

## SIP 第2期「革新的深海資源調査技術」での成果

藤原 敏文\*, 金 岡秀\*, 篠野 雅彦\*, 関口 秀紀\*\*  
今里 元信\*, 岡本 章裕\*, 佐藤 匠\*, 稲葉 祥梧\*  
谷口 友基\*, 平尾 春華\*, 梅田 隼\*, 瀧本 忠教\*\*\*

### **Achievements of 2<sup>nd</sup> Term SIP Project: Innovative Technology for Exploration of Deep Sea Resources**

by

FUJIWARA Toshifumi, KIM Kangsoo, SASANO Masahiko, SEKIGUCHI Hidenori  
IMASATO Motonobu, OKAMOTO Akihiro, SATO Takumi, INABA Shogo  
TANIGUCHI Tomoki, HIRAO Shunka C., UMEDA Jun, and TAKIMOTO Tadanori

#### Abstract

The National Maritime Research Institute (NMRI) in Japan has been studying the development of multi-vehicle operation technology for autonomous underwater vehicles (AUVs) and autonomous surface vehicles (ASVs) to enhance their efficiency. The studies were conducted through our participation in the 2<sup>nd</sup> term SIP project (SIP2) "Innovative Technology for Exploration of Deep Sea Resources." In SIP2, NMRI has been actively developing a more advanced control system for AUVs in collaboration with the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC). Seafloor topography mappings were successfully conducted along the coast in Japan using the control systems with AUVs as test trials. In addition, a 1.8-m mini-AUV was constructed as a testbed for improving control systems, and a basic control system for the mini-AUV and AUVs using the Robot Operating System middleware was developed. The nonlinear model predictive control was applied with AUVs for advanced control of arrival time at waypoints and positions. The results of the project are reported and summarized in this paper.

---

\* 海洋先端技術系, \*\* 環境・動力系 (研究当時海洋先端技術系), \*\*\* 企画部

原稿受付 令和4年1月26日

審査日 令和4年2月21日

## 目 次

1. はじめに	10
2. SIP 第2期プログラム	10
3. 海技研の取り組み	12
3.1 隊列制御システムと実海域実証試験	12
3.2 小型 AUV の開発	14
3.3 AUV 制御ソフトウェア開発	14
4. おわりに	15
謝 辞	15
References	15

## 1. はじめに

海洋資源探査を無人で短時間、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。このとき、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) 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 (海のジバング計画)」(2014~2018年)<sup>1)</sup>に引き続き、第2期プログラム「革新的深海資源調査技術」(管理法人は共に国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC))<sup>2)</sup>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 隊列制御技術の開発を行っている<sup>3,4)</sup>。新たな複数機 AUV の隊列制御システムを構築するとともに、小型 AUV の開発、AUV の制御・運用プログラム、および航行状態を最適化するための高度な制御アルゴリズムの検討を実施した。

本稿ではこれらの内容を総括して報告する。

## 2. SIP 第2期プログラム

SIP 第2期 (SIP2 とも記載) の研究開発の主要目標は、有望と目されるもののまだ世界的にも未着手となっているレアアース泥を含む海洋鉱物資源を取得するための技術開発を行うことである (図1)<sup>2)</sup>。未だ解明できていない南鳥島海域のレアアース泥の概略資源量評価に必要な調査を行うとともに、資源量調査で明らかになったレアアース泥濃集帯に対し、深海底から船上にレアアース濃集部分を揚泥する技術開発を行う。さらに今後、より一層効率的に稼働できる AUV 複数機同時運用システムを構築し、レアアース泥等の広域深海鉱物資源開発に必要な技術を確立するべく研究開発を進める。その成果を民間への技術移転を行うとともに、現行の技術では不可能な深海鉱物資源の採泥・揚泥を可能とする技術を世界に先駆けて確立することを目指す。

