

複数 AUV 隊列制御による海底調査の新戦略

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

New Strategy for Near-bottom Survey by Formation Control of Multiple AUVs

by

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

Abstract

This paper introduces our approaches for multi-AUV formation control towards stable, effective, and efficient near-bottom survey using multiple AUVs. Motivated by the future development of seabed mineral resources, we have developed two approaches applicable to highly efficient, high-definition near-bottom survey. Our first approach is dynamic waypoint-based formation control on the basis of leader-follower control architecture. In this approach, any number of followers can be controlled by one leader simply by following the dynamic waypoints generated and issued by the leader. The second approach is basic formation control, in which every AUV within a group of multiple AUVs is commanded to accelerate or decelerate to be placed within an area of valid acoustic communication link provided by an ASV for multi-AUV control. Our approaches have been successfully implemented in actual at-sea operation of our cruising AUVs. Our methods were developed with the support of a Japanese national R&D program called the Strategic Innovation Promotion Program (SIP). As the final stage of our R&D activities in SIP, we are planning simultaneous at-sea operation of five different AUVs from various organizations. We anticipate that the results of our work will lead to advancements in strategies for multi-AUV operation.

* 海洋先端技術系

原稿受付 令和4年1月26日

審査日 令和4年2月26日

目 次

1. まえがき	18
2. 複数 AUV 同時運用における航法・誘導・制御	20
2.1 基本航法および誘導	20
2.1.1 慣性航法および水中音響航法	20
2.1.2 ウェイポイント誘導	20
2.2 複数 AUV 同時運用制御	21
2.2.1 動的ウェイポイント制御	21
2.2.2 基本隊列制御	22
3. シミュレーション検証	23
4. 実機実装および実海域試験	24
4.1 動的ウェイポイント制御	24
4.1.1 実機実装	24
4.1.2 実海域試験結果	25
4.2 基本隊列制御	26
4.2.1 実機実装	26
4.2.2 実海域試験結果	26
5. まとめ	29
謝辞	29
References	29

1. まえがき

国土面積の 12 倍にも及ぶ 447 万 km² の広大な領海および排他的経済水域 (EEZ) を有する日本にとって、海洋空間の有効利用は国の成長戦略としてはもちろん、安全保障とも直結する最重要課題の一つと言えよう。近年、より先進的な海洋空間の利用に向けた新しいモバイル・プラットフォームとして注目されている AUV (Autonomous Underwater Vehicle) は、資源探査、海洋土木、環境保全や防衛装備など、様々な分野でその活用が広まりつつある。中でも、世界的に最も有望視されているのが海底資源の探査¹⁾で、AUV の活用は現在エネルギーや鉱物資源の探査を中心に、商業ベースの実用化寸前にまで達している。こうした背景から、日本では世界に先駆けて海底鉱物資源の詳細な調査に AUV を活用しようとする動きが 2000 年代初頭から始まった¹⁾。これに関連して注目すべきなのが 2007 年に制定された海洋基本法および、同基本法に基づいて翌 2008 年に策定された海洋基本計画である。海洋基本計画では、日本の近海にある海洋エネルギー・鉱物資源の開発について目標が定められ、その目標を達成するための計画として、海洋エネルギー・鉱物資源開発計画が作成されている²⁾。同計画では、メタンハイドレートおよび石油・天然ガスを海洋エネルギー資源、また、海底熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、マンガン団塊およびレアアース泥を海洋鉱物資源として主たる開発対象とし、それぞれの資源に対しては開発に向けた具体的工程が定められている。こうした背景から立ち上げられたのが、総合科学技術・イノベーション会議が府省・分野の枠を超えて推進する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」、通称“海のジパング計画”である。海技研は 2014 年から海のジパング計画に参画し、複数 AUV 同時運用による海底熱水鉱床の調査技術を中心テーマとした研究・開発を行った¹⁾。SIP 第 1 期の成果を踏まえ、政府は 2018 年から SIP 第 2 期を立ち上げており、海洋分野では「革新的深海資源調査技術」と言った研究・開発プログラムが新たにスタートした。革新的深海資源調査技術ではあらゆる先端産業に不可欠な有用・希少金属の安定的な供給源の確保に向け、こうした金属を含んでいると知られているマンガン団塊およびレアアースにターゲットを絞り、その分布や賦存量等の正確な評価を核心課題として定めた。SIP 第 1 期の次

世代海洋資源調査技術に引き続き、海技研は主要参画機関として SIP 第2期の革新的深海資源調査技術にも参加しており、深海 AUV 複数運用技術を主たるテーマとし、関連要素技術の研究・開発に取り組んでいる。

前述の通り日本は広大な領海および EEZ を保有しており、その広さは世界第6位である。一方、多くの場合 AUV は3ノット前後の航行速度で運用され、これは水上船と比べてもはるかに低速である。AUV の低速運用は主に水の流体抵抗を意識したものである。ROV(Remotely Operated Vehicle)のような有索の無人機とは異なり、外部からの電力(エネルギー)供給に頼ることのできない無索無人機の特徴から、AUV は低速航行を基本とし、流体抵抗によるエネルギー消費を極力抑えようとしている。広大な領域を低速で調査せざるを得ない事情から、AUV による海底調査においては、単位時間当たりの調査面積を一段と拡大する高効率化が強く求められてきた。その有力な方策の一つとして複数 AUV の同時運用は以前から国内外で注目され、前述の通り海技研は2014年から SIP 第1期「次世代海洋資源調査技術」に参画することで、複数 AUV 同時運用技術の研究・開発に本格的に乗り出した¹²⁾。同じ測線に沿い、複数の AUV を上下で走らせる言わば“マルチレイヤー航法¹⁾”による2機同時潜航を皮切りに、海技研は SIP 第1期にて実用任務をベースとした複数 AUV の同時運用を、様々な海域で数多く実演した¹²⁾。言うまでもないが、複数機の同時運用から得られる仕事の効率は、同時運用する機数に比例して上がる。一方、着水から浮上まで人間による監視や介入を全く必要としない完全自律化にまでは至っていないことから、現状の AUV 運用には支援船による AUV 管制体制が不可欠である。AUV の管制は、船上のオペレーターが AUV との間でコマンドを含む主要情報をやり取りする水中通信と、AUV の正しい現在位置を割り出す水中測位に大別される。電波の届かない水中環境上の制約から、水中の通信・測位には音波が利用され、これを音響通信・測位と呼ぶ。周波数にもよるが、音響通信・測位の有効距離は空中の電波通信・測位と比べてはるかに短く、数 km 程度が限度である³⁾。こうした制約から、有効な音響通信・測位を確保するため、AUV 運用では支援船が常に航行中の AUV を追尾する必要がある。ところが、これは支援船が AUV に縛られることを意味し、支援船の人的・物的資源が AUV 運用のみに拘束されることで、支援船や AUV 等を含む海洋調査体制全体の運用効率は大幅に悪化する。

