

## 7 海底資源探査・洋上風力発電設備における AUVの新しい活用技術

篠野 雅彦\*, 岡本 章裕\*, 稲葉 祥梧\*, 藤原 敏文\*

### **Utilization of New Multiple-AUV Systems for Subsea Resource Exploration and Offshore Wind Power Facilities**

by

SASANO Masahiko, OKAMOTO Akihiro, INABA Shogo and FUJIWARA Toshifumi

#### **Abstract**

The National Maritime Research Institute has been developing technologies for multiple-AUV operations since 2014. AUVs are physically separate from the mother vessel, and operating multiple AUVs simultaneously from a single vessel should result in a high-resolution, wide-area seafloor survey system. AUVs can be used for deep-sea floor resource exploration and underwater inspection of offshore wind power facilities. Meanwhile, small ROVs (underwater drones) have also been gaining popularity as robots for underwater surveys and inspections. It would be ideal to combine elements of AUVs (no-wired, autonomous navigation) and ROVs (wired, remote control) in underwater robots to target specific purposes.

In this study, two AUVs were used to conduct the following three technical tests in lake-bottom surveys of waters 80-90 m deep: (1) AUV formation using AUV-AUV acoustic communication and AUV-AUV acoustic positioning, (2) underwater horizontal cable extension using two AUVs holding both ends for horizontal cable seismic survey (HCS), and (3) AUV approaching the Edokko Mark-1 as an underwater acoustic lighthouse.

In addition, we developed an AUV-ASV wired system based on two commercially available small ROVs and conducted technical tests using the system. The system utilizes underwater wired communication between the AUV and the ASV, and Wi-Fi wireless communication between the ASV and the mother vessel. This network enables operators on the vessel to perform inspections in real-time and remote control the AUV using seafloor images. The eventual goal in the future is for multiple AUV-ASV wired systems to be operated simultaneously from a small vessel in a shallow water area.

---

\* 海洋先端技術系

原稿受付 令和4年5月10日

審査日 令和4年5月19日

## 1. はじめに

AUV (Autonomous Underwater Vehicle : 自律型無人潜水機) は、母船からの遠隔操作なしに自律で状況判断を行い、水中航行や海底観測を行う水中ロボットである。当研究所では、平成 26 年度から「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)」への参画等により、AUV の研究開発を実施している。深海底資源探査や、洋上風力発電設備の海中部点検等に役立てることを目指して、主に複数 AUV 運用の研究開発を進めている<sup>1)2)</sup>。

AUV と対をなす水中ロボットの分類として、ROV (Remotely Operated Vehicle : 遠隔操作型無人潜水機) がある。ROV は、母船に乗船しているオペレーターからの遠隔操作により、水中航行や海底観測等を行う水中ロボットである。近年、小型 ROV について「水中ドローン」という呼称が多用され、市販品が普及しつつある<sup>3)</sup>。実際には、ほとんどの AUV にはオペレーターからの遠隔指示を受け付ける機能があり、一部の ROV には自律航行の機能が存在する。このため、AUV と ROV の区別は、厳密には明確でない。水中ロボットの研究開発では、AUV 的要素 (無索式、自律航行) と ROV 的要素 (有索式、遠隔操作航行) をうまく組み合わせ、水中作業の目的に沿った支援システムとすることが重要である。

AUV は、母船との間を無索とし、通信方法を水中音響通信のみとすることが多い。水中音響通信のデータ転送量は貧弱であり (10~数 k バイト/応答)<sup>4)</sup>、AUV から母船への海底映像のリアルタイム転送は望めない。一方で、AUV と母船の間にケーブルが無いことから、海洋資源開発のための深海底調査において、母船上に大規模なケーブル操作装置が不要であり、一般作業船を AUV の母船とすることができる。また、AUV と母船が物理的に離れているため、1 隻の母船から同時に複数の AUV を運用することが可能である。このため、広範囲の深海底調査システムとして、複数 AUV 同時運用技術が有望視されている。

