深海調査に向けた小型軽量航行型 AUV の開発*

今 里 元 信**

金 岡 秀***
大 藪 祐****佐 藤 伊
藤 藤匠***
讓*****Development of Compact and Lightweight Cruising Autonomous Underwater Vehicle
for Deep-Sea Exploration

By Motonobu IMASATO, Kangsoo KIM, Takumi SATO, Yuji OYABU and Yuzuru ITOH

According to recent survey results, potential sites for seabed mineral resources are widely distributed in Japan's territorial waters and exclusive economic zone. Prior to full-scale, commercial development of these seabed mineral resources, it is essential to survey deposits in a highly reliable and accurate manner.

The AUV (Autonomous Underwater Vehicle) is one of the most effective platforms for such purposes, since it makes it possible to maximize the survey and analysis by positioning itself as close to the seabed as possible. In an attempt to enable high-efficiency and high-resolution seabed surveys that can contribute to the future development and exploration of mineral resources, the authors have been working on the research and development of compact and lightweight AUV systems. In this paper, we introduce our state-of-the-art cruising AUV called NMRI C-AUV #04, including the results of its sea trials and the details of its main features.

1. はじめに

平成 26 年に内閣府から戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 次世代海洋資源調査技術 (通称:「海のジバング計画」)¹⁾が立ち上げられた。これは国が主導して民間とともに効率的な調査技術確立することにより、海洋資源調査産業の創出を目指したものである。本計画では、海底熱水鉱床を主とする海底鉱物資源を効率よく調査するシステムおよび関連技術開発が、研究開発の目標として挙げられており、AUV (Autonomous Underwater Vehicle: 自律型無人潜水機) はそれらを実行する中核の調査プラットフォームとして位置づけられた。

筆者らが属している海上技術安全研究所 (以下、海技研) では、AUV 複数運用手法等の研究開発をテーマに本計画に参画し、AUV (航行型およびホバリング型)、洋上中継器の開発等を行っている²⁾。図 1 に AUV 複数運用手法の概要を示す。本手法は、図 1 のように AUV を複数機投入し、海面の洋上中継器で管制することにより、広範囲に高効率で海底鉱物資源探査を行

うことである。筆者らはこれまで主に航行型 AUV の開発および運用に携わってきており、洋上中継器の管制のもと、全長 4m 未満、重量約 700kg の航行型 AUV2 機と重量約 270kg のホバリング型 AUV の同時展開による民間作業船で初の複数機運用を成し遂げた実績を有する³⁾。引き続き航行型 AUV の開発を進めるにあたり、高運動性と優れた安定性を両立することで様々な海域環境において高品位の海底調査を目指した。本報告では、これらの実現に向けて開発した、海技研の

図 1 AUV 複数運用手法

*原稿受付 令和 元年 11 月 11 日。

**正会員 海上・港湾・航空技術研究所(三鷹市新川6-38-1)。

*** 海上・港湾・航空技術研究所。

**** ドミナント・プラス・ワン。

***** 株式会社海洋工学研究所。

航行型 AUV としては 4 機目となる航行型 AUV4 号機の仕様と、試運転における運用および潜航試験の結果などについて述べる。

2. 航行型 AUV4 号機

2.1 航行型 AUV4 号機の開発

筆者らは、航行型 AUV3 号機および 4 号機（ともに同型機）の開発設計に関する検討を平成 28 年 4 月から開始した。先に製作した航行型 AUV1 号機、2 号機²⁾および海外製 AUV⁴⁾を参考に、運用の効率向上のために軽量化、搬出入や移動時における専用台車との固縛、航続時間の拡大、揚収後すぐ次の投入に向けてバッテリーを交換できるための作業時間短縮、故障した際の復旧期間の短縮化などの対策が施されるようにした。約 1 年後に先ず 3 号機が完成し、平成 29 年 8 月から 10 月に実施した 3 号機の実海域潜航試験・調査の結果⁵⁾およびこれまでの AUV の運用経験において蓄積してきた技術・知見等を 4 号機に注ぎ込み、さらに高性能・高安定性に向けて検討、改造等を行いつつ、平成 30 年 3 月に 4 号機の試運転に臨んだ。このように、本機は製作期間に限ると約 1 年という短期間で完成させ、かつ国内で製作したことは大きな意義があると言える。

