

3 海技研 AUV 開発最新状況

藤原 敏文*, 金 岡秀*, 篠野 雅彦*, 佐藤 匠*
稲葉 祥梧*, 岡本 章裕*, 今里 元信*, 瀧本 忠教**

Latest Development Information on NMRI AUVs

by

FUJIWARA Toshifumi, KIM Kangsoo, SASANO Masahiko, SATO Takumi
INABA Shogo, OKAMOTO Akihiro, IMASATO Motonobu, and TAKIMOTO Tadanori

Abstract

The underwater robotics team at the National Maritime Research Institute (NMRI) in Japan has been developing multi-vehicle operation technology for autonomous underwater vehicles (AUVs) and an autonomous surface vehicle (ASV) in an effort to improve the efficiency of operations. Two successive projects have been conducted as part of this initiative, the first term SIP project (SIP1), "Next-Generation Technology for Ocean Resources Plan (Zipangu in the Ocean Program)," and the second (SIP2), "Innovative Technology for Exploration of Deep Sea Resources." Here, we report our results from the latter project. Under SIP2, NMRI is promoting the AUVs control system construction initiatively together with the leading agency, the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC). To promote future high-level formation control, two types of fundamental formation control tests were conducted using three AUVs and one ASV in the sea. The topography of the seafloor along the coast in Japan was successfully mapped using the AUV control methods in test trials. This paper presents the results of the fundamental formation control tests. Along with the development of these technologies, we are also working on the widespread implementation of AUVs. A hovering AUV was used to search the bottom of Lake Biwa for archaeological sites, as well as for the carbon dioxide capture and storage (CCS) project, the results of which are also presented in this paper.

* 海洋先端技術系, ** 企画部

原稿受付 令和 3 年 5 月 18 日

審査日 令和 3 年 5 月 31 日

1. はじめに

海洋資源探査や海洋構造物の保守点検等に対して、無人で短時間、効率的に、また広範に実施したいという社会ニーズが存在する。図-1のように多数のAUV（Autonomous Underwater Vehicle, 自律型無人潜水機）がASV（Autonomous Surface Vehicle, 洋上中継機）とともに広大な海底地形探査を一気に行うことができれば有効である。

海上技術安全研究所（以下、海技研）海洋先端技術系では、内閣府第1期戦略的イノベーション創造プログラム「次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）」¹⁾²⁾（2014～2018年）に引き続き、第2期プログラム「革新的深海資源調査技術」³⁾

（管理法人は国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC））に2018年から参画しており、その中の「深海AUV複数運用技術に関する研究開発」で複数機AUVの隊列制御技術開発を行っている⁴⁾。最終的な目標としては、1機のASVが10機以上の航行型AUVを統括監視・制御しながら、広範囲を効率よく海底地形探査、地質探査が行えるシステム開発を目標としている。複数の機関が保有する異なるシステムのAUVの有効活用も念頭に置いており、それらを同時運用する。2022年度では、5機のAUVを使った実証試験を予定している。

他方、AUVを使った実運用にも応える対応を同時並行的に行っている。ホバリング型AUVを使った琵琶湖湖底遺跡探査やCCS(Carbon dioxide Capture and Storage, 二酸化炭素回収・貯留)事業へのAUV活用のための試験検討等を実施した。

これらの開発状況を報告する。

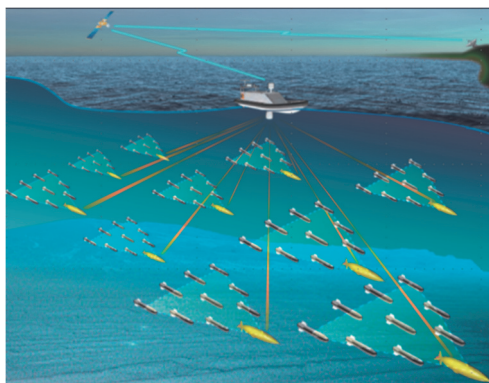


図-1 ASV1機で複数機AUVを運用する将来イメージ

2. 隊列制御基盤技術開発

2.1 隊列制御方法概要

運用効率を向上させるためにAUVを同時に複数機運用することが必要である。この時、全てのAUVを隈なく監視する目的から、ASVを介して計測員が常駐する本船に対してAUV状況データの送信、さらに必要に応じて再度ASVを経由してAUVに対して航行指示を与えることが必要とされている。その他、AUV同士の情報交換・測位操作により、より高度な運用を目指している。これらの対応を全て自動化して行おうとする試みである。

