6　複数 AUV 同時運用による海底調査の現状と今後

海洋先端技術系　＊金岡秀、佐藤匠、今里元信、稲葉祥梧、篠野雅彦、岡本章裕、藤原敏文
特別研究主幹　　井上俊司

1. はじめに

新しい海洋利用に向けたモバイル・プラットフォームとして AUV(Autonomous Underwater Vehicle)は近年，資源開発，海洋土木，環境保全，安全保障など，様々な分野でその活躍の場を広げている．無人機として人命安全が確保されており，ROV(Remotely Operating Vehicle)とは異なり索による拘束がなく広範囲にわたり自由な行動が行えることから，AUV は従来ダイバーや ROV による対応が困難とされてきた極限環境における広域調査等において，さらにその有用性を発揮している．こうした任務として代表的なのが深海底の高精度物理探査や氷海域の海中調査で，AUV は既に有効なツールとして世界中の海で広く活用されている [1]．

政府は，国が主導して民間と共に効率的な調査技術を確立することで海洋資源調査産業の創出を目指し，平成 26 年に内閣府が主管する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“海のジパング計画”を立ち上げた [2]．海のジパング計画では海底鉱物資源，中でも海底熱水鉱床を効率的に調査するシステムおよび諸般技術の開発が研究開発の目標として掲げられ，AUV は海底調査の中核プラットフォームとして位置づけられた．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海のジパング計画に参画していて，その実施における主要実施課題は以下のとおりである．

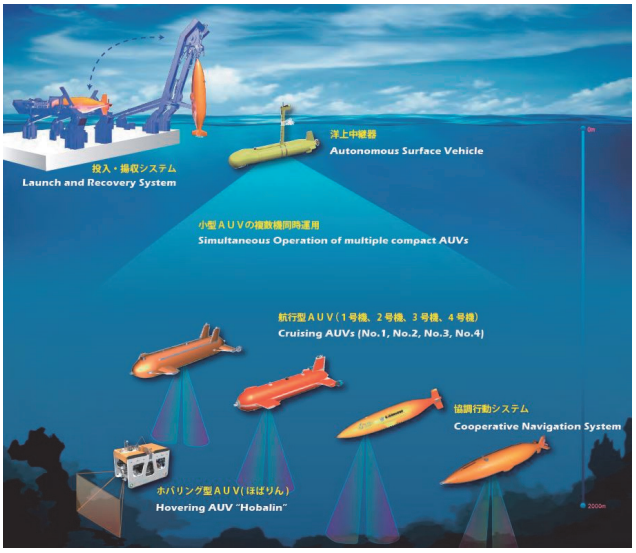
1) 複数機の AUV とその管制機として洋上中継器と呼ばれる ASV(Autonomous Surface Vehicle)を開発し，無人型の海洋調査ユニットを構築する．
2) 上記の調査ユニットと関連周辺装備により，高効率・高精度の海洋調査を実現するシステム運用技術を開発する．
3) 開発した運用技術を実海域調査を通じて民間に移転し，複数 AUV 同時運用に基づいた高効率・高精度の海洋調査を産業ベースで成り立てる土台を作る．

本稿では平成 31 年 3 月で 5 年間の研究開発が終了した 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するとともに，今後の展望について述べる．

2. 複数 AUV 同時運用

2. 1. 1　無人型海底調査ユニット

SIP 海のジパング計画では世界に先駆けた海底熱水鉱床の産業開発を目指し，その実現に向け調査手法，機器・装備および運用技術の研究開発を進めてきた．産業開発の大前提となるビジネスモデルを創出するためには高効率，低コスト化が不可欠で，その解決手段として SIP 海のジパング計画で提唱しているのが複数 AUV の同時運用である（図－1）．



図－1　複数 AUV 同時運用のイメージ．

一般に，AUV による海洋調査にかかる費用のうち最も大きいのが傭船料で，例えば海技研が平成 30 年 5 月に駿河湾で実施した AUV 潜航試験では，傭船料が総費用の約 65%を占めている．従って，従来 1 機の AUV を運用していた支援船で複数機の AUV が運用できれば，傭船料は機数に比例して減少することとなり，調査費用は大きく低減する．ところが，こうした運用を可能にするにはAUVを従来より大幅に小型・軽量化しなければならない．SIP 海のジパング計画のもと海技研は全 5 機の AUV（航行型 4 機，ホバリング型 1 機）と 1 機の ASV を開発しており（図－2），何れも全長 4m 以下，重量 800kg 以下の小型・軽量化を達成している（表－1）．

図－2　海技研が開発した AUV 及び ASV.

