして ASV と AUV の管制が可能となる。地形データ取得後、AUV は海面まで浮上し、ASV は再び AUV を結合して無人航行で岸壁に帰還する。

本システムの実現に向けて、Team KUROSHIO のチームメンバーがそれぞれ担当部分の課題解決に取り組んだ。課題の一つは、ASV と AUV を組合せた運用を行うことである。そのためには ASV によって AUV の展開回収を行う技術が必要となる。当社は AUV だけでなく ASV についても開発・運用実績があり<sup>⑤</sup>、現在も社内で研究開発を進めていることから、その技術を活用して ASV と AUV 展開回収装置の開発を担当した。

### 4. ASV の概要

ASV は洋上中継器とも呼ばれるとおり、陸上管制局と通信し、また、AUV と通信することで、本システム全体の中継器としての役割を持つ。写真 1 と表 1 に ASV の外観と主要目を示す。また、図 2 に ASV の主要装備品を示す。

本 ASV は当社が所有するもので、無人操船技術を評価・検証するために開発された機体がベースとなっている。複合艇 (RHIB) の船体に様々な機器・機能が搭載されており、主な特長は下記のとおりである。

- ①無人運用のための豊富な操船機能
- ②柔軟性・拡張性の高いプラットフォーム
- ③コンテナ輸送できるコンパクトな船体

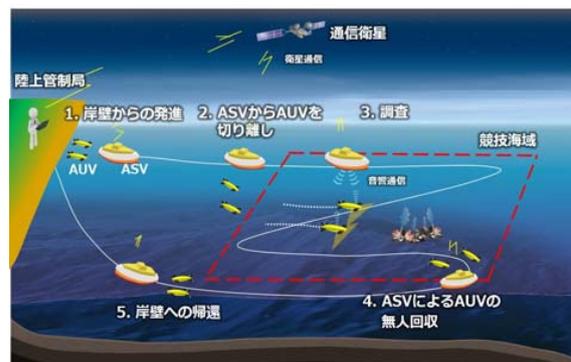


図1 無人海底探査システムの概要



写真1 ASV (外観)

表1 ASV (主要目)

船体	RHIB (複合艇)
主寸法	5.3m×2.2m×2.9m
重量	1 800kg (満載時)
最大速度	20kt
連続航行時間	24h 以上
推進器	船外機 (90 馬力)
燃料	ガソリン
操船機能	遠隔操縦機能 自律航行機能 直接操船機能

4.1 無人運用のための豊富な操船機能

本 ASV は人が乗って直接操船ができるほか、遠隔操縦機能と自律航行機能が搭載されている。

遠隔操縦機能には直接舵角を指示する方法のほか、方位を指示することで自動的に保針制御を行う機能や、緯度経度によって指定したポイントに向かわせる機能がある。使用する無線帯域によって通信遅延が発生する環境では、オペレータによる指示は、ASV に遅れて伝わることになり、また、ASV からのフィードバックも遅れてオペレータに伝わることになるため、遠隔操作で舵を切って操船することは困難を極める。そのためオペレータが方位や位置といった目標情報を与えるだけで、ASV が自動的に航行を制御する操縦方法が効果的に活用できる。

また、自律航行機能には事前に設定したルートに沿って航行するプログラム航行機能や、一定のエリア内に位置をキープしようとする簡易的な位置保持機能を備えている。AUV の調査ルートに沿って航行させる場合や、狭い港湾での入出港において活用できる機能である。

4.2 柔軟性・拡張性の高いプラットフォーム

本 ASV はセンサやバッテリー等の搭載機器をミッションに応じて適宜交換して運用できるように設計されている。艇体内部に搭載されたバッテリーシステムは、運用時間に応じて搭載する容量を変更することができ、容量が少なくてよい場合は、空きスペースを他の搭載機器に充当するといったことも可能である。今回のプロジェクトにおいてもチームメンバーが開発した様々な機器を搭載して運用した。

4.3 コンテナ輸送できるコンパクトな船体

本 ASV は、本コンペティションにおいて設定された 40ft コンテナに格納できることという条件を満たすコンパクトな機体である。船体後部のマストは折りたたみ式となっており、また、船首部に装備する音響測位/通信装置は組み立て式となっている。