本稿の 2 章 1 節では、深海底調査用 AUV を 2 機使用した協調潜航試験の結果を示す。この潜航試験では、AUV-AUV 間の音響通信技術、および AUV-AUV 間の音響測位技術を適用し、2 機の AUV で協調して、AUV-AUV 間の距離を調整する技術を実証している。この技術を用いることで将来的に、母船からの支援なしに、複数 AUV による深海底での隊列観測が可能になる。加えて、2 章 2 節では、深海底調査用 AUV を 2 機使用した水平ケーブル音波探査 (HCS: Horizontal Cable Seismic) 試験の AUV 制御結果を示す。この試験では、ハイドロフォンアレイケーブルの両端を 2 機の AUV が保持し、海底 (湖底) からの高度を一定にして、海底 (湖底) 近傍で水平方向に展開する技術試験を実施している。これまで、1 機の AUV または ROV によるハイドロフォンアレイケーブル 1 本の曳航例はあるものの<sup>5)6)</sup>、2 機の AUV によるハイドロフォンアレイケーブル 1 本の水平展張の例は、我々の知る限り初めてである。ハイドロフォンアレイケーブルを海底に近づけることで、将来、大深度地層調査において、水平解像度を下げることなく音波探査を実施できると期待される。さら



図-1 深海底調査用ホバリング型 AUV「ほばりん」(右) と「ほばりん2」(左)

に、本稿の 2 章 3 節では、水中音響灯台試験の AUV 制御結果を示す。この試験では、JAMSTEC 所有の「江戸っ子 1 号 COEDO」(以下、「COEDO」) に水中音響トランスポンダーを設置して海底 (湖底) の音響灯台とし、AUV が水中測位機により「COEDO」を測位しつつ自律航行することで、接近・周回する技術試験を実施した。この技術により将来的に、深海底の環境調査において、母船からの測位情報のサポート無しに、フリーフォール型深海底探査機 (江戸っ子 1 号シリーズ) とホバリング型 AUV (ほばりん等) が、協調環境調査を実施できるものと期待される<sup>7)8)</sup>。

また、本稿の 3 章では、市販の小型 ROV 2 機をベースに AUV と ASV (Autonomous Surface Vehicle : 自律型無人船) を開発し、各々をケーブルで連結した「AUV-ASV 連結システム」について、運用試験結果を示す。本システムは、浅海域において、AUV-ASV 間の水中有線通信、および ASV-母船間の空中 Wi-Fi 無線通信を利用し、AUV の海底映像を母船にリアルタイム転送が可能である。これにより、母船上のオペレーターによる目視点検と、海底映像を用いた AUV の遠隔操作が可能となる。さらに将来的に、浅海域において複数の「AUV-ASV 連結システム」を 1 隻の作業船からの同時運用が期待される。

## 2. 深海底調査のための複数 AUV 運用技術

高精度・広範囲の海底資源探査を目指し、複数 AUV 運用技術の研究開発を進めた。AUV による深海底調査は、海底に接近して実施するため、船舶調査と比較して高解像度の調査データを取得することが可能である。また、1 隻の母船から複数の AUV を運用できるため、高解像度と広範囲を両立する調査法として期待される。ただし、母船の管制下で複数の AUV を安全に自律航行させる必要がある。通常の AUV 管制では、母船と各 AUV の間で音響により通信や測位を行って管制する。しかし、大深度調査では、母船と各 AUV の間の距離が離れるため、通信に必要な時間や、測位の誤差が増大するという問題がある。本研究では、2 機の深海底調査用ホバリング型 AUV「ほばりん」、「ほばりん2」を用いて、水深 80~90m の水域で、AUV-AUV 間通信・測位技術による複数 AUV 運用試験を行い、有効性を検証した。

### 2. 1 AUV 2 機による協調潜航試験

2機のAUVが、定められた調査範囲内の観測測線上を航行して海底調査を実施する際、母船-AUV間の通信・測位情報を用いず、AUV-AUV間の通信・測位情報を用いて隊列航行する技術を検証した。この手法には、大深度の調査海域でもAUVの通信速度や測位精度を一定に保つことが出来るというメリットがある。

図2は、AUV-AUV間通信(Blueprint社SeaTrac X150)を用いて、協調ウェイポイント航行を行っている際の「ほばりん」と「ほばりん2」を、母船設置のUSBL測位機(iXBlue社GAPS4)で測位した航跡である。本研究の協調ウェイポイント航行は、予め各AUVの測線スタート位置にウェイポイントを設定しておき、2機のAUVがAUV-AUV間通信を行ってどちらもウェイポイントに到達したことを確認した後、次のウェイポイントに向かうためのスタート時刻を決めて、測線航行の2機同時スタートを実現する方法を用いた。測線上の位置保持、高度保持(1m)、速度保持(0.2m/s)等の制御は、各AUVの従来自律制御法で実施した。

