

SIP 第1期「次世代海洋資源調査技術」での成果

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

Achievements of 1st Term SIP Project: Next-generation Technology for Ocean Resource Exploration

by

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

Abstract

This paper reviews the achievements of the 1st Term Strategic Innovation Promotion Program (SIP) project conducted by the National Maritime Research Institute (NMRI) in Japan. Between 2014 and 2019, NMRI participated in a nationwide R&D project SIP, titled "Next-generation Technology for Ocean Resources Exploration," which is also referred to as the "Zipangu in the Sea" project. Consisting of 11 individual projects, SIP is a cross-ministerial initiative coordinated by the cabinet office of the Japanese government. In SIP, ocean development is regarded as one of the most important issues towards the formulation and implementation of a revitalization strategy for Japan. In the Zipangu in the Sea project, core technologies for exploring, investigating, monitoring, protecting, and developing benthic mineral resources were developed by an R&D alliance made up of seven national institutes. As a leading member of the alliance, NMRI engaged in the development of advanced undersea survey systems and technologies essential for achieving the goal of the project. The key concept of the systems developed by NMRI is the use of multiple AUVs to conduct simultaneous undersea survey missions. In this paper, we summarize the NMRI's R&D activities in the 1st Term SIP, focusing on the development of multiple AUV-based bottom survey systems, as well as the results of actual at-sea deployment.

* 海洋先端技術系, ** 企画部

原稿受付 令和4年1月27日

審査日 令和4年3月4日

目 次

1. はじめに	2
2. 無人型海底調査ユニット	2
3. 運用技術	4
3.1 航法	4
3.2 着水・揚収	5
3.3 音響通信・測位	5
4. 海底調査実例	5
4.1 駿河湾 5 機同時運用試験	5
5. まとめ	7
謝 辞	7
References	7

1. はじめに

海洋利用に向けた次世代の海中・海底調査プラットフォームとして、AUV(Autonomous Underwater Vehicle)はここ 30 年、海洋科学・工学やロボティクス分野を中心に、急速な進歩を遂げた。AUV は従来ダイバーや ROV による対応が困難とされてきた水中環境における広域調査等においてその有用性を発揮しており、こうした任務としては、深海底の高精度探査や氷海域の海中調査などが代表例として挙げられる^{1,2)}。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（以下、海技研）は、AUV 複数運用手法等の研究開発をテーマとして、内閣府の主管で 2014 年度に立ち上げられた戦略的イノベーション創造プログラム(Strategic Innovation promotion Program: SIP)第 1 期の「次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）」に参画した^{3,4)}。以下は、海のジパング計画における海技研の主要研究開発課題である。

- 1) 複数機の AUV とその管制機として洋上中継機と呼ばれる ASV(Autonomous Surface Vehicle)を開発し、無人型の海底調査ユニットを構築する。
- 2) 上記の調査ユニットと関連機器・装備を用い、高効率で海底の調査が行えるシステム運用技術を開発する。
- 3) 開発した海底調査ユニット及びその運用技術の有効性を実海域試験を通じて検証し、運用技術を海洋調査関連の企業等の民間に移転することで、産業ベースで成立するような複数 AUV 同時運用に基づく高効率・高精度の海底鉱物資源調査の土台を作る。

本稿ではこれらの課題を中心とし、2019 年までの 5 年間の研究開発を通じて、海技研がやり遂げた成果を総括して報告する。

2. 無人型海底調査ユニット

前述の AUV 複数運用手法等の研究開発では、熱水鉱床など海底鉱物資源の高効率・高精度な調査技術の確立を目指し、ASV と複数の AUV を主軸とした無人型海底調査ユニットと、その運用技術を研究・開発した。複数の AUV を同時に運用する最大の目的は調査効率の向上で、調査機の高速度が困難な海洋調査ならではのアプローチである。海洋調査にかかる費用のうち最大の割合を占めるのが傭船料である。従来、単機の AUV を運用していた作業船で複数の AUV が同時に運用できれば、同じ傭船料で単位時間当たりの調査面積は機数倍に増加することとなり、調査面積 / 費用の効率は飛躍的に向上する。ところが、こうした高効率運用を実現するには AUV を従来より大幅に小型・軽量化しなければならない。SIP 第 1 期で海技研は全 5 機の AUV と NMRI 半没水型洋

上中継器 (以下, 洋上中継機) と呼ばれる 1 機の ASV を開発しており (図 1), 何れも全長 4m 以下, 重量 800kg 以下の小型・軽量化を達成した (表 1). また, 専用の支援母船を必要としないため, 例えば, 数トン級のクレーンを装備した作業船でも運用可能な汎用性を確保している (図 2).