5. AUV 無人展開回収装置<sup>6)</sup>

有人母船に代わって ASV により AUV を管制する手法は、これまでにも開発事例があるが<sup>7)</sup>、Team KUROSHIO の提案するシステムが従来と最も異なる点は AUV の展開回収までも無人で行うところである。この装置の開発に当たっては下記に示す課題を考慮した。

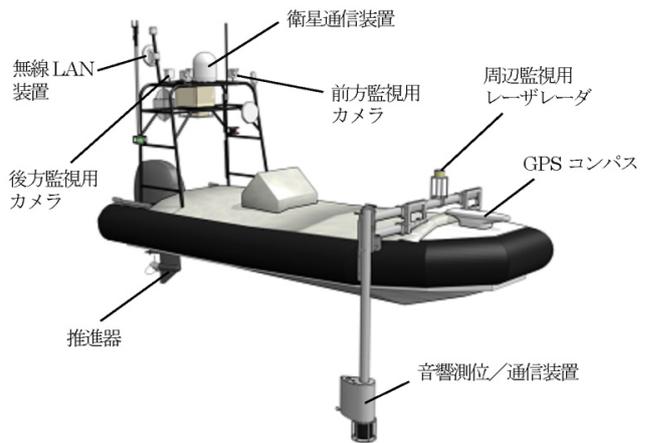


図2 ASV (主要装備品)

- ① 仕様の異なる AUV に対応できる装置であること
- ② 取扱いしやすいコンパクトな装置であること

第 1 の課題はチームメンバーの各機関が所有する AUV に対応するためであり、AUV に改造を伴わずに、ASV と結合できる装置を開発することで解決した。これにより様々な AUV の運用ができるようになり、既存の他の AUV にも適用が可能である。第 2 の課題は、本コンペティションのルールで設けられた機材の持ち込みサイズ制限を考慮したものであり、組立て分解できる装置とすることで解決した。人力で運搬できるサイズに分解するため、運用上の取り扱いもしやすくなっている。また、展開と回収はそれぞれ個別装置として開発し、単独又は同時に使用することができる。

5.1 AUV 無人展開装置

開発した AUV 無人展開装置を図 3 に示す。本装置は、AUV 上部の吊環を切離し装置で把持しながら曳航する方式となっている。遠隔指令信号によって切離し装置の爪を開くことで AUV を切離すことができる。AUV に従来装備されている吊環を利用することで、AUV 側に改造は必要なく、また、写真 2 のように本装置を複数台つなぐことによって、大きさの異なる様々な AUV を同時に曳航して展開することが可能である。また、本装置に AUV を結合した状態では、AUV の垂直尾翼に装備した通信装置が海面に出る位置関係となり、曳航中でも ASV を中継して AUV と通信ができる利点がある。