SIP 第2期の研究開発は、以下の調査・分析、技術開発、システム実証と大きく3つに分けられた4テーマで進めている (図2)。

- (A) テーマ1: レアアース泥を含む海洋鉱物資源の賦存量の調査・分析
- (B) テーマ2-1: 深海資源調査技術の開発 (深海 AUV 複数運用技術, 深海底ターミナル技術)
- (C) テーマ2-2: 深海資源生産技術の開発 (レアアース泥の採泥・揚泥技術)
- (D) テーマ3: 深海資源調査・開発システムの実証

その中で海技研が関連する研究課題は、テーマ2-1の深海 AUV 複数運用技術である。テーマ2-1の全体計画としては、水深6,000m以浅の海域 (我が国のEEZの94%を占める) において、精密な海底地形や海底下構造を複

数 AUV で効率的に調査できる深海 AUV 複数運用技術や長期間安定に調査可能な深海底ターミナル技術を開発し、社会実装可能な深海資源調査システムを構築することとしている。中でも海技研が担当する課題である深海 AUV 複数運用技術に関しては、5機の AUV の複数機同時運用を実証し、10機運用のための技術的な目処を立てることが要請されている。

### SIP「革新的深海資源調査技術」課題概要

<b>目指す姿</b>	
<b>概要</b>	
SIP第1期「次世代海洋資源調査技術」における水深2,000m以浅の海底熱水鉱床を主な対象とした成果を活用し、これらの技術を段階的に(Step by Step)発展・応用させ、基礎・基盤研究から事業化・実用化までを見据え、2,000m以深での深海資源調査技術、回収技術を世界に先駆けて確立・実証するとともに社会実装の明確な見通しを得る。	
<b>目標</b>	
深海資源の調査能力を飛躍的(30倍以上)に向上させ、水深6,000m以浅の海域(我が国のEEZの94%を占める)の調査を可能とする世界最先端調査システムを開発し、民間への技術移転を行う。 現行の技術では不可能な深海鉱物資源の採掘・揚泥を可能とする技術を世界に先駆けて確立する。	
<b>出口戦略</b>	<b>社会経済インパクト</b>
開発した要素技術*のシステム統合を図り、最終年度までに実証を行う。民間企業に戦略的に移転することにより、「深海資源の産業化モデルの構築」に道筋をつけ、SIP終了後に国内外から様々な海洋調査等を受託。	<ul style="list-style-type: none"> <li>●我が国のEEZにおいて、初めての深海資源開発に目処</li> <li>●安全保障の観点からも、海洋資源の権益確保に貢献</li> <li>●スピンオフの創出により、幅広い分野への応用が可能となる</li> </ul> <small>* (AUV技術：水中通信・測位・誘導・充電技術、揚泥・採泥技術等)</small>
<b>達成に向けて</b>	
<b>研究開発内容</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>●<b>テーマ1：レアース泥を含む海洋鉱物資源の賦存量の調査・分析</b> ⇒海洋鉱物資源の賦存量の調査・分析により高濃度分布域における開発ポテンシャルエリアの絞り込み</li> <li>●<b>テーマ2：水深2,000m以深の深海資源調査技術・生産技術の開発</b> ⇒2-(1)：深海資源調査技術の開発 (深海AUV複数運用技術、深海底ターミナル技術) 社会実装可能な深海資源調査システム構築のための技術開発 ⇒2-(2)：深海資源生産技術の開発 (レアース泥の採掘、揚泥技術)</li> <li>●<b>テーマ3：深海資源調査・開発システムの実証</b> ⇒テーマ1、テーマ2の成果に加えてSIP第1期の成果を活用し、社会実装、資源調査、開発の促進を目指した深海資源調査システムの実証を実施</li> </ul>	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">第1期SIP (2000m以浅)</div> <div style="font-size: 2em; color: green;">→</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">第2期SIP (2000m以深)</div> </div>	
関係府省：内閣府、総務省、文部科学省、農林水産省、経済産業省、国土交通省、環境省、防衛省（防衛装備庁）	