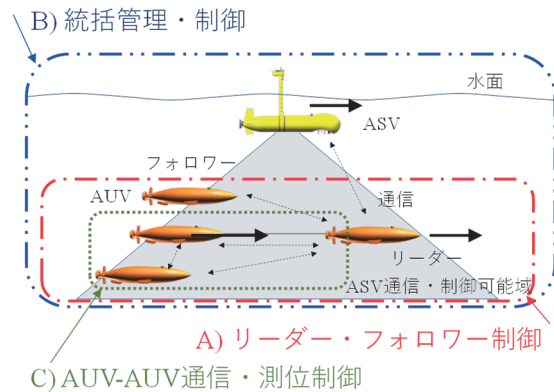


図-2 隊列制御方法の概念

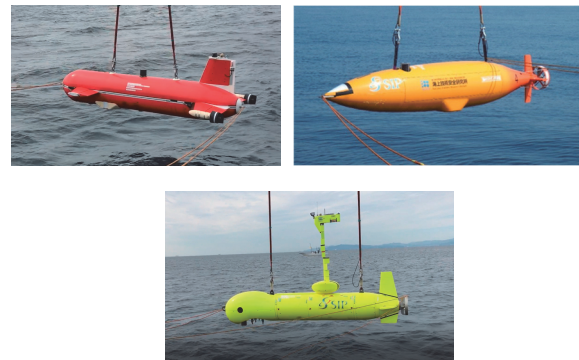


図-3 実海域試験で使用したAUV2号機（左上）、4号機（右上、3号機も同型）とASV（下）



図-4 実海域試験実施地点（駿河湾水深約100mと1000m域）

隊列制御にも幾つかの方策、手段が存在するが、本研究開発で実施している内容を総括すると図-2のようになる。1つめは、リーダー・フォロワー制御（図中A）であり、リーダーAUVの指示に基づきフォロワーAUVが航行状態を制御する方策である。通常、AUV投入前にプログラムされた指示点（ウェイポイント、WP）に基づき単純航行する実施状況に対して、時々刻々WPが指示される方策であることから動的WP制御と呼称している。2つめは、ASVがAUV全体を統括監視・制御（図中B）するシステムで、ASVの観測域から外れる、または位置的な不具合事象を確認した場合にAUVに指示する方策である。3番目としては、各AUVが他機の位置等を把握して、自身の位置、速度を修正する方策である。AUV-AUV通信・測位