表－1 海技研 AUV 及び洋上中継器の仕様.

	主要目 (m)	重量 (kg)	最大深度 (m)	巡航速度 (m/s)	観測機器
航行型 AUV1 号機	3.9×0.65	780	2000	1.5	Parametric Sub-Bottom Profiler (PSBP)
航行型 AUV2 号機	3.6×0.6	620	2000	1.5	Muti-Beam Echo Sounder (MBES)
航行型 AUV3,4 号機	3.9×0.65	540	2000	2.2	Muti-Beam Echo Sounder (MBES)
ほばりん	1.2×0.7×0.76	270	2000	0.2	Camera Conductivity-Temperature-Depth (CTD)
洋上中継器	4.0×0.58	800	-	1.5	-

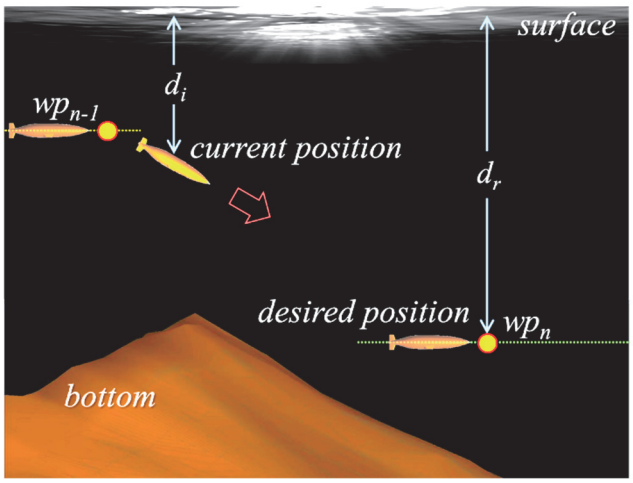
現在，国内・外で運用されている AUV の中には，専用の支援母船を必要とするものが少なくない．これは，着水・揚収や音響通信・測位等の運用システムを特定の AUV に最適化するため AUV 本体と並行して開発したからである．こうした運用システムがより高い信頼性や優れた作業性を提供するのは確かだが, AUV が支援船に拘束され汎用性に欠けた運用環境となってしまう．海技研の AUV は計画の段階から徹底した汎用性を追求し，その運用システムは既製の機器・装備で柔軟に構築できる．そのため，専用の支援母船を必要とせず，例えば，数トン級のクレーンを装備した小型作業船でも運用することができ，運用環境に縛られない高い稼働率を実現している．

2．1．2　海底調査航法

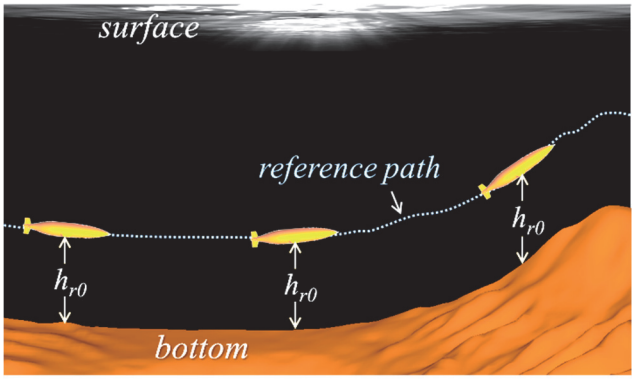
海底に近距離で接近するのは水上船ではできない AUV のような潜水機ならではの大きなメリットである．こうしたメリットを活かし，AUV は搭載している観測装置で高精度・高解像度の海底調査を行うことができる. AUV の海底付近航行には，次のように

1) 水面からの距離，すなわち深度をベースとする航法
2) 海底からの距離，すなわち高度をベースとする航法

の 2 種類の航法が主流となっており，1)を‘深度制御航法’（図－3），また 2)を‘高度制御航法’（図－4）と呼ぶ．調査対象である海底までの距離を直接制御しており，海底調査には高度制御航法の方が有利だと思われがちだが，主に音波に頼っている高度の計測は深度の計測に比べその信頼性が著しく低く，更に欠測や誤計測の発生が少なくない．



図－3　深度制御航法（目標深度 d_r）.