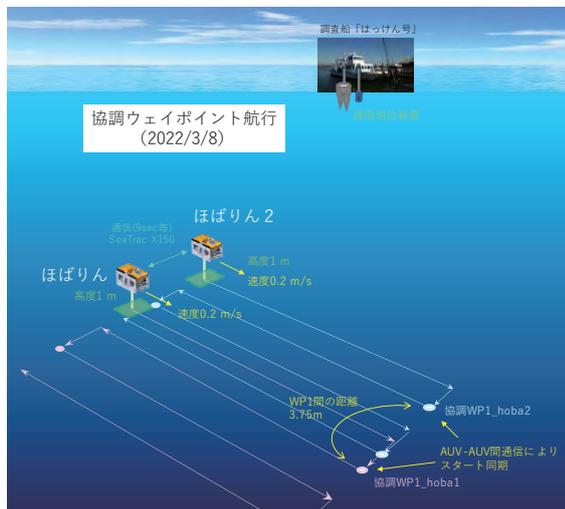


図-2 AUV-AUV間通信を用いた協調ウェイポイント航行によるAUV2機の隊列の概要と航跡(赤:「ほばりん」、青:「ほばりん2」)

図3は、AUV-AUV間測位(SeaTrac X150)を用いて、Leader-Follower航行を行っている際の「ほばりん」と「ほばりん2」を、母船から測位(GAPS4)した航跡である。本研究では、

「ほばりん」がLeaderとしてウェイポイント航行を行い、「ほばりん2」がFollowerとして9秒毎に「ほばりん」を測位し、オフセット距離(西3.75m)を保ちながら追尾航行を実施した。

上記、2つの複数AUV航行手法を比較すると、どちらも調査範囲内で複数AUVの安全な航行が実現している。ただし、協調ウェイポイント航行においては、2機のAUV間の予定測線差(東西3.75m)に加えて、南北方向にも2機のAUV間に航跡のずれが発生している。これは、協調ウェイポイント航行開始前に各AUVの自己推定位置にずれがあったためと考えられる。また、Leader-Follower航行においては、Followerである「ほばりん2」の航跡が乱れている。これは、「ほばりん2」搭載USBL測位機(SeaTrac X150)による「ほばりん」測位の誤差が、Follower航行の目標位置設定に反映されたためと考えられる。AUVの航跡のずれや乱れについては、海底調査データへの影響が懸念される。このため、将来的な複数AUV運用手法として、AUV-AUV間通信を用いた協調ウェイポイント航行と、AUV-AUV間測位を用いたLeader-

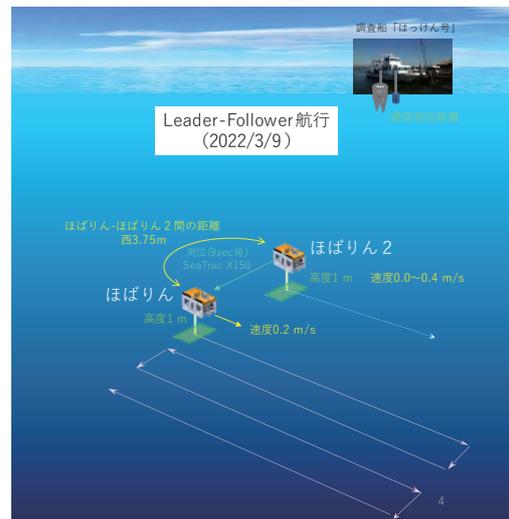


図-3 AUV-AUV間測位を用いたLeader-Follower航行によるAUV2機の隊列の概要と航跡(赤:「ほばりん」、青:「ほばりん2」)