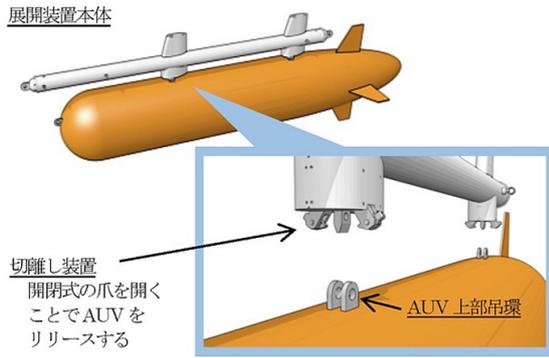


図3 AUV 無人展開装置

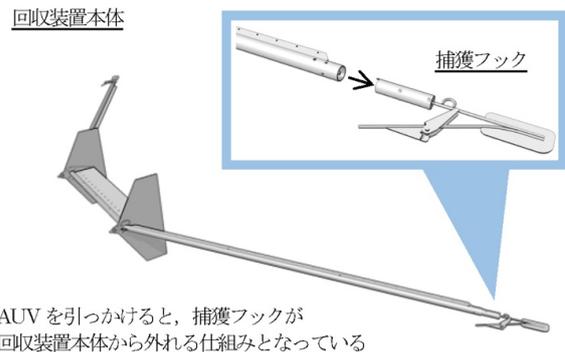


図4 AUV 無人回収装置



写真2 AUV2機の曳航（試験時）

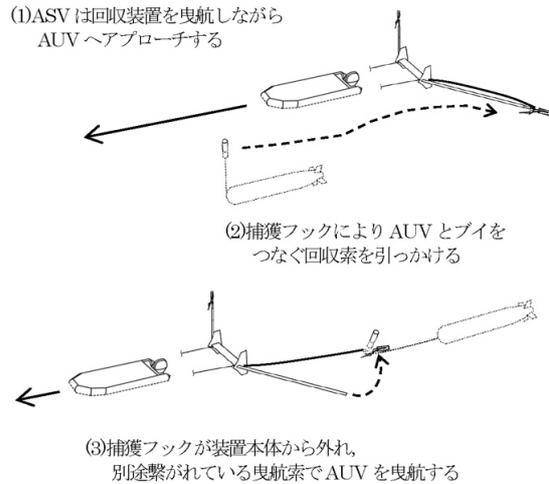


図5 AUV 回収の仕組み

## 5.2 AUV 無人回収装置

開発した AUV 無人回収装置を図 4 に示す。展開装置と同様に回収装置も ASV により曳航する方式となっており、先端に捕獲フックが装備されている。AUV が海面付近まで浮上し、ブイや重りを射出した後、ブイや重りと AUV をつなぐ回収索をこのフックで引っかけることで AUV を回収する。AUV を引っかけると、捕獲フックは装置本体から外れて、別途繋がれている曳航索によって AUV を曳航する仕組みである（図 5 及び写真 3）。本装置では、左右 2 か所にフックがあり、2 機の AUV を回収できる。曳航索の長さを左右で調整し、AUV を直列に曳航することで 2 機を衝突させることなく帰還できる。



写真3 AUV 回収の様子（試験時）

## 6. 本コンペティションでの運用事例

最後に、無人海底探査システムを実際に運用した結果を示す。特に当社が担当した ASV の運用結果を中心に報告する。

### 6.1 システム構成

本コンペティションの最終ラウンド（決勝）はギリシャ共和国のカラマタ沖で開催された。Team KUROSHIO は運用深度 4,000m 級 AUV として海洋研究開発機構が開発した AUV-NEXT と、東京大学生産技術研究所が開発した AE-Z 及び当社の ASV の構成で競技に臨んだ（図 6）。

### Team KUROSHIO のAUV/ASV (Round2)



水深4,000m対応  
高速かつ長距離航行可能な AUV 2機  
+  
ASV 洋上中継機1機  
合計3機体制での挑戦

図6 最終ラウンドでの構成

6.2 最終ラウンドでの運用結果

図7に競技におけるASVの航跡を示す。また、図8に示す帯状に色がついている部分がAUV-NEXTが取得した海底地形図である。当初の計画では、AUV2機体制で臨む予定であったが、AE-Zに機器トラブルがあり、本番はAUV-NEXT及びASVの体制で実施した。

陸上管制局では、ASVに搭載されたカメラ・レーダ映像により周辺監視を行い、また、電子海図上で位置を確認しながらASVを運用した。

予定ポイントにおいてAUVの展開に成功した後は、海中を航行するAUVと協調行動を取りながら、陸上管制局とAUVの間で通信中継を行った。図7に示す航跡及び図8に示すAUVが取得した海底地形図の範囲を比較すると分かるように、ASVとAUVはほぼ同じ経路を航行しており、これは競技中、ASVが音響測位装置によって、海中を航行するAUVの位置を監視しながら並走しているためである。調査した海域が大きく北側のエリアと南側のエリアに分かれているのは、競技中の海象の影響で調査海域を変更したことによるものである。これは、航行中のAUVと陸上管制局の間をASVが常に通信中継を行うことで、運用中であっても調査ルートを実タイムに変更できるシステムとなっていることで対応できたものである。

なお、調査本番では、AUVを安全に回収し、調査データを確実に取得するため、無人回収にはトライせず岸壁付近までAUVを自走させ、ASVは単独で帰港するという戦略をとった。

競技中、ASVと陸上管制局は衛星通信によって通信を行っており、通信遅延もある中で前述した二つの操船機能を適宜切り替えることによって運用を行った。図9にAUVを曳航して出港する際の事前設定ルートとASVの航跡を示す。図中には参考と