こうした問題の解決に向け、海技研は SIP 第1期で NMRI 半没水型洋上中継機(以下、洋上中継機)¹⁴⁾と言った ASV(Autonomous Surface Vehicle)を開発し、洋上の無人機(ASV)による複数の水中無人機(AUV)の管理体制を確立した。潜航中の AUV を追尾しながら音響通信・測位による管制に専従することで、洋上中継機は AUV の管制から支援船を解放し、海洋調査体制の運用効率を飛躍的に向上させる可能性を切り開いた。前述の通り、複数 AUV の同時運用による海底調査の効率は、同時運用する機数に比例して上がる。機数の増加に伴い単位時間当たりの調査面積が拡大するが、これは同時に、複数 AUV による水平面内の占有域が拡張することを意味する。音響通信・測位が有効に働く領域を有効管制域と言い、複数の AUV を安全かつ安定的に運用するためには、複数 AUV の占有域が有効管制域内に含まなければならない。ところが、機数の増加による占有域の自然拡張に加え、各機の現在位置のばらつきがもたらす更なる占有域の拡散により、有効管制域内に全 AUV が入りきれない事態の発生が、機数と運用時間に比例して益々深刻化する。将来、5機以上の AUV の同時運用により海底調査の飛躍的な高効率化を目指す海技研にとって、この問題は複数 AUV 同時運用の成否にかかわる重大な懸念事項である。こうした問題意識のもと、海技研は複数機の AUV を安全かつ安定的に運用できる新しい運用手法の導出を中心課題として定め、SIP 第2期からその本格的な研究・開発を開始した⁴⁾。

複数 AUV の同時運用において、機数の増加による占有域の自然拡張は避けられない。よって、同時運用できる最大機数は、有効管制域と一機当たりの占有域で先ず決まる。ところが、このように決められた機数の AUV で、実海域にて安全かつ安定的な同時運用が行えるとは限らない。これは、AUV の活動空間である海中環境の特殊性に起因するもので、そのうち最も大きな影響を及ぼすのが、海流のような外乱である。低速であるが故、AUV の航行は海流等の外乱により影響を受けやすい。また、時空間に対して一定のランダム性を有する外乱の属性から、たとえ同速巡行していても、外乱環境中を航行する複数 AUV の実時間現在位置には大きなばらつきが生じる。こうした現状を踏まえ、占有域のばらつきを最小に抑えることで複数 AUV を安全かつ安定的に運用する実践策として、海技研は複数 AUV の隊列制御技術に着目した。隊列制御とは複数移動体の群制御の一種で、個々の移動体が他の移動体との相対位置で隊列を組み、特定の幾何学的形状を形成しながら同時に移動する制御手法である⁵⁾。海技研はマルチエージェント群制御の代表的な手法の一つであるリーダー・フォロワー(leader-follower)制御⁵⁾に基づいた動的ウェイト制御法と、特定の形状を形成せず、増・減速指令の実行で複数機による占

有域の発散を防止する言わば基本隊列制御法を開発し、シミュレーションはもちろん、実機による実海域試験を通じてその有効性を確認した。本稿では、海技研の複数 AUV 隊列制御に関するこれまでの研究・開発の取り組みを紹介するとともに、その将来展望について述べる。

2. 複数 AUV 同時運用における航法・誘導・制御

2.1 基本航法および誘導

2.1.1 慣性航法および水中音響航法

GNSS (Global Navigation Satellite System)等の衛星測位によりサブメートル精度の位置情報が当たり前のように得られる陸上とは異なり、電磁波の通らない海中では自分が現在どこにいるのかを把握することすら容易ではない。こうした事情から、AUV のみならず有人潜水船をはじめとするあらゆる潜水機は、加速度の時間積分により移動体の現在位置を求める言わば慣性航法(Inertial Navigation)を基本として潜航中の自機位置を割り出している。ところが、慣性航法では時間積分に起因する誤差の蓄積が避けられず、特に潮流などの外乱環境下では稼働時間に比例して急増する深刻な位置誤差が発生する⁶⁾。こうした問題から、慣性航法のみで AUV を運用するのは極めて稀で、海上にて USBL(Ultra Short Base Line)等の音響相対測位手段と GNSS とを組み合わせることで地球測位系に対する正確な絶対位置を定め、音響通信手段を通じて慣性航法で求めた自機位置を適宜補正する言わばポジション・アップデート(Position Update)^{6,7)}の併用が一般的である。ところが、これは現状の AUV 運用において、AUV が音響相対測位手段を有する海上の管制手段と、音響通信を通じて常につながっている必要性を意味し、着水から浮上まで人間による監視や介入を必要としない完全自律化の実現において、最大の障害要素となっている。このように、現状の AUV 運用において水中音響航法(Underwater Acoustic Navigation)と呼ばれる音波を媒介とする管制手段の利用は不可欠で(図 1)、こうした背景から前述の慣性航法および水中音響航法は、AUV 運用における最も基本的な航法として位置づけられている⁷⁾。

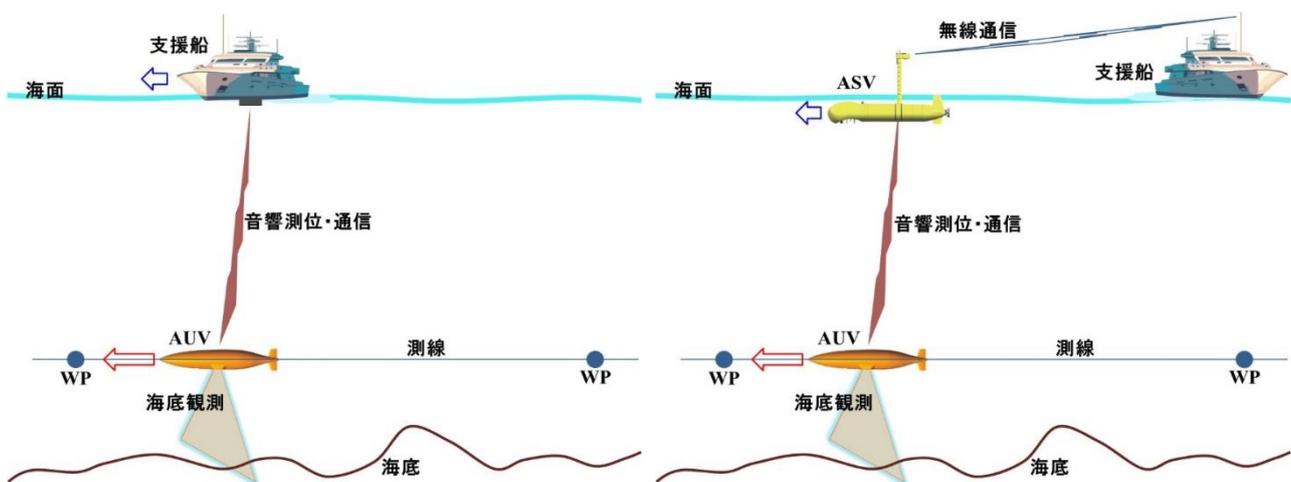


図 1 水中音響航法による AUV 運用 (左: 支援船からの管制 / 右: ASV による管制)