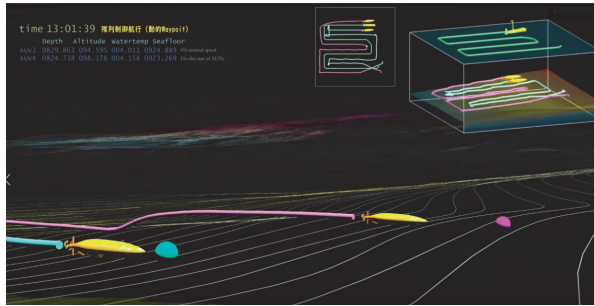


図-5 動的 WP 制御による実海域試験（再現アニメーション，各 AUV は前方の指示点（青・ピンク球）に想定時刻に達するよう航行制御）

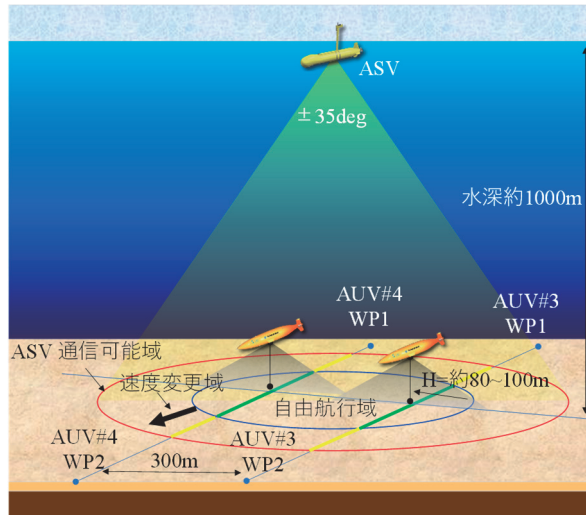


図-6 統括監視・制御法の詳細
（2機 AUV での状況を例として）

制御（図中 C）とここでは呼称する。

これらの基盤技術開発を行い実海域試験，水槽試験でそれらの有効性を確認した。

2.2 リーダー・フォロワー制御（動的 WP 制御）

図-3 に示す NMRI 航行型 AUV3, 4 号機（仕様の詳細は附録参照。本試験では 2 号機を使用せず）を使用して，試験を実施した。試験実施海域は，図-4 に示す駿河湾の水深約 1000m 海域である。

状況再現アニメーションの静止面を図-5 に示す。リーダー AUV を実稼動することはせず，代わりに ASV がリーダー AUV の航行位置，速度等を 10s ごとに送信した。与えられた WP 情報から各 AUV が目標とする相対位置，およびその相対位置に指定時間に達するための速度を計算し，航行状態を変化させる。30s 後に目標位置に到達するとのシナリオに基づき試験を実施した。2 機の AUV は問題なく航行し，必要とする海底地形の取得にも成功した。

2.3 統括監視・制御

前項で示したリーダー・フォロワー型システムは，多機関・多種合同の海底調査等を実施する場合，異なる制御システ

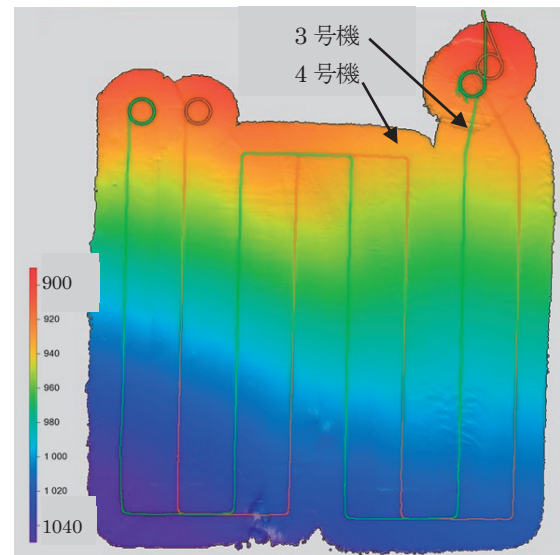


図-7 2機 AUV（AUV3・4号機）による潜航航跡と MBES による海底観測結果海底地形図（水深約 1000m 域）

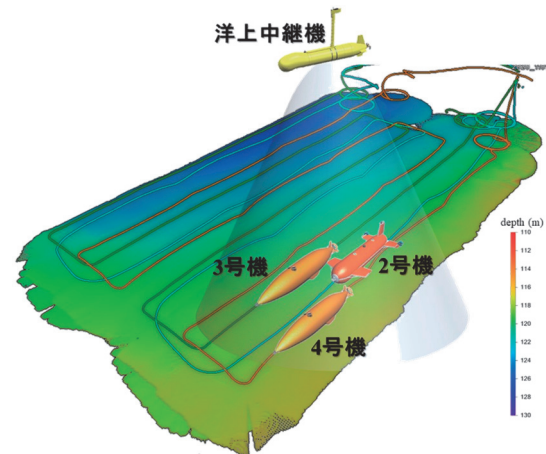


図-8 3機 AUV（AUV2・3・4号機）潜航航跡と MBES による海底観測結果（水深約 100m 域）（AUV・ASV は拡大表示）

ム・通信プロトコルを有するため各機関の AUV の艇体内制御アルゴリズム自体を修正する必要が多分にある。そのような状況下，制御アルゴリズムの改変を限りなく少なくし，多数 AUV の同時運用を容易に可能とするシステムが望まれた。