図1 SIP2 プログラム課題概要<sup>2)</sup>

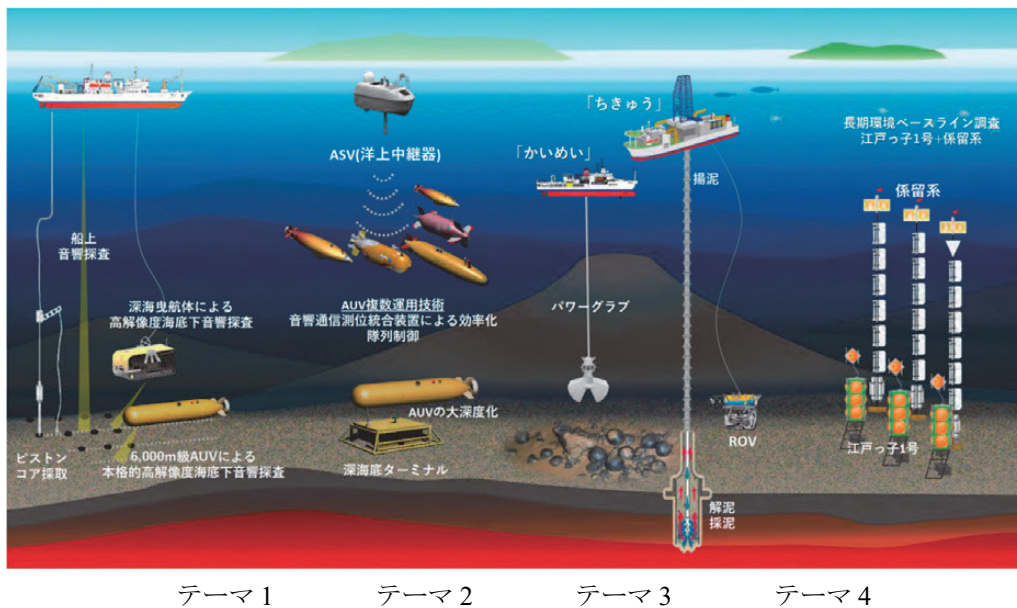


図2 SIP2 プログラム実施イメージ<sup>2)</sup>

### 3. 海技研の取り組み

#### 3.1 隊列制御システムと実海域実証試験

海技研が実施する研究の具体的内容は、複数 AUV で効率的に調査できる深海 AUV 複数運用技術を実現するために隊列制御アルゴリズムの検討、および実海域にてアルゴリズムの有効性を実証することである。その際、開発するアルゴリズムは 6000m 水深でも利用可能な体系とし、使用 AUV の耐水深制約から 2000m 以浅の海域で試験を行うことにした。

このような目標を達成するために、これまでに以下の研究を行っている（図3）<sup>3-6</sup>。

- ・ 2018 年度：隊列制御アルゴリズムの作成、およびコンピュータ上での数値シミュレーションによりアルゴリズムの有効性を確認（リーダー・フォロワー制御、図4（詳細は後述、以下同じ））
- ・ 2019 年度：水深 1,000m 以浅の実海域において 2 機の AUV により隊列制御の実証試験を実施（リーダー・フォロワー制御）
- ・ 2020 年度：水深 1,000m 以浅の実海域において 3 機の AUV により隊列制御の実証試験を実施。さらに、AUV-AUV 測位・通信方法を用いた群制御アルゴリズムの開発を実施（統括監視・制御）
- ・ 2021 年度：他機関も含めた 5 機の AUV を使用して、JAMSTEC 開発の音響通信・測位統合装置を搭載し、隊列制御システムの作動有効性を確認（陸上検証、統括監視・制御）。また、AUV-AUV 測位・通信方法を用いた群制御アルゴリズムを AUV に搭載し、有効性を検証
- ・ 2022 年度：引き続き JAMSTEC と協力して他機関も含めた 5 機の AUV を使用して水深 2,000m 以浅海域での隊列制御システム運用実証試験を実施（統括監視・制御）