2.1.2 ウェイポイント誘導

現在、AUV の航行制御に関して基本となっているのが、航空管制の分野で使われるウェイポイント waypoint方式の誘導である。ウェイポイントとは AUV が通過・到達すべき目標位置を定める時系列情報で、水平面内の緯度・経度と、鉛直面内の海面からの深度、もしくは海底からの高度とを組み合わせた 3 次元座標で定義する¹⁾。隣接したウェイポイント同士を直線で結ぶことで形成される経路を測線と呼ぶが、上記のウェイポイントの定義から、測線は AUV のたどるべき目標経路であることが分かる⁸⁾。潜航任務に際してウェイポイントおよび測線を決めることを潜航(航行)計画と呼ぶが、図 2 に潜航計画図の一例を示す。各ウェイポイントに付記されている数字は目標深度で、AUV は目標深度で当該ウェイポイントにたどり着くよう、自機の上下位置を制御する。

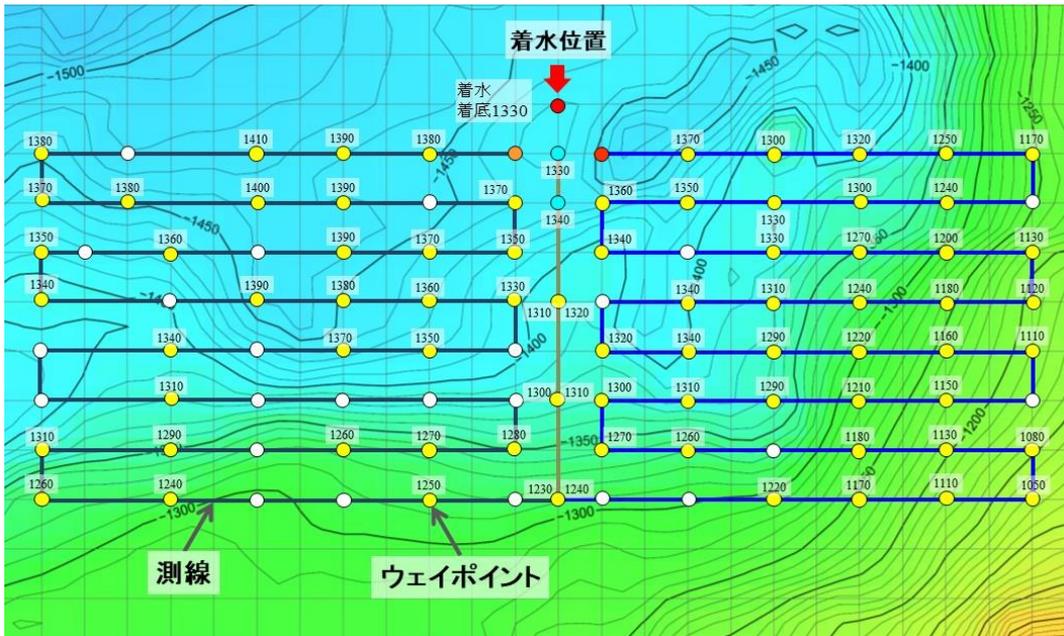


図 2 AUV 潜航計画図の一例

2.2 複数 AUV 同時運用制御

2.2.1 動的ウェイポイント制御

前述のとおり、現状の複数 AUV 同時運用では、航行時間に比例して増加する各機の位置のばらつきがもたらす占有域の発散により、一部の AUV が有効管制域から離脱する事態が発生しかねない。こうした問題の解決に向け、海技研は各機間の相対位置を直接制御することで、各機位置のばらつきや占有域の発散を抑え、複数 AUV の安全かつ安定的な同時運用を可能とする隊列制御技術の研究・開発に取り組んでいる。動的ウェイポイント制御はこうした取り組みの一環として開発したもので、リーダー・フォロワー(leader-follower)群制御に基づいた制御手法である。リーダー・フォロワー群制御⁹⁾はロボット工学の分野でよく知られている集中型マルチエージェント制御法の一つで、制御対象のエージェントはその役割によりリーダーとフォロワーといった二つの階層に分けられる。各階層の役割は以下ようになる。

- ・リーダー：自機制御のシナリオを完全に揃え、独立エージェントとして行動する。更に、フォロワーの行動を規定し、通信手段を通じて伝える。
- ・フォロワー：リーダーからの指示に従い、従属エージェントとして行動する。自機制御の能力は有するが、通常リーダーから渡される制御目標を追従する下位の制御のみを実行する。

従来のウェイポイント誘導では時空間にて不変の言わば固定ウェイポイントが使われるのに対し、動的ウェイポイント制御ではリーダー機が自機との相対位置で定義されるフォロワー機のウェイポイントを実時間で生成・発行し、フォロワー機はこれ为目标位置として追従する。このように、動的ウェイポイントはリーダー機に従属してその位置および姿勢により決まり、各フォロワー機の相対位置を直接制御するため、海流等の外乱中でも各機の位置のばらつきが抑えられる。表 1 に動的ウェイポイントの特性を固定ウェイポイントと比較して示す。また、動的ウェイポイント制御の基本概念を図 3 に示す。

表 1 固定ウェイポイントと動的ウェイポイントの比較

	定義	可変性	属性	適用	生成	制御
固定 WP	地球固定座標系	不変	独立	全機	手動	絶対位置
動的 WP	動座標系(リーダー機固定)	時変	リーダー機従属	フォロワー機	自動	相対位置

図3で $O-XY$ は地球固定座標系, $o-xy$ はリーダー機に原点を置く動座標系である. 前述の通り, フォロワー機のウェイポイントはリーダー機からの相対位置で定義するため, フォロワー機 AUV_i のウェイポイントは $o-xy$ の原点を始点とする rr_{fri} ベクトルで定義している. また, r_l はリーダー機, r_{fi} , r_{fri} はフォロワー機 AUV_i 及び AUV_i のウェイポイントの位置ベクトルを表している. 図3から分かるように, e_{fi} はフォロワー機 AUV_i の目標位置と現在位置との差分を表すベクトルで, r_l , r_{fi} , r_{fri} , rr_{fri} 及び e_{fi} は次のような関係を有する.

$$r_{fri} = r_l + rr_{fri} \quad (2.1)$$

$$e_{fi} = r_{fri} - r_{fi} \quad (2.2)$$

フォロワー機の目標位置はリーダー機が(2.1)から求め, 音響通信を通じて当該フォロワー機に伝達する. 自機の目標位置を受信したフォロワー機は現在の自機位置を参照とし, (2.2)から位置差分を求める. この位置差分はフォロワー機の制御系に入力され, PID(Proportional-Integral-Derivative)のようなフィードバック制御の手法で, 位置差分を取り除くよう運動制御が施される. 図3でフォロワー機 AUV_i は目標方位 ψ_{fri} の方位制御および増・減速制御を行い, 位置差分 e_{fi} を取り除く行動で動的ウェイポイントを追従する.