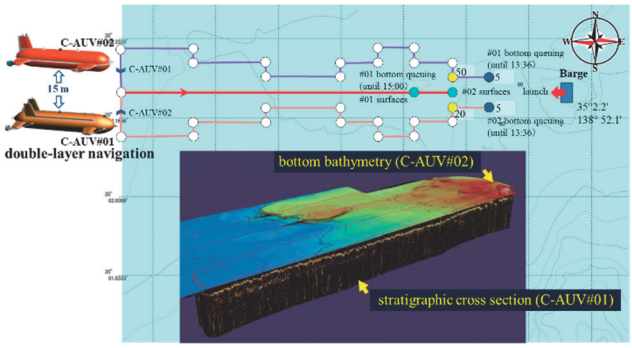


図－4　高度制御航法（目標高度 h_{r0}）.

音響測距における欠測や誤計測は，海底入射角や残響の影響から複雑で起伏に富んだ海底ほど更に多発する．また，こうした問題はホバリング型 AUV より針路変更に姿勢変更が伴う航行型 AUV の方でより深刻で，起伏に富んだ急峻な海底を高度制御航法で追従している航行型 AUV は，音響測距にて欠測や誤計測が連続する場合，海底衝突を招きかねない[3]．こうした事情を踏まえ，より厳しい音響測距環境で行動する航行型 AUV には深度制御を，また航行型よりは良好な環境で行動するホバリング型 AUV には高度制御を，海底調査における基本航法として適用するのが一般的である．

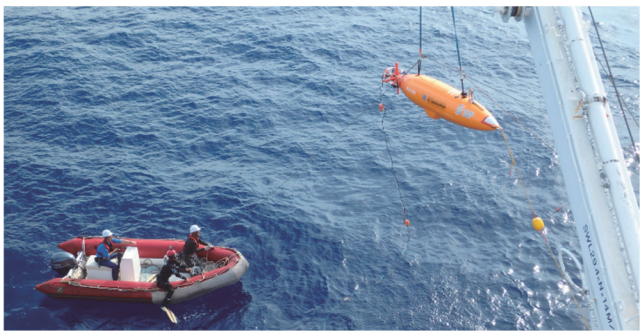
2．1．3　複数機運用航法

深度および高度制御航法を基本としながら，海技研は複数 AUV 同時運用にて複数機ならではの航法を開発し, 併せて適用している．代表的なのがダブル（マルチ）レイヤー航法と海底待機で，何れも複数機の水平面内の行動を調整し，洋上中継機や支援船による複数機の管制をより容易にするためのものである．図－5 は平成 28 年 9 月，静岡県沼津市沖の駿河湾で実施した海技研初の複数 AUV 同時運用の際に，ダブルレイヤー航法を適用して作成した潜航計画図である．本潜航では，航行型 AUV1 号機と 2 号機が 15m の深度差を保ちながら東に向かう同じ経路（図－5 中の赤線）を二層で航走し，それぞれの観測機器（表－1）を用いて海底地形と海底下地層を同時に観測した．このように，ダブルレイヤー航法は異なる観測機器を搭載した 2 機の AUV に適用するもので，観測機器の特徴に合わせて更に機数を増やすことで，より多層（マルチレイヤー）で運用することも可能である．



図－5　ダブルレイヤー航法による海底観測の一例.