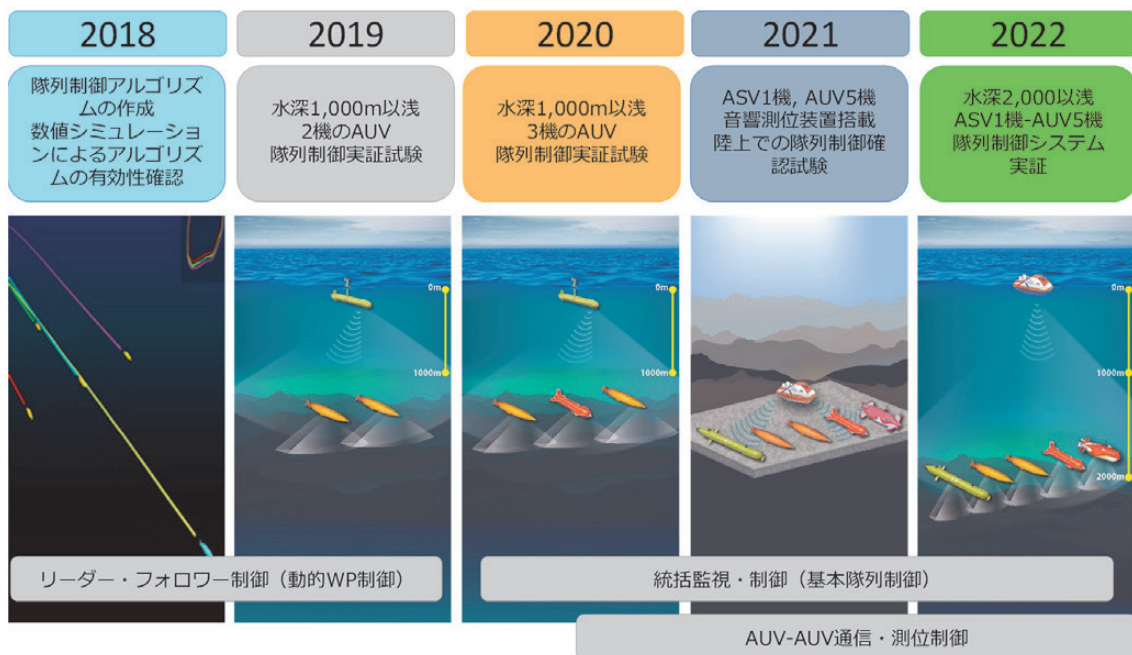


図3 SIP2 隊列制御技術開発の年度展開

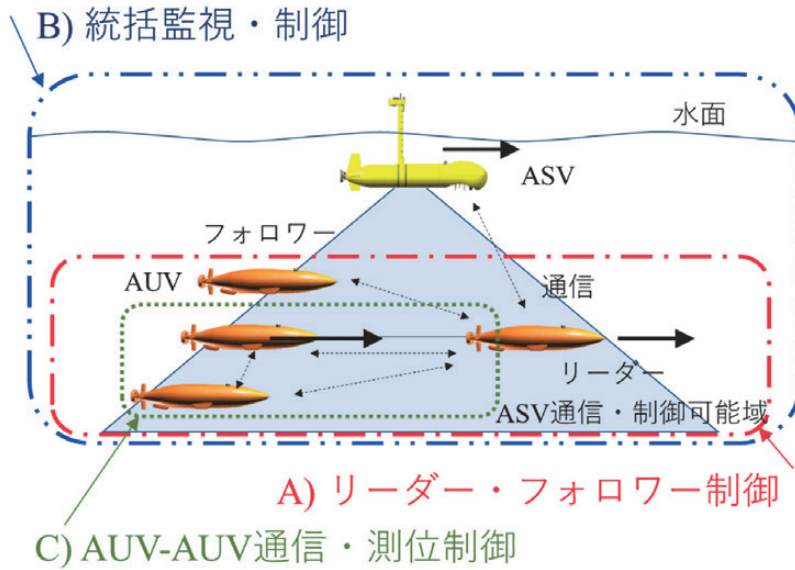


図4 海技研で開発・実施した隊列制御手法の概念

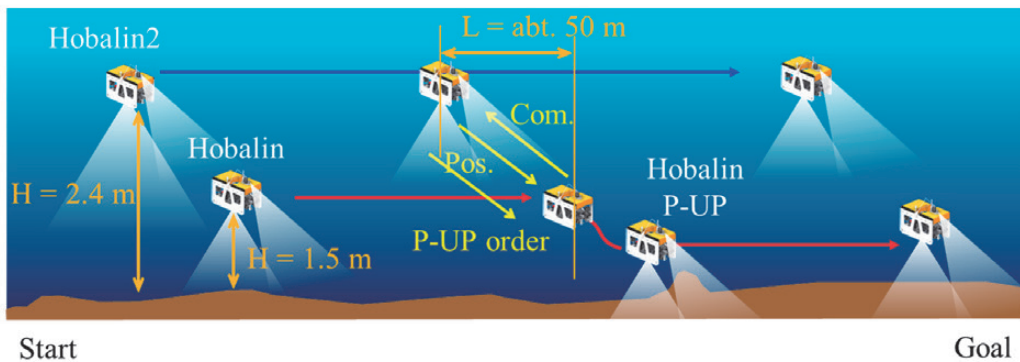


図5 海技研ホバリング型 AUV “ほばりん”、“ほばりん2”を使った AUV-AUV 測位・通信試験の概念図（駿河湾で実施）

現状、欧州における世界最先端の AUV 複数機運用技術は AUV1 機に対し、必ず ASV が 1 機必要となるシステムとして構築されている。一方、SIP 第 1 期では、ASV1 機で複数の AUV を交互に制御・測位して運用するシステム構築を行ったが、この手法では機数が増えると制御・測位に遅延が生じ、制御困難な状況が生じる。このことにより、運用効率の低下、AUV 同士の衝突等、不測の事態が生じる恐れがある。そこで、ASV1 機に対して複数の AUV を「交互」ではなく同時に測位・制御可能な統合化システムを開発することを目標としている。

この目標に向けて本研究開発で実施している内容を総括して図 4 に示す。1 つ目は、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。これまでの運航が、AUV 投入前にプログラムされ航行中に変更されることが無い静的な指示点（ウェイポイント、WP）に基づき単純航行する方式であったことに対して、時々刻々 WP が指示される方式であることから動的 WP 制御と呼称している。2 つ目は、ASV が AUV 全体を統括監視・制御（図中 B、基本隊列制御と呼称）するシステムで、ASV の観測域から外れる、または位置的不具合を確認した場合に、対象とする AUV に指示する方策である。