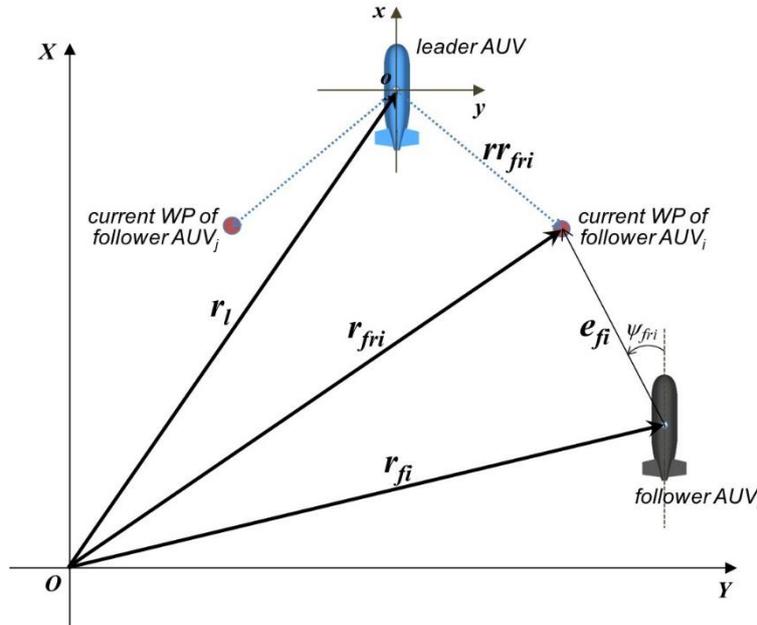


図3 動的ウェイポイント制御の基本概念

2.2.2 基本隊列制御

リーダー機からの相対位置を直接制御することから, 前述の動的ウェイポイント制御は複数 AUV による占有域の発散を効果的に抑え, 安全かつ安定的な複数機同時運用を実現する有力な手法である. 一方, リーダー・フォロワー群制御ではリーダーの役割が極めて重要で, リーダーの不具合や異常行動に対して致命的な脆弱性を持つ⁹⁾. これは, フォロワーの行動が完全にリーダーに従属するからで, リーダーの不具合や異常行動はリーダーのみならず全てのフォロワーをも深刻な危険にさらしかねない. こうした問題を踏まえ, 海技研はよりロバストな複数 AUV の同時運用手法として, 基本隊列制御といった別の複数機制御手法を開発した. これは動的ウェイポイント制御から増・減速制御のみを採り上げ, 従来の固定ウェイポイント誘導に取り入れたハイブリット型の複数機制御手法で, リーダーなどは存在せず各機の独立した航行を基本とするため, 上記のリーダー従属に起因する脆弱性に対してロバスト性が確保できる. 基本隊列制御の基本概念を図4に示す. 図4にて3機の AUV(AUV #1 ~ #3)は従来の AUV 航行と同様にそれぞれに与えられた固定ウェイポイントを追従しており, 管制機としての ASV がそれらを追尾しながら音響通信・測位が有効に働く仮想の音響の傘, すなわち有効管制域を提供している.

前述の通り、初期段階では全機が有効管制域内に入っているが、時間の経過とともに一部の AUV が有効管制域から離脱することが起こり得る。図4で AUV #1 及び AUV #2 は有効管制域から外れており、基本隊列制御では有効管制域の前方を走る AUV #2 に減速指令を、また、後方に遅れている AUV #1 には増速指令を与え、有効管制域内に戻すことで全機に対する安全かつ安定的な管制を保持する。

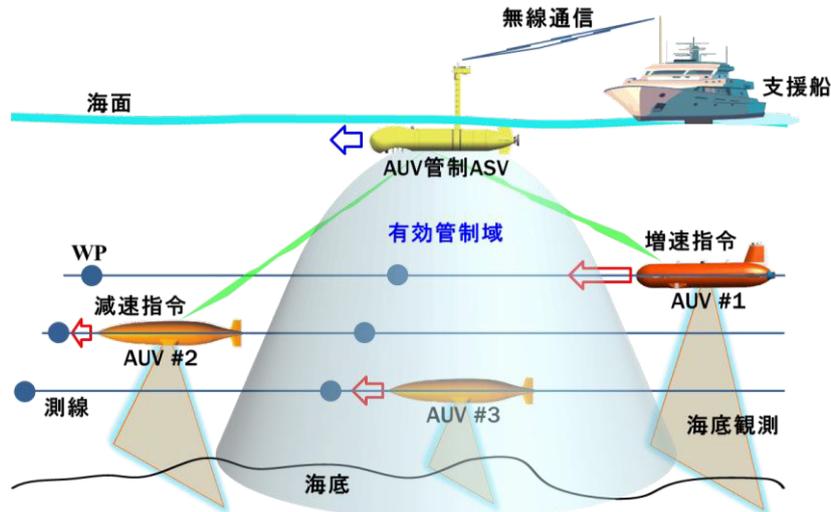


図4 基本隊列制御の基本概念

3. シミュレーション検証

開発した隊列制御手法の実機実装に先立ち、動的ウェイポイント制御の有効性を検証するため、3機のフォロワー機によるリーダー・フォロワー隊列制御航行のシミュレーションを行った。本シミュレーションでは、海技研のNMRI航行型AUV4号機による実際の潜航結果からリーダー機の挙動を生成し、動的ウェイポイント制御により3機のフォロワー機を追従させた。3機のフォロワー機の目標位置、すなわち動的ウェイポイントは、リーダー機から下記の相対位置で生成した。

- ・ follower #1: $y = -15 \text{ m}$, $x = -90 \text{ m}$
- ・ follower #2: $y = 0 \text{ m}$, $x = -90 \text{ m}$
- ・ follower #3: $y = 15 \text{ m}$, $x = -90 \text{ m}$

前述の通り、音響通信を通じて動的ウェイポイントがリーダーからフォロワーへ伝達されることから、動的ウェイポイント制御の結果は音響通信の条件にも大きく左右される。本シミュレーションでは、以下のような音響通信の条件を適用した。

- ・ 音響通信周期(recurrence time) = 5.0 s
- ・ 音響通信欠損率 = 20 %

シミュレーションの結果を図5、6に示す。図5はAUV全機の航跡である。図5から分かるように、各フォロワー機は動的ウェイポイントを追従することで、自機に設定されたリーダー機との相対位置を維持しながら、隊列航行を全うしている。図6は各フォロワー機の方位、推進器回転数(rpm)、サージ(surge)およびスウェー(sway)速度の時系列である。図5と6を比較して分かるように、移動距離の長い最外周を走る follower #1 が最も高速で制御されており、これは推進器回転数からも確認できる。シミュレーションの結果から、音響通信において多少の欠損が発生しても動的ウェイポイント制御は有効に働き、狙い通りに各機位置のばらつきを抑え、占有域の発散を防ぐことを確認した。実海域環境下の音響通信にて欠損は容易に起こるため、本シミュレーションの結果は実機実装に向けて大きな意味を持つ。