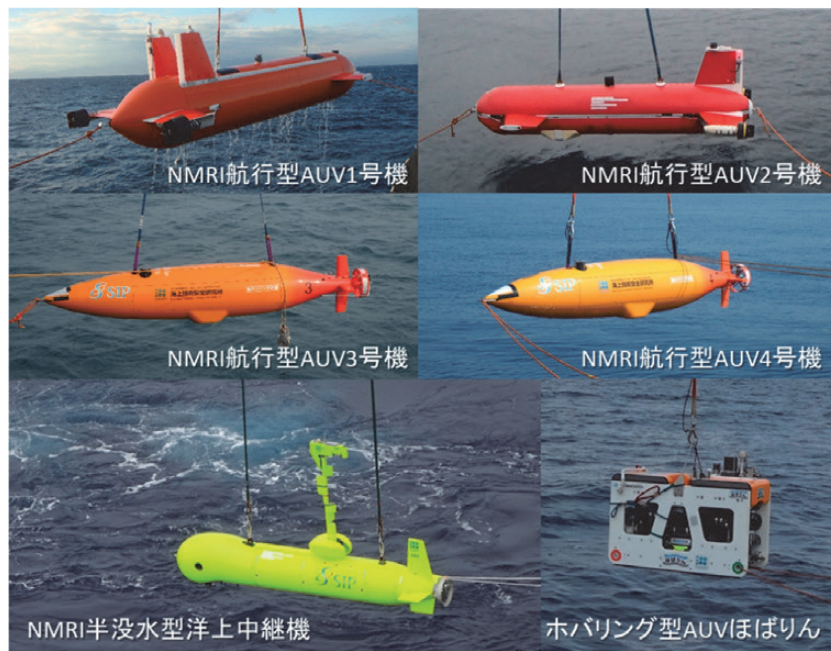


図 1 海技研が開発して運用している AUV 及び ASV.

表 1 海技研 AUV 及び ASV の仕様.

名称	主要目(m)	重量(kg)	深度(m)	速力(m/s) 巡航/最大	観測装置
NMRI 航行型 AUV1 号機	3.9L×0.65φ	780	2000	1.5 / 2.1	Parametric Sub-Bottom Profiler (PSBP)
NMRI 航行型 AUV2 号機	3.6L×0.6φ	620	2000	1.5 / 2.1	Multi-Beam Echo Sounder (MBES)
NMRI 航行型 AUV3, 4 号機	3.9L×0.65φ	545	2000	1.8 / 3.3	Multi-Beam Echo Sounder (MBES)
ホバリング型 AUV ほばりん	1.2L×0.7B×0.8H	270	2000	0.2 / 0.7	カメラ, pH センサー, Conductivity, Depth, and Temperature (CTD)
NMRI 半没水型洋上中継機	4.0×0.6φ	730	-	1.5 / 2.1	-

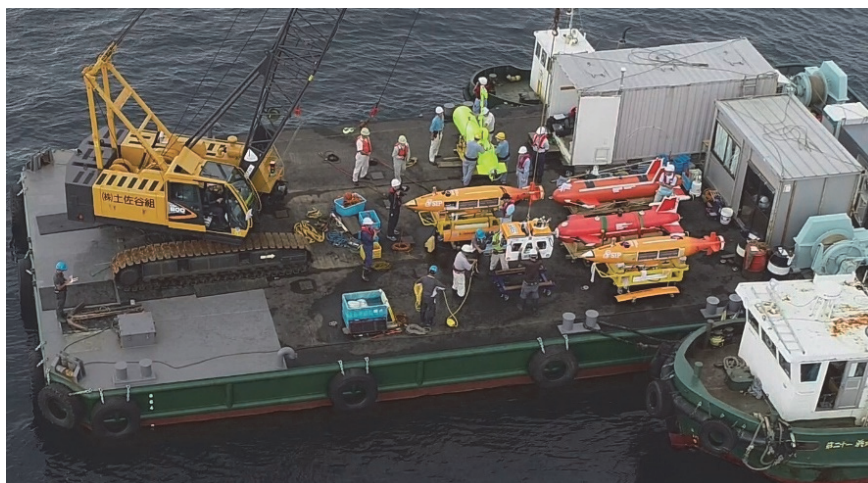


図 2 土木作業用小型台船による複数 AUV 同時運用の様子.