そこで，ASV を基準（リーダー機的作用）として，ASV からの監視から外れそうな事象が生じる場合のみ各 AUV に増減速を指示し，絶えず ASV の監視域に留まるような隊列制御システム（基本隊列制御システムと呼称）を構築，実海域で複数機 AUV を用いてシステムの有効性を検証した。実施概念図を図-6 に示す。各 AUV は，試験前に計測スタート時刻，スタートまでの待機行動，終了後待機時刻・行動，および航行地点データ（WP，情報としては緯度・経度・深度等）を保持し，水中に投入される。ASV の位置を基準とした図中の自由航行域に全機留まることを基本とし，そこから外れる割合に応じて AUV の増減速度を基本隊列制御システムが ASV を通じて指示する。

試験は先と同じ図-4 に示す駿河湾の水深 100m 海域およ



図-9 試験に使用した2機のアウバリング型 AUV
ほばりん (左)・ほばりん2 (右)

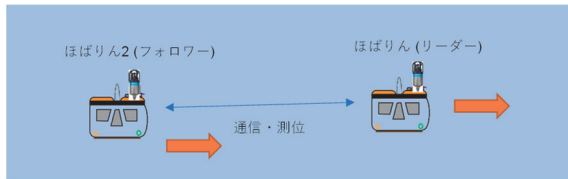


図-10 水槽内での AUV-AUV 通信・測位試験概念

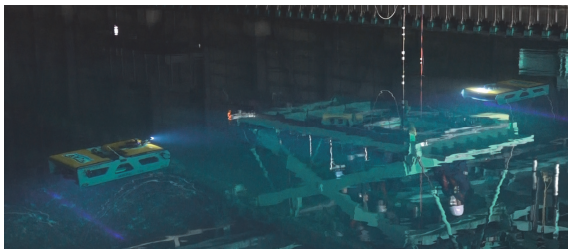


図-11 実海域再現水槽での試験の様子

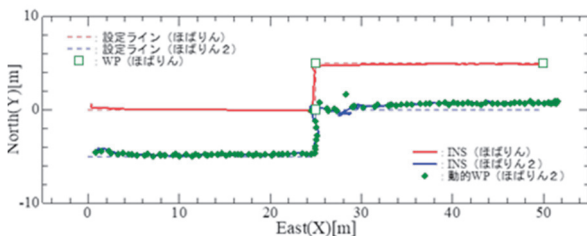


図-12 実海域再現水槽での AUV-AUV 測位試験結果の航跡
(ほばりにほばりん2が測位しながら追尾)

び1000mで実施した。2機AUV(AUV3・4号機)による潜航航跡とMBES(Multi Beam Echo Sounder, マルチビーム測深器)による海底観測結果海底地形図を図-7に示す。また、AUV2号機を含めた3機で実施した試験結果を図-8に示す。両試験結果ともMBESの音響ビームのラップ率は18%の設定で(通常50%程度を念頭)安定したAUV航行を実現、欠測域のない超高解像度海底地形計測に成功した。

2. 4 AUV-AUV 通信・測位制御

深海域での運用を念頭に置いた場合、高価な音響測位器を用いても位置誤差が生じるため、想定した隊列状態にならないことが十分想定される。そのため、AUV-AUV 通信・測位制御技術は、隊列運用を行う上で重要な技術要素と位置付けら

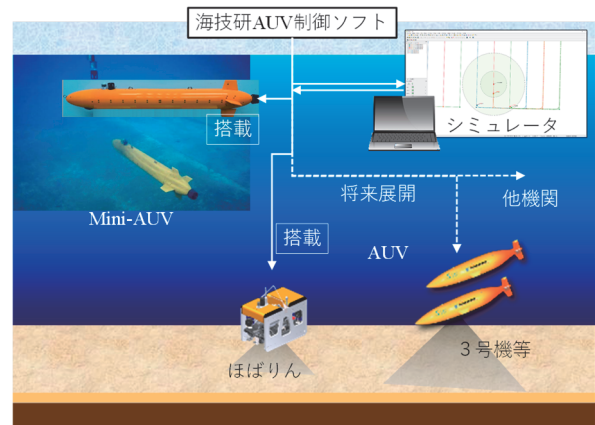


図-13 海技研開発制御プログラムの開発展開

れる。

そこで、SIP1事業で開発したアウバリング型AUV ほばりんをリーダー機とし、予備機であるほばりん2(図-9参照)に新規開発したアルゴリズムを実装したAUV-AUV 通信・測位システムを完成させた。その後、当所の実海域再現水槽(長さ80×幅40×深さ4.5m)でシステム確認試験を実施し、その有効性を確認した。図-10に水槽内でのAUV-AUV 通信・測位試験の概念を、図-11に実海域再現水槽での試験の様子、図-12に試験時の航跡を示す。ほばりん2がほばりんを計測した位置の南側5mの位置を追尾した結果である。測位は10sごとに行った。ほぼ等間隔で、追尾できていることが分かる。