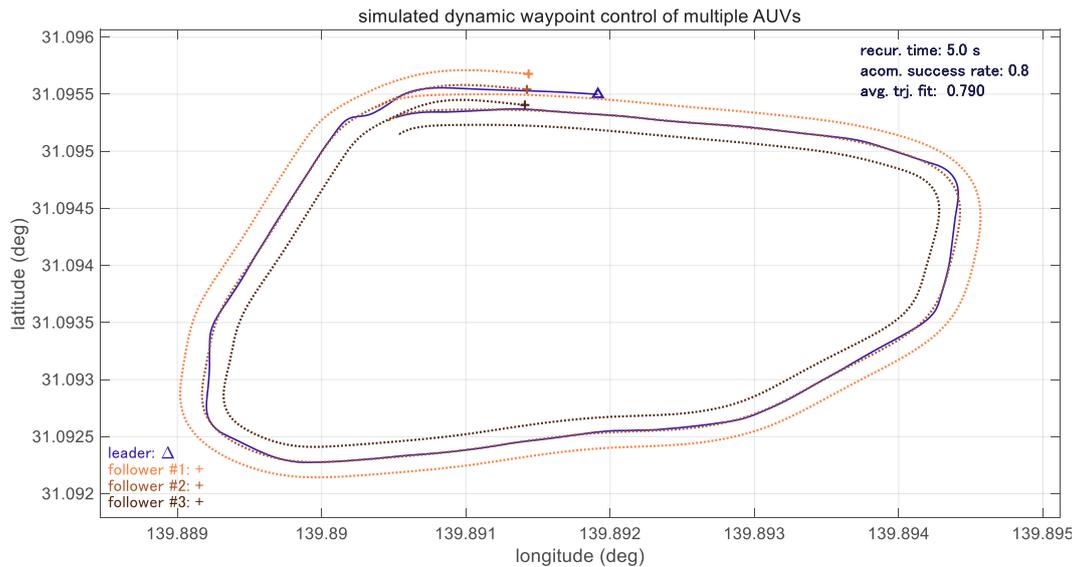


図5 動的ウェイポイント制御によるAUV 4機の航跡

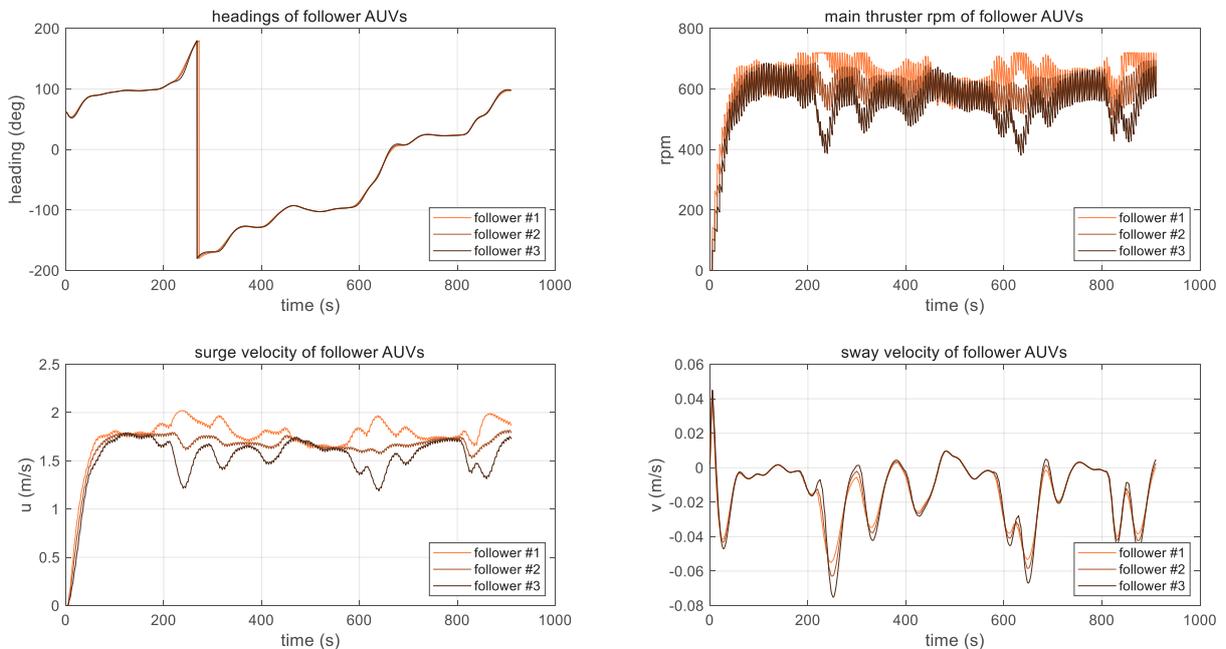


図6 動的ウェイポイント制御によるフォロワー機の航行結果（左上：方位，右上：推進器回転数，左下：前後速度，右下：横速度）

4. 実機実装および実海域試験

4.1 動的ウェイポイント制御

4.1.1 実機実装

シミュレーションを通じて実環境における有効性を確認した後、海技研が保有するAUV実機および周辺機器に動的ウェイポイント制御システムを実装した。この実機実装でメインとなるのはソフトウェアの改造で、その根幹はウェイポイント情報を従来の着水前に各機に入力する方式から、潜航中の各機にリーダー機がリアルタイムで与える方式への変更となる。本研究では当初、リーダー・フォロワー群制御のエージェントは全てAUVと

想定していた。ところが、前述の通り慣性航法の脆弱性から AUV の自機位置推定には誤差の蓄積が避けられず、現状、この問題を緩和する手段は外部からの相対測位結果を用いるポジション・アップデートのみである。ところが、動座標系の原点として全機の基準位置となるリーダー機において (図3)、その位置誤差は自機のみならず全フォロワー機の行動に深刻な影響を及ぼすため、リーダー機は常に正確な自機位置を保つ必要がある。これは、リーダー機がリアルタイムで正確な自機位置を割り出せることを意味するが、慣性航法を基本としていることから、直ちに AUV で具現化するのには困難な実情である。こうした現状を踏まえ、本研究では GNSS 測位が利用できる水上船 (支援船や ASV) の自船位置を基準として動的ウェイポイントを生成することにした。これは、水上船が動的ウェイポイント制御におけるリーダー機の役割を担うことを意味するが、将来、AUV 等の水中機のみで自己完結するリーダー・フォロワー群制御を見据え、水上船から任意のオフセットで定めた水中位置に仮想のリーダー機を見立て、動座標系の原点とした。