3 つ目としては、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・測位制御（図中 C）として示す。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。

さらに同時並行的に AUV-AUV 測位・通信方法を用いた群制御アルゴリズムの開発を行っており（図 5）、本技術の確立により将来的に多数 AUV を運用する際の安全性・運用効率が格段に向上する。現状、数キロに渡るストリーマ（センサ内蔵のケーブル）を展開するような海底地質探査（電磁探査等）に対しても、AUV-AUV 間の

距離をコントロールすることで、長大なストリーマに代わり AUV のみで容易に探査できる可能性がある。また、AUV 複数運用技術が未だ確立されていない、我が国の民間海洋調査会社等への実装が可能となり、深海調査活動の経済性が飛躍的に向上する。また、水産、土木建設等への技術展開、新たな産業振興が期待できる。

### 3. 2 小型 AUV の開発

隊列制御アルゴリズムの妥当性を海技研内水槽等で実証するために用いる小型航行型 AUV（隊列制御アルゴリズム実証用 AUV、mini-AUV と呼称）の設計・製作を行った<sup>7)</sup>。海技研内の水槽において制御航行を可能とするため、長さ 1.8m、重さ 32.5kg と海技研所有の実海域観測用 AUV（全長：約 4m、胴直径：約 0.6m、艇体総重量：約 700kg）より大幅な小型・軽量化を行った。また、開発した隊列制御アルゴリズムを実機 AUV にも容易に実装できるようにするため、実機 AUV と同様の通信・航海装置等を搭載した。

図 6 左は、mini-AUV の外観・搭載機器配置図（円筒型断面 4 翼艇体）、同右は概観写真を示す。1 スラスター、4 舵の航行型で、実海域での運用も可能である（使用可能水深は 100m）。