今後は、やり取りした情報の確からしさの評価、補正法の検討や実海域での試行を念頭に置いている。

3. 成果の社会実装に向けて

SIP1事業においても伊豆諸島海域等で海底地形調査、海底熱水活動の確認と既に実調査を行っているところであるが²⁾、その後の進展として、AUV 制御ソフトウェア開発、琵琶湖北部壺遺跡探索、CCS技術開発に資する環境評価を実施した。

3. 1 AUV 制御ソフトウェア開発

汎用的なプログラム仕様、外部展開も念頭に置きながらROS(Robot Operating System, ロボット開発用ミドルウェア)を使ってAUV 制御システムの開発を行ってきた(図-13)。

本システムは、制御アルゴリズム試行用のmini-AUV(1.8m長さで屋内試験水槽でも使用可能な1スラスター、4舵の航行型AUV)およびアウバリング型(6機スラスター)のほばりに実機実装され、新しく開発した制御・通信アルゴリズムの水槽における検証試験に導入されている⁵⁾。

シミュレータ上でも同システムが作動することから、天候に左右されがちな、また安全対応への配慮や運用費用が多大に発生する実海域試験を行うことなく、シミュレーションによる机上検討、屋内水槽試験による事前検討がかなりの部分で実施できる体制が整った。

将来的には、今後製作するAUVのみならず、現保有AUVに

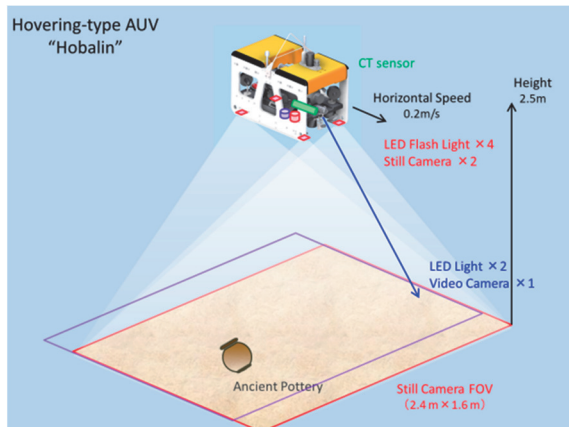
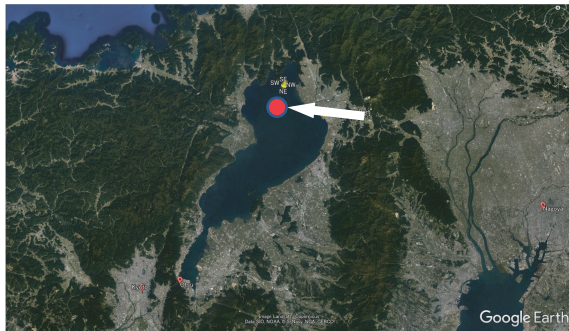