4.1.2 実海域試験結果

上記のように実装した動的ウェイポイント制御システムを用い、AUV 2 機および管制機としての ASV 1 機による実海域潜航試験を行った。2019 年 12 月に静岡県沼津市沖合の駿河湾で行った本試験では、ASV による管制のもと 2 機の AUV が動的ウェイポイントに誘導され、水深 1000 m 海域の海底調査を完遂した。図7に実海域試験結果として、AUV 各機の航跡および MBES(Multi-Beam Echo Sounder)による海底音響観測の結果を示す。

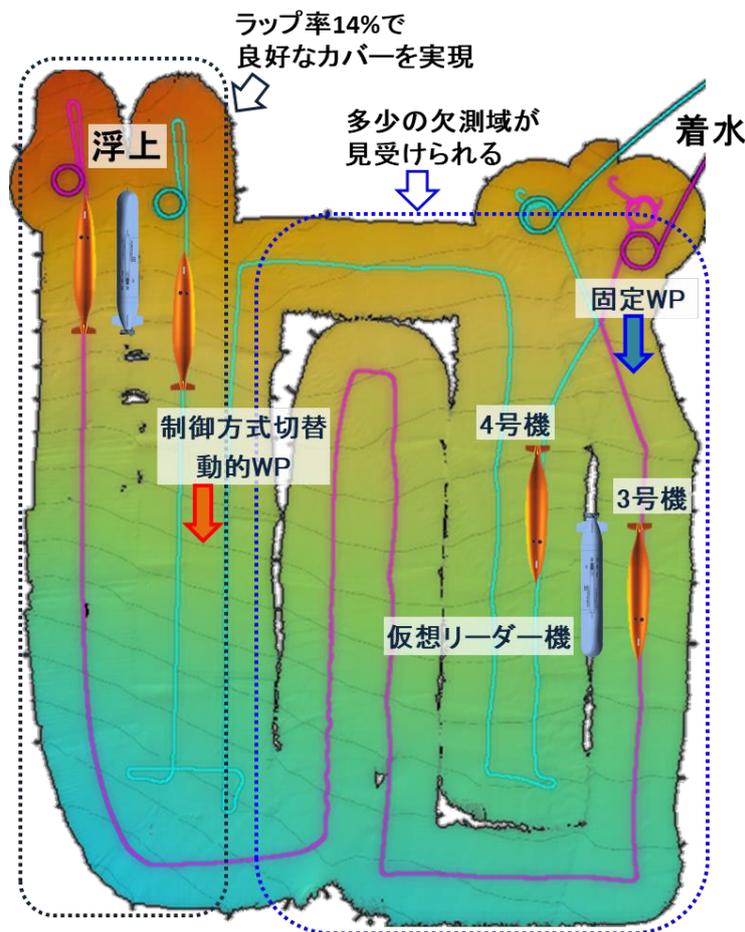


図7 固定 WP (前半) と動的 WP (後半) 制御による AUV 2 機の航跡および海底音響観測の結果 (2019 年 12 月)

本試験では洋上中継機を管制機とし、フォロワー機として NMRI 航行型 AUV 3,4 号機¹⁰⁾を投入した。動的ウェイポイント制御の基準となる仮想のリーダー機は、管制機の前方 30 m、海底から高度 90 m の水中位置に設けられた。2 機のフォロワー機の目標位置、すなわち動的ウェイポイントの位置は、リーダー機固定の動座標系に対して下記のように設定した。

- ・NMRI 航行型 AUV 3 号機: $y = -150 \text{ m}$, $x = 0 \text{ m}$
- ・NMRI 航行型 AUV 4 号機: $y = 150 \text{ m}$, $x = -60 \text{ m}$

上記のように、2機のフォロワー機の目標位置を前後方向で60mずらしている。それはMBESによる海底音響観測の際、他機から発せられた観測音およびその海底反射音を拾うことで生じる音響干渉を防ぐためである。また、本試験では着水してから全行程の約55%までの区間に従来の固定ウェイポイント制御を適用し、残りの区間で動的ウェイポイント制御に切り替える、言わばハイブリット方式の制御で2機を運用した。図7から分かるように、固定ウェイポイント制御の区間では航行距離の増加とともにMBES観測における欠測域が見受けられ、制御方式切替の直前まで著しく拡大していることが分かる。一方、動的ウェイポイント制御に切り替わってからは欠測域が徐々に減り始め、最終測線上の北進では有意に減少している。これは、各機間の相対位置を直接制御する動的ウェイポイント制御ならではの効果の表れで、固定ウェイポイント航行時に発生し得る各機位置の発散を有効に抑えた結果と考えられる。

4.2 基本隊列制御

4.2.1 実機実装

動的ウェイポイント制御と同様に、基本隊列制御の実機システム実装もソフトウェアの開発および改造がメインとなる。まずAUV側の実装としては、外部からの指令により増・減速を行う機能を追加した。この増・減速制御においては、音響通信の不調が続く場合、最後に受理した指令値がずっと働き続ける問題が発生し得ることから、指令値の時効を任意に設定できるようにした。各機の現在位置をリアルタイムで把握し、増・減速の指令を出すのは支援船上に設けられる言わば隊列制御PCである(図8)。船内イーサネット上で各AUV管理PC及びASV管制PCと接続している隊列制御PCでは、増・減速指令発令の他に各機の推定自機位置がASVからの相対測位位置と大きく乖離する場合、測位位置を用いて推定自機位置を更新するポジション・アップデートも行う。

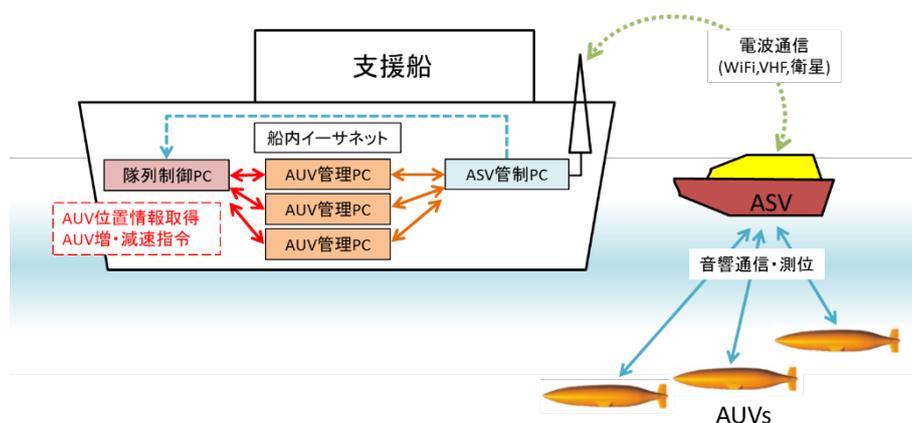


図8 基本隊列制御のシステム構成

4.2.2 実海域試験結果

基本隊列制御の有効性を検証するため、実機実装を完了した直後の2020年8月、航行型AUV2機および管制機としてのASV1機を用い、実海域試験を行った。前述の通り、基本隊列制御の核心は如何にAUV全機を有効管制域内に収めるのかである。有効管制域内により確実に収めることで複数機同時運用における安全性および安定性の更なる向上を図るとともに、本試験では図9に示すように管制機を中心とした言わば自由航行域を有効管制域内に別途設けた。自由航行域とはAUVを有効管制域内に確実に収めるため、ある種の安全率を考慮して有効管制域を狭めた領域である。自由航行域の大きさは任意で、(4.1)を満たせば良い。(4.1)で r_f , r_e はそれぞれ自由航行域および有効管制域の半径である。また、複数機の自由航行域は各機で異なる半径を設定しても良い。