Follower航行の組み合わせが必要と思われる。

## 2.2 AUV2機によるHCS試験

2機のAUVが長さ26mのハイドロフォンアレイケーブル

の両端を保持し、湖底からの高度を一定（10 m）に保ち、ゆっくりとした速度（0.1 m/s）で測線上を移動し、ケーブルを水平展張する技術試験を実施した。また、このハイドロフォンアレイケーブルの水平展張に合わせて、同じ測線上をエアガン曳航船が移動（速度 1~2 m/s、高度 50~80 m）し、ハイドロフォンアレイケーブルの前後 250 m の測線上の範囲で、4 秒毎にエアガンの水中音響発振を行った。水中音響について、1 m 間隔のハイドロフォンアレイで 10 Hz~5 kHz の音響データを 16 チャンネル分同時に記録した。エアガンの水中位置は、エアガン近傍に設置した音響トランスポンダーを、調査船上 USBL 測位機の測位により推定した。また、ハイドロフォンアレイケーブルの位置は、両端を保持している AUV の位置を、調査船上 USBL 測位機の測位により推定した。ハイドロフォンアレイケーブルのたわみは僅かとみられる。

HCS 探査試験の概要と、音響発振機および受振ケーブルの測位結果を図 4 に示す。ハイドロフォンアレイケーブルを海底に近づけることにより、将来的に、大深度地層調査において水平解像度を下げることなく音波探査を実施できるものと期待される。また、将来的に発振源（エアガン等）も海底に近づけることが、本技術の重要な開発要素となる。発振部、受振部ともに AUV に搭載することができれば、海底地層の音波探査技術として、水深に関係なく高い解像度を保つことが期待できる。

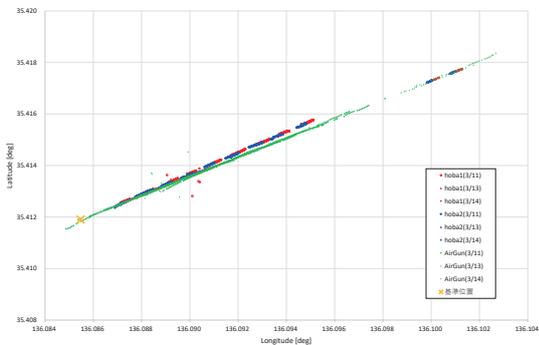
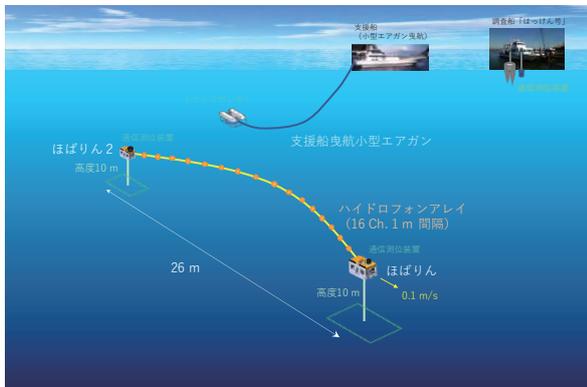


図-4 船舶曳航エアガンおよび AUV 2 機保持ハイドロフォンアレイケーブルによる HCS 探査試験の概要と航跡 (緑：エアガン、赤：「ほばりん」、青：「ほばりん 2」)

市販のフリーフォール型観測プラットフォーム「江戸っ子 1 号 COEDO」<sup>7)</sup> に水中音響トランスポンダーを設置して海底（湖底）の音響灯台とし、AUV が USBL 測位機（SeaTrac X150）により「COEDO」を測位しつつ自律航行する技術試験を実施した。この AUV 制御には、2 章 1 節の AUV-AUV 間測位を用いた Leader-Follower 航行とほぼ同じ技術を用いており、Leader が「COEDO」、Follower が「ほばりん」に相当する。また、Follower のオフセット距離と方位について、母船上からオペレーターが音響通信により変更指示を出すことで、「ほばりん」が「COEDO」に接近および周回することを實現した。本試験の概要と、「ほばりん」を調査船上 USBL 測位機で測位した航跡を図 5 に示す。

水中音響測位において、測位誤差（方位誤差と距離誤差）の大きさは距離に比例する要素があるため、対象トランスポンダーに接近するほど測位誤差が小さくなる。母船からの測位情報を元に「ほばりん」が「COEDO」に接近する場合、衝突の危険性が避けられないが、水中音響灯台の技術であれば、安全に数 m 程度まで近づくことが可能である。水深約 80