2.2 仕様と搭載機器

本機の外観を図 2 に、主な仕様と搭載機器を表 1 および表 2 に示す。また本機の特徴を以下に列挙する。

- ・速度制御、深度制御、高度（海底からの高さ）制御による潜航が可能である。
- ・最大速力 6.5 ノット、最大ピッチ角 80 度の高運動性能を持ち、海底急斜面部でも潜航可能である⁶⁾。
- ・航続時間拡大（約 26 時間）に向けて、大容量バッテリーおよびペイロードとしてマルチビーム音響測深機（MBES）の搭載を考慮しつつ、空中重量は約 550kg に収まるように軽量化を心掛けた。
- ・潜航終了時、海面に浮上した際、早期発見のためにフラッシュおよびイリジウムアンテナの展開を要

図 2 航行型 AUV4 号機（主な機器等の搭載場所も記載）

するため、これらは可倒式マストに格納し、潜航調査終了後、海面浮上時にマストが起立できるようにした。これにより艇体抵抗を大幅に減らすことができた。図 3 に本機の投入および海面浮上時の写真を示す。この図より、前方上部のマストの起立状況がわかる。

- ・船尾に約 10m の自然電位探査用曳航索が装着できるため、海底鉱物等が放出する微小な電位差を測定する海底電位差計を取り付ける⁷⁾ことにより、近年海底資源探査の新しい手法として採り入れた負の電位異常の探査⁸⁾が可能である。
- ・ポップアップブイ機能を持っており、スイマーレスによる揚収も可能である。
- ・方位姿勢角センサ（AHRS：姿勢方位基準装置）については、別途国産製の慣性航法装置（INS）を開発し、既搭載機器から載せ換え、実海域潜航試験において性能を確認することができた⁹⁾。
- ・保管時は専用台車に載せて固縛する。専用台車も含めて小型であるため、クレーン付トラックにより搬送が可能である。これまでに本機と専用台車のみ（関連荷物無し）をクレーン付 2t トラックで搬送した実績がある。

表 1 航行型 AUV4 号機の仕様

外寸（全長）	3,900 mm（アイ、プロペラ部、突起物を除く）
外寸（胴径）	φ 650 mm（最大）（アイ、突起物を除く）
重量	約 545 kg（空中）、中性浮力（水中）
航海速力	約 3.6～6.5 knots
航続時間	最大約 26 時間@3.6knots
最大潜航深度	2,000 m
外殻材質	ガラス繊維強化プラスチック（GFRP）
浮力材	シンタックスフォーム
バッテリー	油漬均圧式リチウムイオン電池、12kwh
バラスト	3 個（潜航用・浮上用・緊急用）、8kg/個
制御方式	推進：プロペラ ロール・ピッチ・ヨー：4 枚舵
主機	電動機 SLEEM-G-1000 1.34hp
建造会社	株式会社海洋工学研究所

表 2 航行型 AUV4 号機の搭載機器

	搭載機器名	仕様等
航法装置	深度計	0～4,000m
	水温塩分計	-3～45℃、0.5～70mS/cm
	前方探査ソナー	700kHz
	DVL（Doppler Velocity Log）	300kHz
	方位姿勢角センサ（AHRS：姿勢方位基準装置）	FOG 3 軸ジャイロ
測位・通信装置	音響測位用トランスポンダ	19.5～30.5kHz
	音響通信装置	9～14kHz（LF）
	無線 LAN	
非常用装置	イリジウムアンテナ	可倒式マストに格納
	フラッシュ	
観測装置	MBES（マルチビーム音響測深機）	400kHz
	海中 3 成分磁力計	±70000nT
	海底電位差計 + 曳航索	装着可能

図3 航行型 AUV4 号機の投入時（上）と海面浮上時（下）

3. 航行型 AUV4 号機の運用

3.1 航行型 AUV4 号機の運用準備

実海域潜航試験や海底調査等において航行型 AUV4 号機の運用が決まり次第、搬出までに次節で述べる投入前までの動作確認などを行う。またバッテリーや専用充電器など関連機器および工具等付属品、バラストを用意する。併せて潜航試験・調査中に故障等が発生した場合に備えて、船上など現場で直ちに交換、復旧できるように搭載機器および水中ケーブル等の予備品も用意する。

3.2 航行型 AUV4 号機の運用準備

本機の実海域試験や調査に向けて投入および揚収を行うための主な手順を図4に示す。また各手順における主な作業を以下に列挙する。

(1) 運用前準備

- ・AUV の航路計画を立て、コースデータを作成する。
ここではコースデータとして、目標通過点に緯度経度を座標点とするウェイポイント（航路点）データを用いて作成、設定する。ウェイポイントを利用した誘導方法は、主に航空管制の分野で使われており、世界中の AUV 運用において多く導入されている¹⁰⁾。
- ・ウェイポイントデータの他に深度、高度（海底からの高さ）、速度などの設定も行う。