海底待機とは AUV を海底付近に待機させる航法で，実行中の 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のが実施目的の一つで，ダブルレイヤー航法と同様に同時に運用する複数機の水平面内位置のばらつきを抑制し，より容易に複数機を管制するのが主な狙いである．海底待機を実施するもう一つの目的は，浮上時刻の管理である．AUV の揚収・回収に不可欠なクレーンや作業ボートは，通常一隻の支援船に一式が備わっていて，複数機の同時揚収・回収は難しい（図－6）．従って，複数の AUV を同時に運用する際は，　AUV 1 機の揚収・回収に必要な時間を考慮し，各 AUV が必要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なければならない．こうした場合，海底待機は複数 AUV の浮上時刻を容易に調整し，安全な揚収・回収に役立つ有効な手段である．



図－6　AUV 揚収作業の様子（H30 奄美大島西方沖調査航海）.

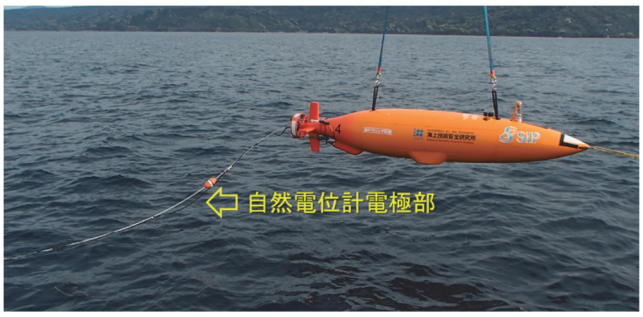
2. 1. 4　音響測位および通信

複数 AUV の同時運用では音響通信・測位の動作環境も 1 機単独運用のものとは異なる．音響通信・測位は，AUV 運用に不可欠な管理・管制の手段で，潜航中の事故防止や安全確保のため，与えられた条件下で最良の動作環境を確保する必要がある．海技研の AUV / ASV は測位に 19.5 kHz ～ 30.3 kHz，また通信に 8.96 ～ 14.03 kHz 帯域の音響信号を用いている．測位と通信との間に周波数の重畳は無いが，船上局(ASV）は多数の水中局(AUV)と接続しなければならないため，各水中局との接続を時間スロットで制御する時分割多元接続の方式を採用し，同時運用中の複数 AUV に対して高い信頼性の音響測位および通信環境を提供している．

3. 実海域潜航調査

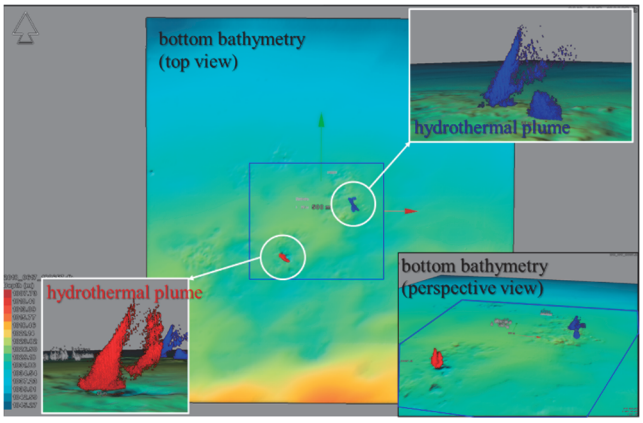
3. 1. 1　奄美大島西方沖調査航海

本調査航海は，SIP 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平成 30 年 6 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．調査海域となったのは奄美大島西方沖で，それまで海底熱水活動に関する調査の事例がなかった海域である．SIP 海のジパング計画に参画して以来，初めて熱水活動が報告されていない海域で実施された本調査航海は，海底鉱物資源調査の産業化を見据えたより実戦的な調査活動と言えよう．本調査航海では，陸上の鉱山開発でその有用性が確認されている自然電位計測による電気探査が主要調査手段の一つとして採択された．本電気探査では AUV が電極部の取り付けられた長さ 10 m 前後の樹脂線（図－7）を曳航しながら海底の自然電位を計測するため，十分な推力と高い運動性能を兼ね備えた航行型 AUV 3, 4 号機を投入することにした．



図－7　航行型 AUV4 号機に艤装された自然電位計.