してチームの拠点であるカラマタの岸壁及び防波堤の位置関係も示している。ASVは港を出るまでルートに沿って航行しており、狭い港湾の中でも安全に航行できていることが分かる。港を出た後は、他船がいた場合に回避行動がとれるように遠隔操縦によってAUVを展開する予定ポイントに向けて航行した。写真4が調査海域に向けて航行中のASVの様子である。

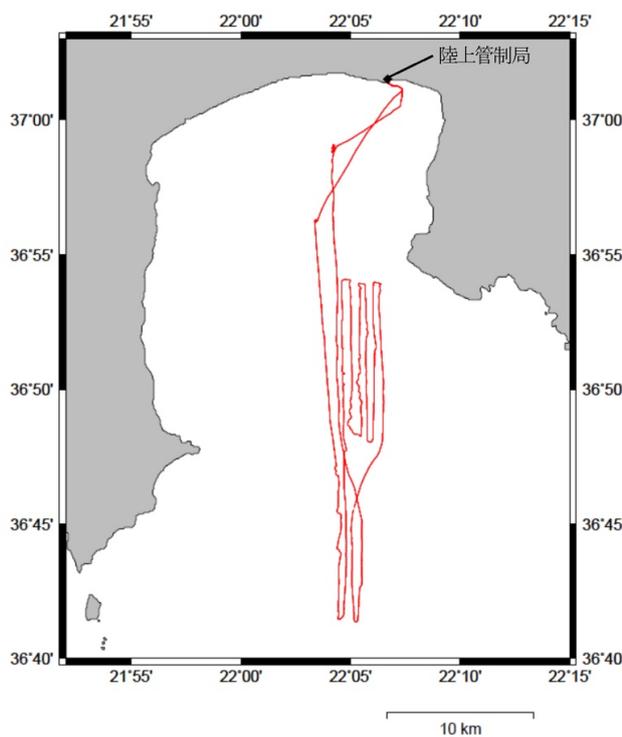


図7 ASVの航跡

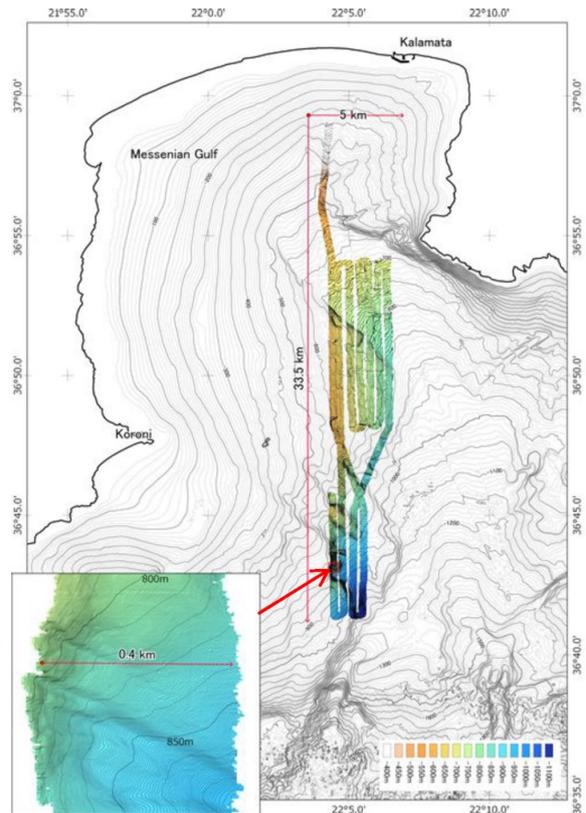


図8 AUVが取得した海底地形

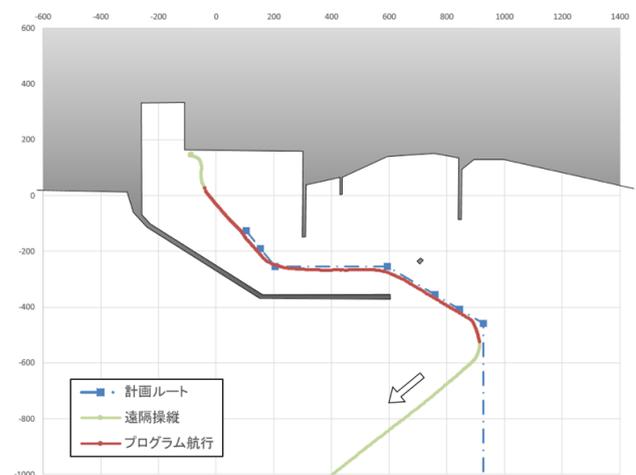


図9 出港時のASVの航跡



写真4 調査海域に向けて航行中の様子

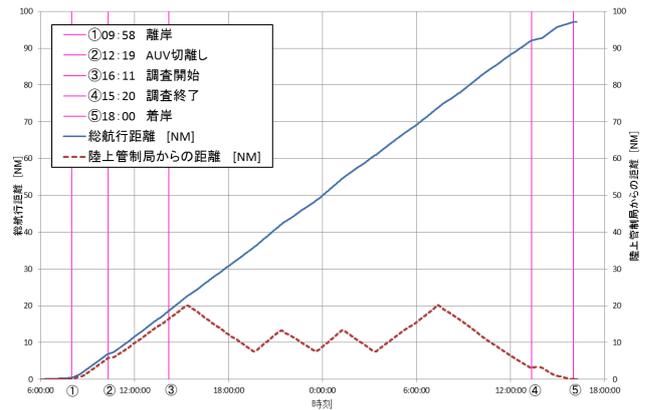


図11 航行距離及び陸上管制局との離隔距離