(2) 運用機器の展開と投入前作業

- ・AUV 起動後、無線 LAN 機器、音響通信装置の展開、作動確認を行う。
- ・作成したコースデータ等の設定ファイルを転送する。
- ・オペレーション用タブレットを用いて、GPS 受信、方位姿勢角センサのアライメント（初期設定）、搭

- 載機器、ペイロードの起動、舵機、スラスタ、バラストリリーサ、マスト起立の作動確認などを行う。
- ・準備完了後、可倒式マストを倒す。
- ・3 箇所のバラストリリーサにそれぞれ潜航用、浮上用、緊急用バラストを装着する。

(3) 潜航中の管制作業

- ・母船上で音響通信装置によるステータスの確認、音響測位装置による AUV 潜航位置の確認を行う。
- ・もし AUV を緊急浮上させたい場合は、音響通信により帰還指令を送ることができる。

(4) 揚収前作業

- ・海面に浮上した際、マスト起立の確認後、無線 LAN 通信を再開し、ミッション終了、アクチュエータの電源 OFF を確認する。これは突然起動すると、そばにいるスイマーがけがをする恐れがあるための措置である。

(5) 揚収後作業

- ・搭載機器のタスク終了を確認する。
- ・艇体制御プログラムを停止する。
- ・航行ログ、ペイロードログを回収する。

(6) その他（当日の試験や調査完了後など）

- ・艇体の保管前に真水で洗浄し、乾燥させる。
- ・バッテリーを交換し、使用済み充電する。
- ・水中ケーブル、コネクタ部等の電蝕有無を確認、点検する。

図4 運用時の主な作業手順

4. 実海域潜航試験

4.1 実施場所と試験内容

完成した航行型 AUV4 号機の試運転を行うにあたり、平成 30 年 3 月末に駿河湾沼津沖の水深約 200m の海域において、実海域潜航試験を実施した。主な試験内容は、ウェイポイント航行、速度制御、深度制御、ロール・ピッチ制御による潜航性能の確認や旋回潜航・浮上等である。また潜航中は、本機の位置および動向を把握するため、母船上で水中音響測位・通信による管制を行った。

4.2 潜航試験結果

本機の実海域試験における潜航試験結果の一例を図 5 から図 10 に示し、各図の結果について以下に述べる。なお、この試験は本機に搭載しているマルチビーム音響測深機のパッチテストの一環として行った。

(1) 航行型 AUV4 号機の航跡

図 5 は本機の航跡結果を示す。図 5 中、白丸印は投入前に設定したウェイポイント、実線は本機の認識した航跡（方位姿勢角センサのログ）、黒三角印は母船に設置した音響測位装置による本機の位置を示す。また矢印と数字は航路順を示す。図 5 より、本機は北から南に向かって目標深度（90m）まで潜航した後（図中上部）、ウェイポイントに沿って航走し、蛇行することなくほぼ直線的に安定航走しており、音響測位装置からも多少北東にずれたものの、的確に位置を捉えられていることがわかる。なお、ウェイポイント間で航跡が少し西側に膨らんでいるのは、潮流の影響を受けたためと考えられる。また図 6 に南端で折り返した時の航跡を示す。図 6 は図 5 中の矢印 5 から矢印 6 への時計回りの旋回を拡大表示したものであり、この図より、本機の折り返し時の旋回半径は、艇体全長の約 3 倍である 12m 弱で非常に優れた旋回性能を持っていることが確認できた。

(2) 深度

図 7 は本機の深度の時間変化を示す。図 7 中、実線は本機の現在の深度、破線は本機へ指令として与えた深度を表す。この試験では深度 90m へ到達後、深度 30m まで上昇し、再度深度 90m まで下降する潜航を繰り返すように深度制御を設定している。図 7 より、深度指令値に対して、本機の実測値が追従するように潜航していることがわかる。

(3) ピッチ角

図 8 は本機のピッチ角の時間変化を示す。図 8 中、

実線は本機の現在のピッチ角、破線は本機へ指令として与えたピッチ角を表す。ここでピッチ角の正(+)は、本機の船首が上がっていることを示す。図 8 より、ピッチ角指令値に対して、本機の実測値が追従していることがわかる。また図 7 と図 8 から、上昇下降時に本機のピッチ角の正負が対応していることもわかる。なお本機は前述のとおり、最大ピッチ角 80 度の高運動性能を持つが、ここではマルチビーム音響測深機の取得データの品質を保持する上でピッチ角を安定させることが重要であったため、ピッチ角の指令値を最大 25 度に制限した。