$$0 < r_f \leq r_e \quad (4.1)$$

自由航行域内のAUVは外部指令等を受けることなく、着水前に予め入力された固定ウェイポイントを追従し、自由に巡行する。自由航行域から離脱したAUVに対し、基本隊列制御では図9に示すような増・減速の指令を発令し、自由航行域へ復帰させる。自由航行域から前方へ離脱したAUVには減速、また、後方へ離脱したAUVには増速の指令が出されるが、指令速度の増・減速分は(4.2)のように自由航行域の中心、すなわち管制機からの距離に比例した値として決める。

$$u_i = U_0 + \Delta u_i = U_0 + \kappa l_i \quad (4.2)$$

(4.2)で u_i は i 番AUVへの指令速度、 U_0 は基準巡行速度、 Δu_i は増・減速分で、 l_i は管制機と i 番AUV間の距離、また、 κ は比例定数である。

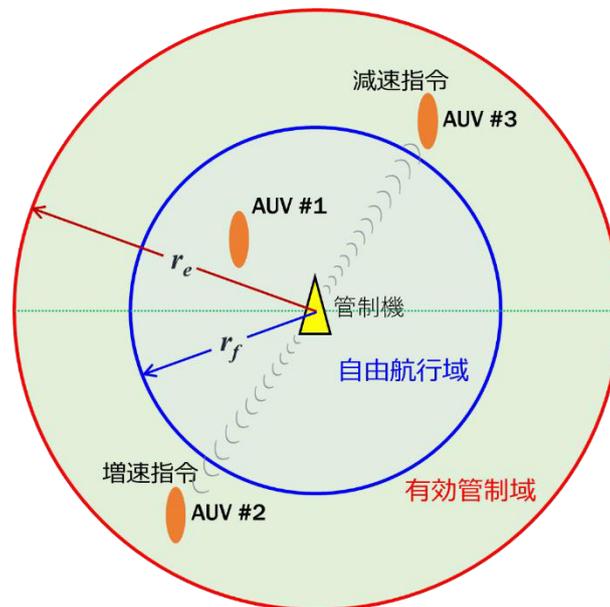


図9 基本隊列制御における有効管制域および自由航行域

実海域試験の結果として得られたAUV各機の航跡およびMBES海底観測の結果を図10に示す。洋上中継機による管制のもと、NMRI航行型AUV3,4号機は駿河湾の水深1000m海域にて、基本隊列制御による海底観測を完遂した。本試験では有効管制域の半径約630mに対し、各機の自由航行域半径を420mに設定した。リーダー機の行動に従属するため、各機の姿勢に連続的な変化が引き起こされる動的ウェイポイント制御とは異なり、固定ウェイポイント追従を基本とする基本隊列制御は、姿勢安定性の保持に優れている。その結果、本試験では1m以下の分解能を持つ超高解像度海底地形の計測に成功した。図10から分かるように、超高解像度であるが故、得られた海底地形からは海底砂紋や微細な凹凸まで確認できる。

図11は2020年11月に行った航行型AUV3機による基本隊列制御実海域試験の結果である。前回と同様に、洋上中継機を管制機として実施した本試験では、3機の航行型AUV(NMRI航行型AUV2~4号機)が基本隊列制御による海底観測を完遂しており、同時運用の機数を増やすことで海底調査の効率を飛躍的に向上させようとするSIPの基本方針に対し、基本隊列制御が有力かつ有効な手法であることを立証した。

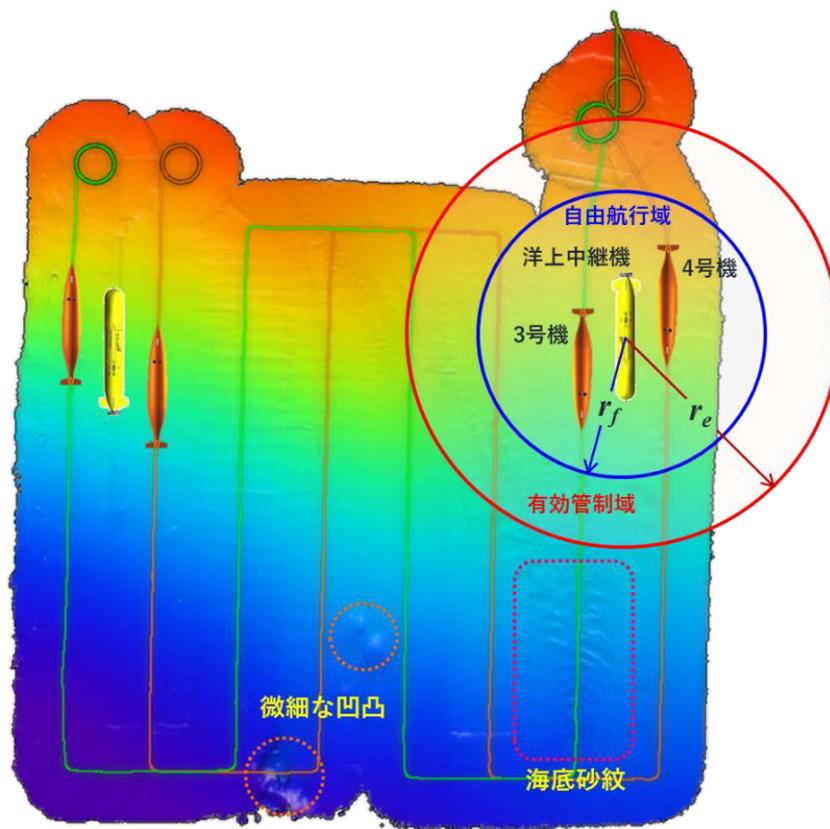


図 10 基本隊列制御による AUV 2 機の航跡および海底音響観測の結果 (2020 年 8 月)