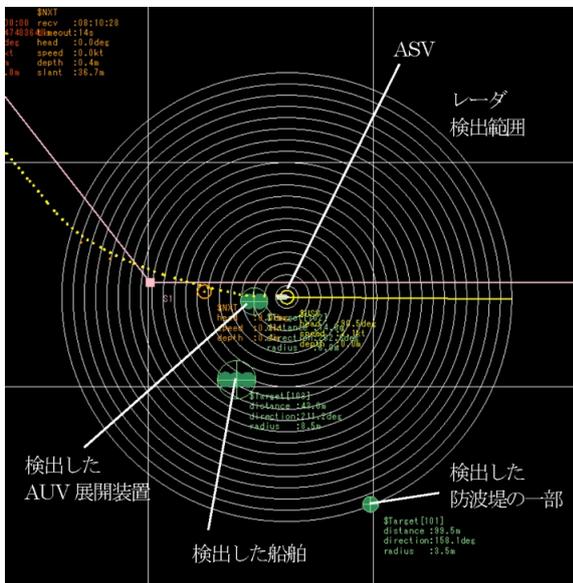


図10 周辺監視用レーダによる障害物の検出

調査中も音響測位によって得られた AUV の位置を監視しながら、主に遠隔操縦機能により、方位・船速を調整しながら操船を行った。周辺監視用レーダによる障害物の検出は常時行っており、特に出入港時や夜間航行において活用した。搭載するレーザレーダは周囲の障害物を無数の点群データとして検出するため、伝送容量に限りのある衛星通信環境では直接検出データを伝送することは困難であったが、点群データに対してグルーピング、フィルタリング処理により統合・抽出して伝送容量を削減することで、陸上管制局において周囲状況を把握することを実現している。図10にASVが港湾内を航行しているときのレーダ画像を示す。図においてASVは設定ルートに沿って右方向に航行しているが、すぐ後方に曳航中のAUV展開装置、右舷後方に出港を見守る主催者の船舶を検出している。右舷前方には防波堤の一部を検出している。