図－8 は 6 月 18 日に実施した第 1 潜航から得られた調査海域の高解像度海底地形図である．本調査潜航では航行型 AUV 4 号機が 60 m 前後の高度で海底に接近し，マルチビームソナーをはじめとする観測機器を用いて海底調査を行った．優れた運動性能を持つ 4 号機は航走中の艇体姿勢を安定に保つことができ，非常に良質な海底地形および反射強度の情報が得られた．その結果，高解像度の海底地形情報に加え，熱水プルームの点群データを立体化することで，音響観測のみで臨場感あふれる海底熱水活動を再現する 3D モデルが構築できた（図－8）．



図－8　高解像度海底地形図（1 m メッシュ）及び海底熱水活動の 3D モデル（海調協大野研究員提供）.

4. 今後の展開

4. 1. 1　複数 AUV 隊列制御

海技研は SIP 海のジパング計画で培った複数機運用技術の更なる深海域での実用化や，AUV 運用効率の更なる向上に向け，新たな研究開発に取り組んでいる．中でも中心的な課題

となっているのが複数 AUV 隊列制御技術の開発で，これを実現することでAUV複数機の運用効率は飛躍的に向上する．現在，世界中の AUV 運用において基本となっている誘導方法は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．ウェイポイント誘導では AUV が通過・到達すべき位置の時系列としてウェイポイントを定義し，姿勢および位置制御を通じて AUV を目標ウェイポイントまで誘導する．目標ウェイポイントは，AUV がそこにたどり着き次第，時系列上の次のウェイポイントに更新される．SIP 海のジパング計画では，複数機同時運用においてもウェイポイント誘導が適用され，それぞれの AUV は独立した制御の下で行動した．ところが，こうした制御では各 AUV が他機の状態を自分の行動決定に反映できず複数機の協働が難しい上に，的確に管理されなければ AUV が様々なリスクに晒される恐れがある．そこで海技研は複数 AUV 同時運用における真の協働の実現に向け，複数 AUV の行動を連動して制御する隊列制御技術を研究・開発している．

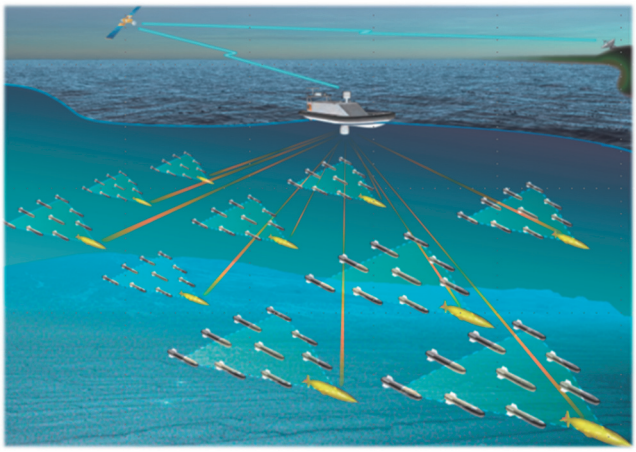
4. 1. 2　リーダー － フォロワー制御手法

複数 AUV の隊列制御を実現する手段として，海技研はリーダー － フォロワー(leader - follower)制御手法を採択している．本手法は，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種で，制御対象の複数機はその役割に基づき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のとおりである．

・ リーダー(leader)： 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達する．自機のみならず属するフォロワーまで含めた隊列全体を管理・管制する．

・ フォロワー(follower)： 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．

リーダー － フォロワー制御手法を用いて複数 AUV 集団を同時に運用するイメージを図－9 に示す．こうした運用が実現すれば，複数機の運用効率は飛躍的に向上する．



図－9 リーダー － フォロワー制御手法による複数 AUV 集団の同時運用イメージ.

5. まとめ

本稿では海技研が平成 26 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，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 隊列制御を中心に，先進的な海底資源調査に資する基盤技術の研究開発に取り組んでいる．

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）（管理法人 : JAMSTEC）によって実施されました．

参考文献

1) Wynn, B. et al., Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. Marine Geology, 352(2014), 451–468.

2) 内閣府・政策統括官（科学技術・イノベーション担当）,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）研究開発計画(2018).

3) Kim, K. and Ura, T., Longitudinal motion instability of a cruising AUV flying over a steep terrain, IFAC-PapersOnline, vol. 48, issue 2, pp. 56–63, Sep. 2015.