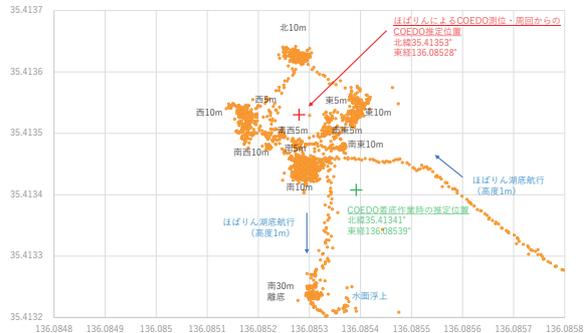
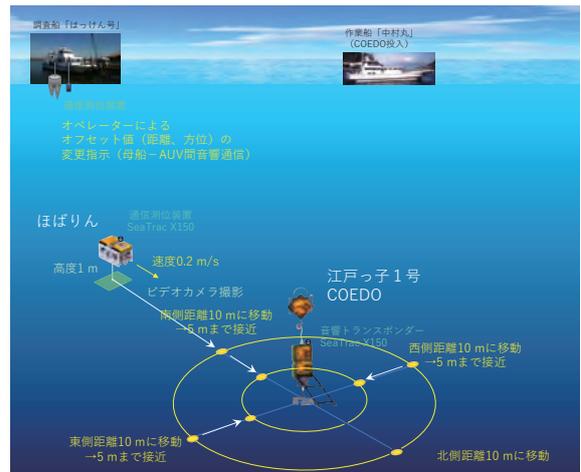


図-5 「江戸っ子 1 号 COEDO」および「ほばりん」による海底（湖底）環境調査の連携試験の概要および航跡

2. 3 江戸っ子 1 号を水中音響灯台とした AUV 潜航試験

mの水域で「ほぼりん」が「COEDO」に約5mの距離まで接近して撮影した画像を図6に示す。この技術により将来的に、深海底の環境調査において、母船からの測位情報のサポート無しに、フリーフォール型深海探査機（江戸っ子1号シリーズ）とホバリング型AUV（ほぼりん、ほぼりん2等）が協働して環境調査を実施できるものと期待される。



図-6 「ほぼりん」搭載ビデオカメラにより「江戸っ子1号 COEDO」を東5mの位置から撮影した画像

### 3. 浅海底調査のための複数AUV運用技術

洋上風力発電設備の海中部の水中映像点検を目指して、AUV技術の適用を進めた。市販の小型ROV（BlueRobotics社BlueROV2）2機をベースとし、1機にはWaterLinked社のドップラー対地速度計DVL A50を搭載して海底付近での自己位置推定を実現し、AUV化（海底自律航行可能化）した。もう1機には十分な浮力材とDGPSを搭載し、ASV化（海上自律航行可能化）した。また、ASVにはWiFiルータを設置し、ASVと母船上のオペレーターとの間の通信を無線化した。さらにAUVとASVをテザーケーブルで連結し、AUV-ASV-母船間でLANを構成して、「AUV-ASV連結システム」とした。本システムの外観を図7に示す。また、本システムの諸元を表1に示す。

本システムは、AUV-ASV間をテザーケーブルで連結することにより、AUVの自律操縦性に関して、ケーブルの水流抵抗による制限が生じた。ただし、ケーブルはAUV-ASV間の上下方向に限定されており、ASVと母船の間は物理的に離れていること、及び、ASVはAUVと同時に同目標位置に向かって自律航行することができるため、一般的なROVほどの航行制限には至っていない。一例として、市販のROVでは、テザーケーブルが、母船のプロペラや海底突起物等に絡まないように常に注意する必要があるが、本システムにはその心配が少ない。

「AUV-ASV連結システム」による洋上風力発電設備の点検技術試験の概要と、試験時の様子、および、海底撮影例を図8に示す。本システムは、AUV-ASV間の水中有線通信、およびASV-母船間の空中無線通信を利用し、AUVの撮影による海底映像を母船にリアルタイム転送することが可能である。これにより、母船上のオペレーターによる海中点検箇所の映像確認と、海底映像を確認しながらのAUVの遠隔操作