図11に競技中のASVの航行距離及びASVと陸上管制局との距離を示す。出港から入港まで終始およそ3ktで安定して航行

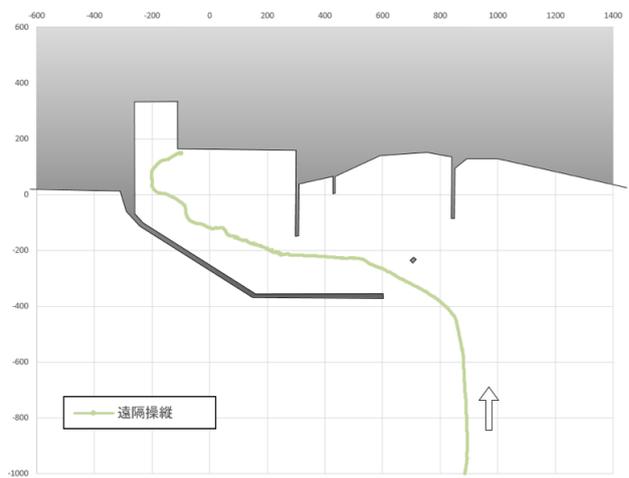


図12 入港時のASVの航跡

しており、総航行距離はおよそ97NM (180km)であった。陸上局とASVとの距離が近づいたり離れたたりしているのは、南北方向に移動する調査ルートであったためである。今回の運用では、最大で陸上管制局からおよそ20NM (37km)離れたところでASV及びAUVを運用することができた。

調査後、港への入港及び着岸は遠隔操縦によって行った。図12に入港時のASVの航跡を示す。着岸は岸壁にいる監視員と陸上管制局にいるオペレータが連絡を取り合いながらASVを操船し、微速で岸壁に近接させたところで、ポートフックにより確保した。写真5に示すのが、ASVが着岸する様子である。

### 6.3 本コンペティションにおける成果

ASVとAUVの協調運用による無人調査は約23時間で、約5km×33.5kmの範囲を調査し、海底地形データを取得した。また、ASVの総航行時間は約32時間で、総航行距離は約97NM (180km)を記録した。調査後のAUV無人回収は実施を見送ったが、調査開始時のAUVの無人展開に成功した。調査中はAUVの監視、陸上管制局との通信中継を行うことで海底データの取得を支援した。ASVは離岸から出港、夜間航行、入港、着岸まで全て無人運用を達成した。



写真5 着岸の様子

## 7. おわりに

今回提案した無人海底探査システムは、従来の海底調査に代わる、より効率的に短時間で広域の海底データを取得できる手法として開発を行った。そして本コンペティションにおいて開発したシステムを用いて実海域で実際に運用を行った。

その結果、オペレータが調査海域に立ち入ることなく、陸上に居ながら ASV 及び AUV を運用し、海底地形データを取得できたことで、その有効性を確認することができた。

当社が中心となって開発した ASV、AUV 無人展開回収装置についても、最終ラウンドでは AUV の無人展開と洋上中継器としての役割を果たすことで成果に大きく貢献した。今後も引き続き開発を続け、特に実施を見送った AUV の無人回収についての実証を行うとともに、信頼性の向上と、オペレータにとってより運用しやすいシステムの構築を目指していきたいと考えている。

本報は、共同研究「超広域高速海底マッピングに関する研究—Shell Ocean Discovery XPRIZE への挑戦—」に基づく成果である。

本コンペティションに参加するに当たって、スポンサー、サプライヤー、そして多くのサポーターの皆様にご協力、ご支援いただいたことをチーム一同深く感謝する。

## 参考文献

- 1) Team KUROSHIO: Team KUROSHIO 公式ホームページ, <https://www.jamstec.go.jp/team-kuroshio/>, (2020-1-8)
- 2) XPRIZE Foundation: Discovering the mysteries of the deep sea, Phase Awarded, <https://oceandiscovery.xprize.org/prizes/ocean-discovery/>, (2020-1-8)
- 3) 小山: 水中機器製品の開発, 三井造船技報, 211(2014-2), p.1
- 4) T. Ohki, et al.: Fast and ultra-wide area bathymetric survey system without support vessel, OCEANS'18 MTS/IEEE Kobe / Techno-Ocean 2018 (OTO'18), (2018)
- 5) 東京電力ホールディングス株式会社: 福島第一原子力発電所無人調査船運航開始について, <https://photo.tepco.co.jp/date/2011/201111-j/111121-01j.html>, (2020-1-8)
- 6) 各務 外: Team KUROSHIO の挑戦 知と情熱で挑む超広域海底探査, 第 89 回マリンエンジニアリング学術講演会, (2019)
- 7) 百留 外: 洋上中継器 (ASV) の開発, 日本ロボット学会誌, 36, 4, (2018), p.286

[問い合わせ先]

三井 E&S 造船 設計本部 艦船・特機設計部  
TEL 0863-23-2246 各務 均

本報は、2020 年 2 月 28 日に以下のホームページに公開しました。

<https://www.mes.co.jp/solution/research/>