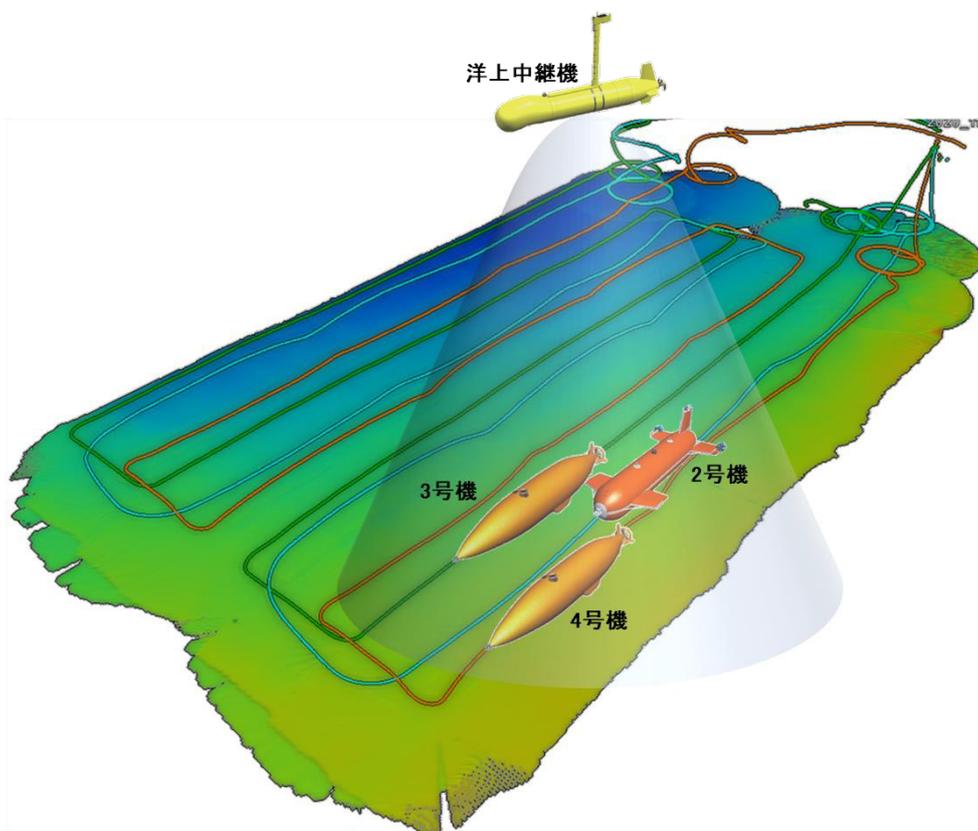


図 11 基本隊列制御による AUV 3 機の航跡および海底音響観測の結果 (2020 年 10 月)

5. まとめ

本稿では、動的ウェイポイント制御と基本隊列制御と言った2種類の複数AUV隊列制御方式を中心に、海技研がこれまで取り組んできた複数AUVの安全かつ安定的な運用に向けた研究・開発について解説した。2つの方式については何れも海技研が保有している実用機を用いた実海域試験を通じて、その有効性を確認した。

リーダー・フォロワー群制御をベースとすることから、動的ウェイポイント制御ではリーダー機からの指示のみでミッション遂行のための上位制御が完結する。すなわち、フォロワー機にはリーダー機からの指示に従うだけの役割が求められる。これは、フォロワー機のシステムがリーダー機よりはるかに低い仕様で成り立つことを意味し、多数を占めるフォロワー機の仕様をダウングレードすることで、費用低減の効果が期待できる。一方、必要最小限の下位制御にしか対応できないことから、フォロワー機の行動は完全にリーダー機に従属する。その結果、航行中のリーダー機に不具合や異常行動が発生すると、ミッションの中止や失敗に止まらず、最悪の場合には全機の亡失に至るリスクが内在する。動的ウェイポイント制御とは異なり、基本隊列制御では各機間の相対位置を直接制御することはできない。ところが、上述のリーダー機従属に起因する重大なリスクが回避できることから、基本隊列制御はより現実的な複数AUV同時運用の手段として考えられる。こうした事情を踏まえ、海技研は基本隊列制御を複数AUV同時運用手法の基本とし、AUV各機間の相対位置制御が不可欠なミッションに限り、動的ウェイポイント制御を適用する体制を整えている。

本研究・開発はSIP第2期「革新的深海資源調査技術」の一環として行われているが、SIP第2期では様々な仕様・機能を持つ多種多様なAUVによる協調行動を実現する、汎用的な複数機同時運用技術の導出が求められている。こうしたニーズを考慮し、現在はよりロジックが単純で、必要最小限の改造で実装できる基本隊列制御方式を複数機同時運用技術として集約して、研究・開発を続けている。AUVシステムの構築や運用に不可欠な主要水中機器は外国製がほとんどで、主要水中機器の国産化はもう一つの重要課題となっている。これに関連し、本研究・開発では複数AUVの隊列制御に、海洋研究開発機構(JAMSTEC)が現在開発中の高性能の水中音響通信・測位装置を導入する予定である。SIP第2期の最終年度である2022年の下半期にはこの国産音響通信・測位装置を海技研のAUV3機および他の機関のAUV2機に搭載し、全5機体制で隊列制御による高効率海底調査を実演する予定である。これは、世界的にみても最も実用的かつ実践的な複数AUV同時運用の試みで、複数AUV同時運用の実用化に向けた大きな進歩を成し遂げることが期待されている。

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)「革新的深海資源調査技術」(管理法人:JAMSTEC)によって実施されました。また、実海域試験におきましては(社)海洋調査協会の皆様から多大なるご協力を頂きました。

References

- 1) 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.
- 2) Ocean Policy Research Institute (OPRI), Sasakawa Peace Foundation: 2019 White Papers on the Oceans and Ocean Policy in Japan (2020), pp. 72-82.
- 3) Urick, R. J.: Principles of Underwater Sound(1983), McGraw-Hill.
- 4) Fujiwara, T. et al.: Sea Trials Summarization on Fundamental Formation Control of Multiple Cruising AUVs, Proc. ASME 2021 40th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 85154(2021), American Society of Mechanical Engineers.

- 5) Egerstedt, M. and Hu, X.: Formation Constrained Multi-Agent Control, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 6(2001), pp. 947-951.
- 6) Ura, T. and Kim, K.: On-site INS Update of an AUV "r2D4" by SSBL based Position Estimation, Proc. Oceans' 04 MTS/IEEE Techno-Ocean'04, Kobe, Vol. 3(2004), pp. 1606-1611.
- 7) Kinsey, J. C. et al.: A Survey of Underwater Vehicle Navigation: Recent Advances and New Challenges, Proc. 2006 IFAC Conference of Manoeuvring and Control of Marine Craft, Lisbon, Vol. 88(2006), pp. 1-12.
- 8) Yoerger, D. R., Jakuba, M., Bradley, A. M. and Bingham B.: Techniques for Deep Sea Near Bottom Survey using an Autonomous Underwater Vehicle, Robotics Research, Springer Tracts in Advanced Robotics, Vol. 28(2007), Springer.
- 9) Desai, J.P., Ostrowski, J. and Kumar, V.: Controlling Formations of Multiple Mobile Robots, Proc. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Vol. 4(1998), pp. 2864-2869.
- 10) Sato, T. et al.: Sea Trials of a High Maneuverability Compact Autonomous Underwater Vehicle, 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO), pp. 1-4.