3. 運用技術

複数 AUV 同時運用の実現に向け、海技研は SIP 第 1 期にて航法、着水・揚収および音響測位・通信の分野を中心に新たな運用技術を開発し、実機による実海域潜航に適用した。

3.1 航法

図 3 にマルチレイヤー航法の概念を示す。同航法は、海技研初の複数 AUV 同時運用（2016 年 9 月）の際に適用され、以降、異種の観測装置を持つ複数の航行型 AUV に用いられている。マルチレイヤー航法では目標深度（高度）に差分 Δz を設けた同じ平面経路に複数の AUV を同時に走らせる。こうした航法により複数機の航行中水平位置が一定の範囲内に抑えられ、同時管制が格段に容易になることから、多種の観測機器から多様な情報が同時に収集できる。マルチレイヤー航法を適用した複数 AUV 実海域同時運用の実例を、調査海域の海底地形に計画測線およびウェイポイント(Waypoint: WP)を重ね合わせた図 4 に示す。マルチレイヤー航法により異種の観測装置を持つ NMRI 航行型 AUV 1,2 号機が調査海域の東側を観測している際、2 号機と同じ観測装置を持つ 3 号機は別の測線を航走しながら海域の西側を調査する。一方、全機管理体制を構築すべく、洋上中継機は東西を行き来しながら 1,2 号機ペアと 3 号機へ交互に音響管制体制を提供する。

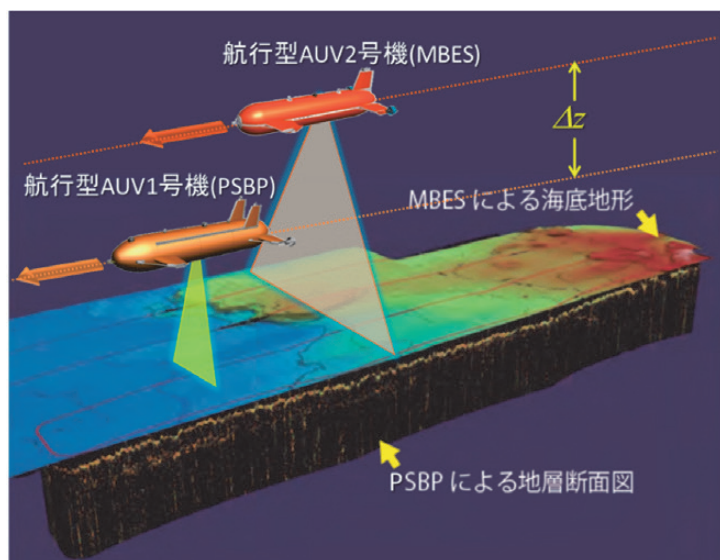


図 3 マルチレイヤー航法による海底調査.

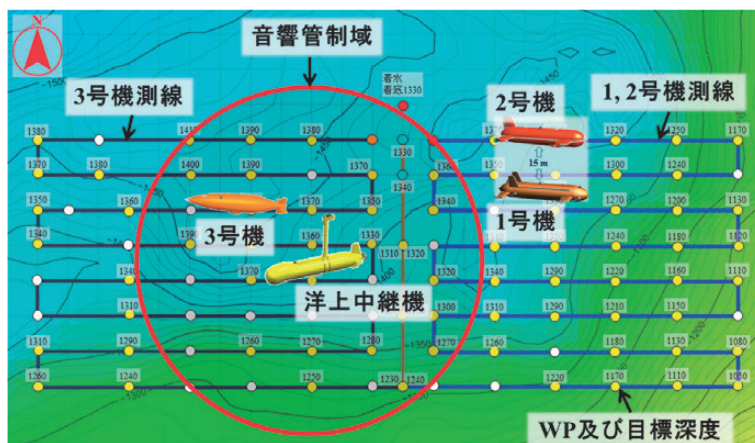


図 4 マルチレイヤー航法を適用した複数 AUV 実海域同時運用の実例.