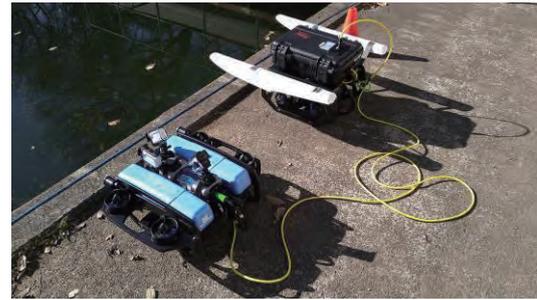


図-7 AUV-ASV連結システムの外観  
（左：AUV、右：ASV、連結ケーブルは水深に合わせて適当な長さのものを使用する）

作が可能となる。一般的にAUVの海底観測は、ウェイポイントへの経路上またはウェイライン上を通過する際の一度の観測となることが多く、海中点検箇所の詳細状況を確認するために、同じ撮影箇所について、撮影方向、距離、点灯状況等を調整して複数回の撮影を行うという作業には不向きであった。一方、本システムは、目標位置において自律航行モード（AUVモード）から遠隔操縦モード（ROVモード）に切り替えることで、オペレーターが納得するまで遠隔操作で同じ箇所を撮影することが可能である。

「AUV-ASV連結システム」は、水深30m程度、水平距離100m程度の浅海域での運用に特化し、AUVとASVを上下方向のケーブルで連結することで、AUVの自律航行の長所と、ROVの海底映像点検の長所の両方を組み込んだシステムとした。複数の「AUV-ASV連結システム」を1隻の作業船から同時に運用することが可能であり、将来的に多数の洋上風力発電設備の海中点検を効率的に進めるために有効なシステムとなることが期待される。

表-1 AUV-ASV連結システムの諸元

	AUV	ASV
外寸	W 0.56 m	W 0.70 m
	L 0.45 m	L 0.71 m
	H 0.25 m	H 0.39 m
空中重量	14.0 kg (バッテリー含む)	13.0 kg (バッテリー含む)
スラスト	水平×4 鉛直×4	水平×4
バッテリー	Li-Ion 15V 266Wh	Li-Ion 15V 266Wh
航行用センサ	DVL A50 (1MHz)	DGPS
撮影用カメラ	水中 Web カメラ ActionCam (Op.)	水中 Web カメラ
通信	LAN ケーブル (5, 10, 15, 20, 30 m)	LAN ケーブル WiFi ルータ
制御モード	自律航行 (AUV) / 遠隔操作 (ROV)	自律航行 (ASV) / 遠隔操作 (ROV)