図-14 琵琶湖北部の葛籠尾崎湖底探索地点（上図、赤丸部）と計測概要（下図）

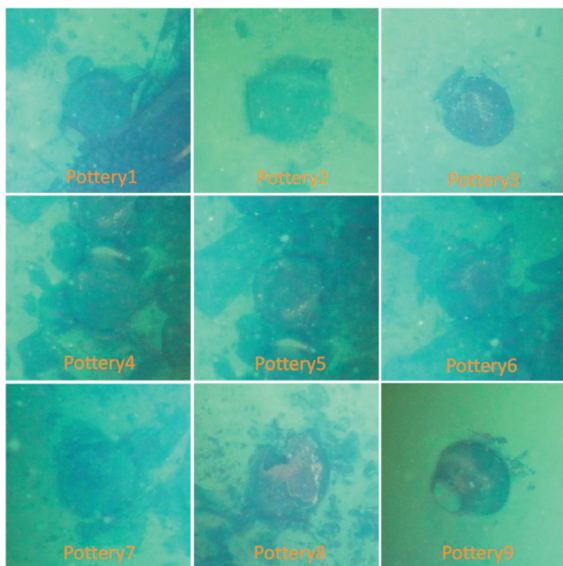


図-15 琵琶湖北部の葛籠尾崎湖底遺跡において発見された9つの壺遺跡

対しての搭載も視野に入れている。

3.2 琵琶湖北部壺遺跡探索

AUV ほばりんを用いて、琵琶湖の葛籠尾崎湖底遺跡の広域調査を実施した⁶⁾。図-14に湖底探索地点と計測概要を示す。本調査は初めての淡水域での潜航調査であった。葛籠尾崎湖底遺跡の調査水域が水深60～70mで、ほばりん調査潜航とし



図-16 式根島御釜湾でのほばりん投入の様子と海底航走（高度1m）状況

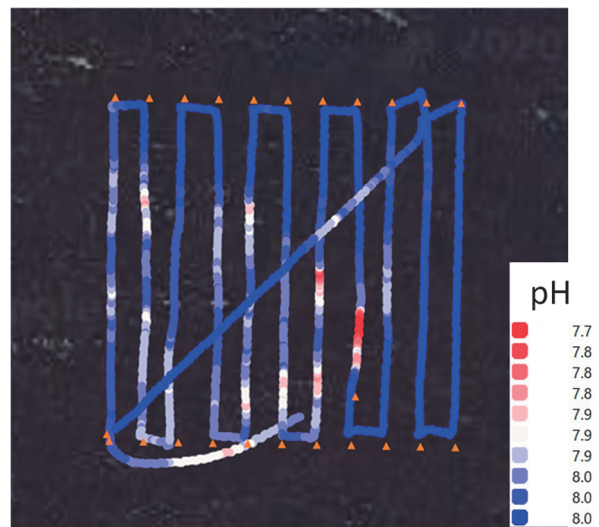


図-17 式根島御釜湾 CO₂ シープでのほばりん潜航時の pH 分布計測結果（50m 測線×11 本、高度 1m、速度 0.2m/s）

ては初めての“浅さ”であったこと、海水に比べて浮力が3%程度減少したこと、外洋の深海底に比べて透明度が低かったこと等、湖底調査のために調整するべき点がいくつか存在した。図-15にほばりん潜航調査で撮影に成功した9個の壺と思われる写真を示す。

3.3 CCS 技術開発に資する環境評価

近年、日本近海で、CCS 技術の研究、開発、実証が進められている。将来の CCS システム実証時には、現場の海底付近の CO₂ 漏洩等を含めた海洋環境モニタリングが求められる。AUV は遠隔操作型無人探査機（Remotely Operated Vehicle,

ROV)と比較して、テザーケーブルが無いために機動性が高く、海底での広範囲移動調査に向いており、観測機器として期待されている。また、調査船上のケーブル設備が不要で、複数機運用が平易である等のメリットがある。

本検討では AUV ほばりん に pH センサーとビデオカメラを搭載し海底に接近させ、局所的な二酸化炭素の濃度異常検出作業を行うことを将来目標とし、式根島御釜湾で pH 分布計測と海底気泡撮影に関する試験を実施した。

ほばりんを下田港でヤマグチマリーン（株）所有の小型作業船うみかぜ（19t）に搭載し、運用した。図-16 に投入時の様子、ほばりん海底航走時（高度 1m）の様子を示す。また、水深約 25m 地点で平面航行した際のほばりん計測 pH 値のカラープロットを図-17 に示す。pH 値の相対的に小さい箇所では CO₂ 漏洩の判別が可能である。AUV 搭載センサーによって、海水 pH 調査による漏洩検知と海底の映像観察による漏洩検知の両方が有効であることを実証した。

4. まとめ

AUV は小型化、安価化が進み、身近な存在となりつつあるが自律行動といった観点からはまだ十分でない。今後、群制御技術を主体として、より一層技術開発を行うことで、無人で安全・安心の下、必要事業が推進できるような機器開発を行っていく予定である。