3.2 着水・揚収

航空事故の約8割が離着陸時に発生すると知られているが、AUV運用においても着水・揚収時に衝突、接触、落下、漂流など様々な事故のリスクが最も高まる。そのため、着水・揚収作業はまず海象条件をもとにその可否を判断し、徹底した安全確認の上、慎重に行う。ところが、AUVの揚収・回収に不可欠なクレーンや作業艇(図5)は、通常一隻の支援船に一式しか備わっておらず、複数機を同時に着水・揚収することは困難である。そのため、複数機のAUVを同時に運用する際は1機の揚収・回収に必要な時間を考慮し、各AUVが十分な時差で順次に海面に上がってくるよう、各AUVの浮上時刻を調整しておく必要がある。こうした場合に有用に使えるのが、AUVを海底付近で一定時間待機させる言わば海底待機である。海底待機中のAUVは指定した基準点を中心に、指定した時刻まで指定半径の定常旋回を続ける。海底待機は複数機の動作開始を同期させる場合も非常に有用で、複数機の水平面内位置がばらつくことを抑制し、複数機の音響管制をより容易にする。

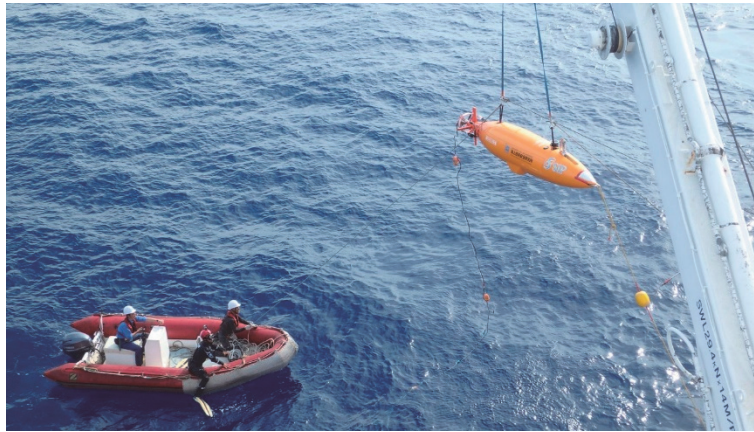


図5 AUV揚収作業の様子。

3.3 音響通信・測位

水中通信や測位に使われる音波の周波数は、所望する伝搬距離やデータ転送率、また音響干渉を避けるため観測等に使われる他の音響機器の周波数等を考慮して決める。海技研の無人型海洋調査ユニットでは測位に19.5 kHz ~ 30.3 kHz、通信に8.96 ~ 14.03 kHz帯域の音響信号を用いており、有効伝搬距離は測位で約4000m、通信では約6000mとなる。一方、複数AUVの同時運用では音響通信・測位の稼働環境も1機単独運用とは大きく異なり、一つの船上局(ASV)が複数の水中局(AUV)と交信するため、言わば多元接続を具現化しなければならない。水中機器の運用において音響通信・測位は欠かせない管理手段で、高い信頼性、安定性および有効性が要求される。海技研の音響測位・通信システムでは時分割多元接続を基本とし、コード分割多元接続を併用することで多重波伝播や残響などによる混信や誤識別の防止を図っている。

4. 海底調査実例

4.1 駿河湾5機同時運用試験

本試験は、海のジパング計画で掲げられていた民間への技術移転の一環として2018年7月に実施され、AUVの運用は民間の海洋調査会社からなる団体である一般社団法人海洋調査協会(以下、海調協)が担当した。静岡県沼津市沖合の駿河湾で行われた本試験では、海技研がこれまで開発して保有していた5機のAUV全機を同時に展開し、運用することに初めて挑んだ。5機ものAUVを同時に運用するには、音響通信・測位を用いて全機が同時に管理できる体制を整えなければならない。こうした管理体制の構築に最も有力な手段の一つが、全機の行動を統一させることである。ところが、異なるミッションが求められ、その結果様々な機体特性や仕様を持つAUVの行動を統一させることは容易でなく、ミッション達成の観点からも望ましくない。こうした実情を踏まえ、本試験では全機の行動を統一させる代わりに、行動開始時刻のみを統一させる、すなわち、行動開始を同期させる

手法で、各機の機体特性や与えられたミッションを損なうことなく、全機管理体制を整えた。

図6に本試験で適用したAUV5機それぞれの計画測線、ウェイポイント及び音響測位によりリアルタイムで捉えた各機の現在位置を示す。運用技術の現場適用および検証を最優先としたベンチマーク・テスト的な試験ではあるものの、本試験の成功により、複数AUV同時運用の実現に向けて海技研が取り組んできた研究・開発が、有効であることを証明することができた。図7は航行型AUV2～4号機によるMBES (Multi-Beam Echo Sounder) 計測の結果を合わせて作成した高解像度海底地形図である。