(4) ロール角

図 9 は本機のロール角の時間変化を示す。ロールもピッチと同様に艇体のロール角が 0 度付近で安定して潜航することが望ましい。ここでロール角の正(+)は、本機の左舷側が上がっていることを示す。図 9 からわかるように、本機は旋回時を除いて約 0.8 度で概ね一定のロール姿勢を保持できていることから、ここではロールに対してピッチとは異なり、常に 0 度に近い姿勢を保持するためにレギュレータ制御を行った旨を付記する。

(5) 海底地形観測

マルチビーム音響測深機のパッチテストの一環として海底地形を観測したので、その結果を図 10 に示す。図 10 中の水深は、それぞれ下方（南）で約 120m、上方（北）で約 190m と北方向に海底地形が下っている。この図より、海底傾斜面に対して 1m 分解能の高解像度の海底地形が滑らかに表示されている。これは、本機がこれまでの結果で述べたとおり、非常に安定した潜航を実現しており、ロール、ピッチから受ける影響が少なかったことから、連続スキャンがスムーズに行えられたためと考えられる。この観点からも、揚収後のデータ処理（後処理）を行う上で作業効率の向上が見込まれる。

4.3 まとめ

本機の完成後、試運転の一環として駿河湾にて実海域潜航試験を実施した。その結果、本機は高運動性能、高安定性で潜航していることが確認できた。さらには本機に搭載しているマルチビーム音響測深機による海底地形観測から、鮮明な海底地形図を得ることができた。引き続き、実海域潜航試験・調査を繰り返す行い、広範囲観測および作業効率の向上を目指す。なお本機は今回の実海域試験後から早速多方面で活用しており、これまでの潜航総時間は約 51 時間（2019 年 7 月末時点）となっている。

図5 航行型 AUV4 号機の航跡

図6 南端における折り返し時の航跡

図7 深度の時間変化

図8 ピッチ角の時間変化

図9 ロール角の時間変化

 図10 マルチビーム音響測深機による観測結果
(図中の白数字は深度を示す)

5. おわりに

本報告では、開発した航行型 AUV4 号機に関する仕様、運用方法および試運転による実海域潜航試験の実施などについて述べた。これらの結果、潜航性能につ

いて高運動性能かつ高安定性を保つことが確認できたとともに、精度の高い海底地形図を得ることができた。引き続き、実海域潜航調査において高効率で海底地形形状等の取得に役立てられると期待する。併せて本機はシップ・オブ・ザ・イヤー 2018 海洋構造物・海洋機器部門賞¹¹⁾を頂いた旨を付記する。

謝辞

本研究は、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 次世代海洋資源調査技術 (海のジパング計画, 管理法人: JAMSTEC) の一環として行われました。SIP 関係者各位に厚く御礼申し上げます。また本機の開発から完成に至るまで、海技研の浦環フェロー、田村兼吉研究統括監 (役職は共に研究当時) には多大なるご教示とご支援を頂きました。併せて海技研の井上俊司特別研究主幹をはじめプロジェクトチームのメンバーには様々なご配慮を頂きました。さらに駿河湾潜航試験では、一般社団法人海洋調査協会、株式会社オキシテック、日本海洋事業株式会社の方々にご協力頂きました。関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 浦辺: 沿岸域学会誌, 29-4 (2017), 10-18.
- 2) K. Kim, et al.: Proc. of the OTC Asia 2016 (2016), OTC-26702-MS.
- 3) 金: 第 17 回海技研研究発表会 (2017), 130-139.
- 4) 例えば HUGIN ホームページ:
<https://www.kongsberg.com/maritime/products/marine-robotics/autonomous-underwater-vehicles/AUV-hugin/> (参照日 2019 年 8 月 26 日)
- 5) T. Sato, et al.: Proc. of MTS/IEEE Oceans '18 (2018).
- 6) T. Sato, et al.: Proc. of UT2019 (2019).
- 7) 平尾ほか: 第 19 回海技研研究発表会 (2019), 138-139.
- 8) Y. Kawada, et al.: Scientific Reports, 7 (2017), 13552
- 9) 児子ほか: 第 61 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2017), JSASS-2017-4623.
- 10) 金ほか: 第 19 回海技研研究発表会 (2019), 31-34.
- 11) シップ・オブ・ザ・イヤー 2018: 日本船舶海洋工学会誌, 85 (2019).