直近の対応としては、SIP2 事業の中で 2022 年度に予定されている実海域試験において、他機関 AUV も含めた複数 AUV を使って隊列制御システムの有効性を検証する予定である。前項に示した実海域試験では、民間会社と運用を協業を行い、将来的な民間移転・事業化が問題なく進むよう対応した。今後事業化・実用化に向けた取り組みが本格始動するが、隊列制御システムが容易に民間移転できるように、システムの改善を行う予定である。

謝辞

本研究で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」（海のジバング計画、管理法人：JAMSTEC）で製作した AUV を使用させていただきました。また、総合科学技術・イノベーション会議の SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「革新的深海資源調査技術」（管理法人：JAMSTEC）、認定 NPO 法人びわ湖トラストとの共同研究、環境省「環境配慮型 CCS 実証事業」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、AUV 実機開発・保守作業に係った海洋先端技術系関係各位に御礼申し上げます。

References

- 1) JAMSTEC: Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program, Next-generation technology for ocean resources exploration, <https://www.jamstec.go.jp/sip/en/index.html>.
- 2) Kim Kangsoo, Sato Takumi, Inaba Shogo, Ohno Atsuo, Matsuda Takeya, and Takashima Sotaro: Simultaneous Multi-

AUV Operation as Real Practice - High-Efficiency and High-Definition Bottom Survey in Izu Islands, Journal of the JIME, Vol. 56, No. 1 (2021) pp.132-138.

- 3) JAMSTEC: Developing Innovative Technologies for Exploration of Deep Sea Resources, <https://www.jamstec.go.jp/sip2/en/>.
- 4) Fujiwara Toshifumi, Kim Kangsoo, Sasano Masahiko, Sato Takumi, Inaba Shogo, Okamoto Akihiro, Motonobu Imasato, and Osawa Hiroyuki: SEA TRIALS SUMMARIZATION ON FUNDAMENTAL FORMATION CONTROL OF MULTIPLE CRUISING AUVs, OMAE2021-61483, Proceedings of the ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2021), pp.1-9.
- 5) Okamoto Akihiro, Imasato Motonobu, Hirao C. Shunka, Sekiguchi Hidenori, Seta Takahiro, Sasano Masahiko, and Fujiwara Toshifumi: Development of Testbed AUV for Formation Control and its Fundamental Experiment in Actual Sea Model Basin, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.33, No.1 (2021), pp.151-157.
- 6) Sasano Masahiko, Okamoto Akihiro, Kumagai Michio, and Takashima Sotaro: Optical Investigation of Archaeological Remains on Bottom of Lake Biwa by a hovering-type AUV "Hobalin", Underwater Technology 2019, pp.1-4.

附録

海技研では図-A1 に示す海中・海底探査用 AUV, ASV を所有している。参考までに付記する。



名称	NMRI 航行型 AUV 1 号機	NMRI 航行型 AUV 2 号機	NMRI 航行型 AUV 3・4 号機	ホバリング型 AUV 「ほばりん」・「ほばりん2号機」	NMRI 半潜式水中観測機
英名称	NMRI Cruising AUV #1 "C-AUV#1"	NMRI Cruising AUV #2 "C-AUV#2"	NMRI Cruising AUV #3・4 "C-AUV#3・4"	Hovering AUV "Hobalin" "Hobalin#2"	NMRI Semi-submersible ASV
寸法 (m)	3.9L×0.65Φ	3.6L×0.60Φ	3.9L×0.65Φ	1.2L×0.7B×0.8H	4.0L×0.60D×2.7H (1.7m Sward)
重量 (kg)	780	620	545	270	730
設計水深 (m)	2000	2000	2000	2000	海面
最大速力(knot)	4.0	4.0	6.5	1.4	4.0
最大速力(m/s)	2.1	2.1	3.3	0.7	2.1
巡航速力(knot)	3.0	3.0	3.5	0.4	3.0
巡航速力(m/s)	1.5	1.5	1.8	0.2	1.5
航続時間 (h)	12	12	22	8	12
主要観測機器	PSBP (Parametric Sub-Bottom Profiler)	MBES (Multi-Beam Echo Sounder)	MBES (Multi-Beam Echo Sounder)・自然電位計	ステーションカメラ、水温・塩分・濃度・pHセンサー	AUV管制用USBL水中音響測位装置

図-A1 海技研所有海中・海底探査用 AUV の一覧