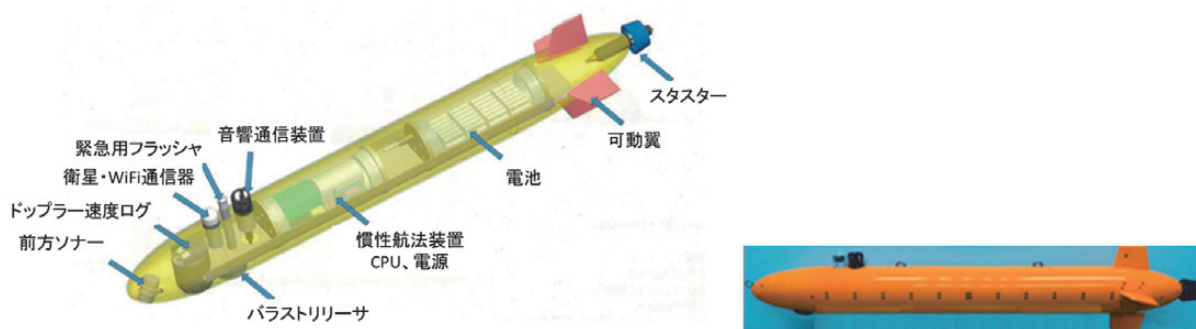


図 6 隊列制御アルゴリズム実証用 AUV の搭載機器配置図・外観

### 3. 3 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 7）<sup>7)</sup>。本システムは、mini-AUV および海技研所有ホバリング型 AUV（6 機スラスター）に実装され、新しく開発した制御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。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で、安全対応への配慮や運用費用が多発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 に対しての搭載も視野に入れている。

AUV の制御アルゴリズムを検討するためには、AUV の操縦運動モデルを構築する必要がある。著者らは、mini-AUV の操縦流体力を求めるための平水中流体力計測試験を実施し、運動モデルを同定した<sup>8)</sup>。また、実機 AUV の操縦運動モデルを構築し、実海域試験結果と比較を行うことでその有効性も確認している<sup>9-12)</sup>。

さらに AUV の制御アルゴリズムの高度化の観点から、時間的、空間的に目標に対して有効に到達できるような制御を非線形モデル予測制御により行い、シミュレーション計算上であるが AUV 運動モデルに加えることで、航行状況の有効性を確認した<sup>13,14)</sup>。