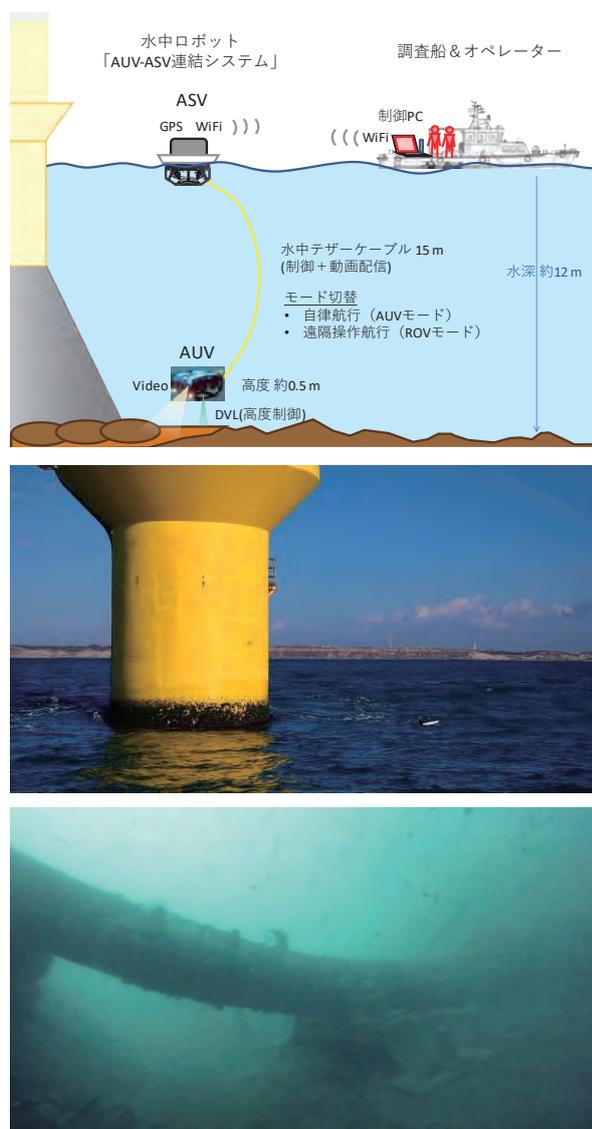


図-8 AUV-ASV 連結システムによる  
銚子沖洋上風力発電設備の点検技術試験の概要。  
試験中の海上の様子、および海底のケーブル保護管  
(水深約 12 m) の撮影例

#### 4. まとめ

本研究では、まず、AUVによる深海底資源探査を目指し、AUV-AUV間通信とAUV-AUV間測位技術を用いた複数AUV隊列制御の技術開発状況を示した。次に、洋上風力発電設備の海中中部点検技術を目指し、浅海底でのAUV-ASV間水中有線通信とASV-母船間空中無線通信を用いた「AUV-ASV連結システム」の技術開発状況を示した。どちらも従来のAUV運用技術を基本としており、その上に追加する形で、運用深度と調査目的に合わせて、新たなAUV活用技術を加えている。これにより、将来的に、高度な複数AUV運用技術として、海底資源探査・洋上風力発電設備のための利用が期待される。

#### 謝辞

本研究の一部は、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の課題「次世代海洋資源調査技術」(海のジブング計画, 研究推進法人: JAMSTEC)で製作したAUVを使用させていただきました。また、SIPの課題「革新的深海資源調査技術」(研究推進法人: JAMSTEC)によって実施された内容を含んでおります。関係各位に深く感謝申し上げます。また、琵琶湖複数AUV利用技術試験の実施にご協力いただきました、NPO法人びわ湖トラストを始めとする関係各位に感謝申し上げます。「AUV-ASV連結システム」の開発にご協力いただきましたHaloworld株式会社、銚子沖での技術試験にご協力いただきました東京電力リニューアブルパワー株式会社を始めとする関係各位に感謝申し上げます。最後になりますが、本研究を進めるに当たり、AUVの水槽試験等、様々な作業にご協力いただきました当研究所の海洋先端技術系の皆様に深く感謝申し上げます。

#### References

- 1) T.Fujiwara, et al., "Latest Development Information on NMRI AUVs", NMRI Reports, Vol.21, Suppl. (2021) pp.13-18.  
[https://www.nmri.go.jp/\\_src/202100/PNM2A210003-00.pdf](https://www.nmri.go.jp/_src/202100/PNM2A210003-00.pdf)
- 2) T.Fujiwara, et al., "Sea Trials Summarization on Fundamental Formation Control of Multiple Cruising AUVs", Proc. ASME 2021 (2021) OMAE2021-61483.
- 3) L.Rui, et al., "Innovative Water Quality and Ecology Monitoring Using Underwater Unmanned Vehicles: Field Applications, Challenges and Feedback from Water Managers", MDPI Water, vol.12 (2020), 1196.
- 4) J.Gonzalez-Garcia, et al., "Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions", MDPI Appl. Sci. vol.10 (2020) 1256.
- 5) G.Indiveri, et al., "Geotechnical Surveys with Cooperative Autonomous Marine Vehicles: the EC WiMUST project", Proc. AUV Workshop (2018).
- 6) M.Katou, et al., "Structural Imaging of Acoustic Survey Using a Deep-Towed Sub-Bottom Profiler and Hydrophone Cable", IEEE J. Oceanic Engineering, Vol.47, No.2 (2022) pp.399-416.
- 7) K.Goto, et al., "Deep-sea observation for environmental impact assessment: for the development of marine mineral resources", Butsuri-Tansa, Vol.73 (2020) pp.64-73.
- 8) A.Okamoto, et al., "Visual and Autonomous Survey of Hydrothermal Vents Using a Hovering-Type AUV: Launching Hobalin Into the Western Offshore of Kumejima Island", Geochemistry, Geophysics, Geosystems, Vol.20, Iss.12 (2019) pp.6234-6243.