図6 AUV 5機同時運用時の計画測線、WP及び音響測位で捉えた各機の現在位置。

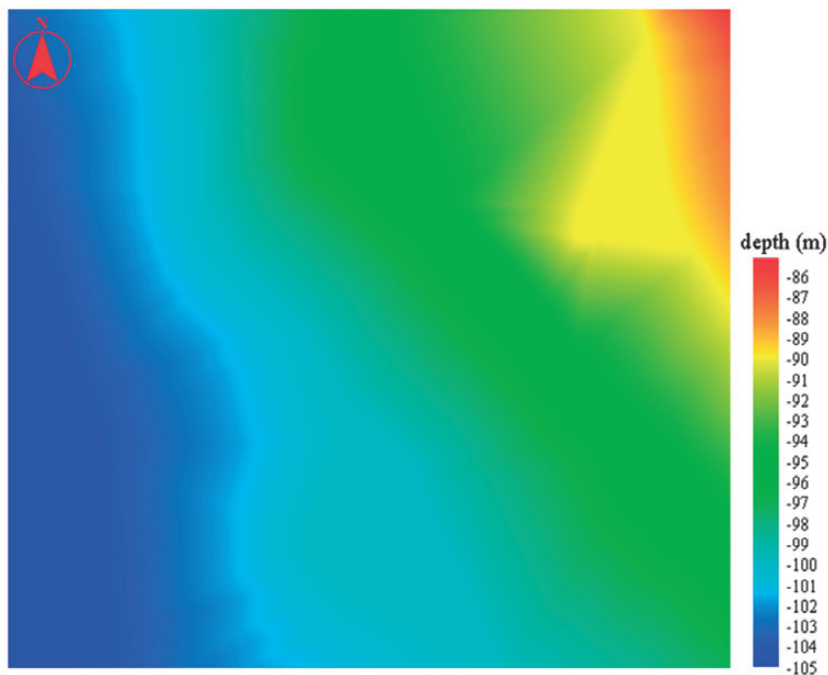


図7 AUV 5機同時運用により取得した高解像度海底地形。

5. まとめ

本稿では海技研が2014年度から5年間参画したSIP海のジパング計画を顧み、研究開発の成果をまとめて紹介した。SIP海のジパング計画は主管官庁である内閣府はもちろん、社会・国民からも今後への期待を込めた高い評価を受け、2019年3月をもって無事に終了した。こうした成果を踏まえ、海技研は現在複数AUV隊列制御技術の研究・開発を主たるテーマとし、SIP第2期の「革新的深海資源調査技術」に参画している^{5,6)}。これはSIP第1期の成果を更に進化させる取り組みで、より機能的で実践的な複数AUV同時運用技術を開発し実装することで、先進的な海底資源調査に資する基盤技術の導出を目指している。

謝辞

本研究は、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）「次世代海洋資源調査技術」（管理法人：JAMSTEC）から助成を受けました。また、海技研の浦環フェロー、田村兼吉研究統括監（役職は研究当時）からは、多大なるご指導を頂きました。また、実海域試験に関連しまして、（社）海洋調査協会の皆様から多大なるご支援を頂きました。関係各位には御礼申し上げます。

References

- 1) Nicholson, J. W. and Healey, A. J.: The Present State of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Applications and Technologies, Marine Technology Society Journal, Vol. 42(2008), pp. 44-51.
- 2) Wynn, R. B. et al.: Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their Past, Present and Future Contributions to the Advancement of Marine Geoscience. Marine Geology, 352(2014), pp. 451-468.
- 3) Kim, K. et al.: Simultaneous Multi-AUV Operation as Real Practice - High-efficiency and High-definition Bottom Survey in Izu Islands, Marine Engineering, Vol.56, No.1(2021), pp. 132-138. (in Japanese)
- 4) Kim, K. and Tamura, K.: The Zipangu of the Sea Project Overview: Focusing on the R&D for Simultaneous Deployment and Operation of Multiple AUVs, Proc. Offshore Technology Conference Asia, Kuala Lumpur, OTC-26702-MS(2016).
- 5) Fujiwara, T. et al.: Latest Development Information on NMRI AUV, The Report of the National Maritime Research Institute, Vol.21(2021), pp. 13-18. (in Japanese)
- 6) Fujiwara, T. et al.: Sea Trials Summarization on Fundamental Formation Control of Multiple Cruising AUVs, Proc. ASME 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2021-61483(2021), pp. 1-9.