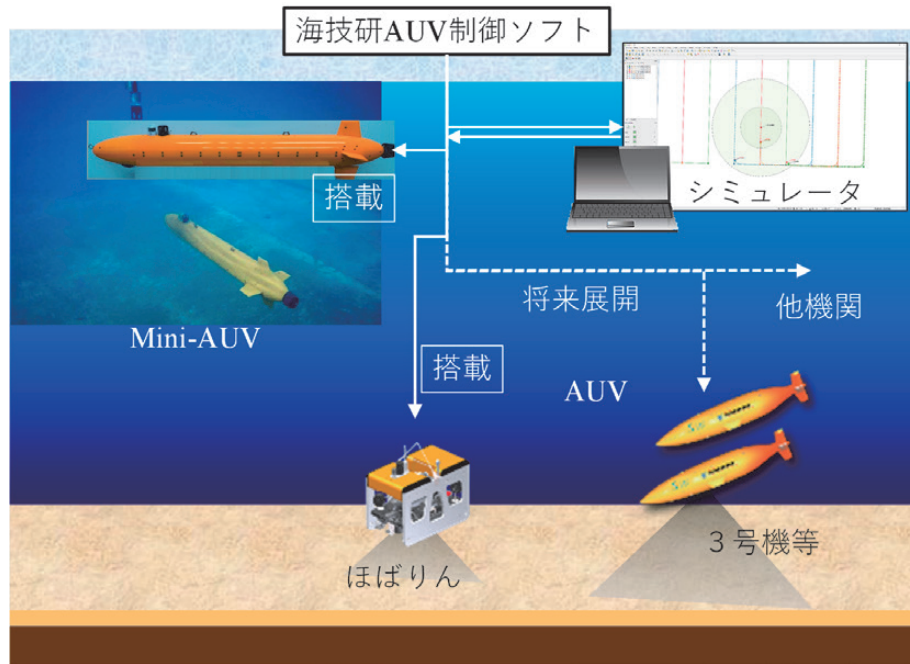


図7 海技研開発制御プログラムの展開

#### 4. おわりに

海技研が実施している SIP 第2期での研究開発，成果について総括的に示した．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，SIP 第2期事業の中で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で行い，将来的な民間移転・事業化が問題なく進むよう対応した．今後実用化・事業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 第1期「次世代海洋資源調査技術」（海のジパング計画）で製作したAUVを使用させていただきました．また，SIP 第2期「革新的深海資源調査技術」（両管理法人：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，AUV実機開発・観測・保守作業に係った海上技術安全研究所所内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) JAMSTEC: Developing Innovative Technologies for Exploration of Deep Sea Resources, <https://www.jamstec.go.jp/sip2/e/> .
- 3) Fujiwara, T., Kim, K., Sasano, M., Sato, T., Inaba, S., Okamoto, A., Imasato, M., and Takimoto, T.: Latest Development Information on NMRI AUV, The Report of the National Maritime Research Institute, Vol.21 (2021), pp. 13-18. (in Japanese)
- 4) Fujiwara, T., Kim, K., Sasano, M., Sato, T., Inaba, S., Okamoto, A., Imasato, M. and Osawa, H.: Sea Trials Summarization on Fundamental Formation Control of Multiple Cruising AUVs, Proceedings of the ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2021-61483 (2021), pp. 1-9.
- 5) Sato, T., Kim, K., Sasano, M., Inaba, S., and Fujiwara, T.: Control Method of Cruising-type AUVs for Seafloor Observation, Proceedings of the 20th Presentation Meeting of National Maritime Research Institute (2020), pp. 117-118. (in Japanese)
- 6) Kim, K., Sato, T., Inaba, S., Okamoto, A., Takahashi, M., Sasano, M., Imasato, M., Takimoto, T., and Fujiwara, T.: New Approaches for Practical Simultaneous Operation of Multi-AUVs, IEEE OES Underwater Technology 21 (2021).
- 7) Okamoto, A., Imasato, M., Hirao, C. S., Sekiguchi, H., Seta, T., Sasano, M., and Fujiwara, T.: 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.
- 8) Hirao, C. S., Fujiwara, T., Okamoto, A., Sekiguchi, H., Imasato, M., and Sasano, M.: Study on Maneuvering Motion Modeling of Small AUV, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 32 (2021), pp. 259-267. (in Japanese)
- 9) Umeda, J., Kim, K., Sato, T., Inaba, S., and Fujiwara, T.: Numerical Simulations and Sea Trial for Leader Follower Formation Control of Cruising-Type AUVS, Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2020-18253 (2020), pp. 1-7.
- 10) Umeda, J., Sato, T., Kim, K., Inaba, S., and Fujiwara, T.: Sea Trial and Numerical Simulation for Formation Control of Cruising-type AUVs, Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 30 (2020), pp. 352-354. (in Japanese)
- 11) Umeda, J., Sakamoto, N., and Fujiwara, T.: Influence of Appendages on the Hydrodynamic Performance of Cruising-type AUVs, Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 31 (2020), pp. 377-381. (in Japanese)
- 12) Umeda, J., Fujiwara, T.: Modeling Relation Between the Speed and Propeller Revolution of the Cruising AUV Using Multiple Regression Analysis, Proceedings of the ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2021-62350 (2021), pp. 1-7.
- 13) Taniguchi, T., Umeda, J., Fujiwara, T., Kim, K., Sato, T., and Inaba, S.: Path Following Control of Autonomous Underwater Vehicle Using Nonlinear Model Predictive Control, Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2020-18241 (2020), pp. 1-7.
- 14) Miyazawa, K., Arima, M., Taniguchi, T., Umeda, J., and Fujiwara, T.: Underwater Cruise Simulation of an Autonomous Underwater Vehicle Using a Non-linear Model Predictive Control, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 34, 2021, pp. 99-107. (in Japanese)