

ロボットアーム付き自律型無人潜水機 (AUV) 「SPICE」の開発 Development of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) with Robot Arm SPICE



岡 矢 紀 幸① Noriyuki Okaya
 福 井 厚 市② Koichi Fukui
 松 居 学③ Manabu Matsui
 益 田 興 佑④ Kosuke Masuda
 小谷野 薫⑤ Kaoru Koyano
 中 村 和 行⑥ Kazuyuki Nakamura

海底油田ガス田などの海洋開発事業においても、作業の効率化や、環境影響の低減が求められており、その解の一つとしてAUVに実用化の期待が高まっている。これに応えるため当社は、海中ドッキングステーションやロボットアームを備えた海底パイプライン検査用のAUV “SPICE”を開発した。

In the offshore development business, including offshore oil and gas field development, as well as in other businesses, it is required to enhance operating efficiency and reduce environmental impact, and as a solution to it, there are increasing expectations for the commercialization of autonomous underwater vehicles (AUVs). In response to such expectations, we have developed SPICE, an AUV that is equipped with a subsea docking station and a robot arm for inspecting subsea pipelines.

まえがき

近年、海底油田ガス田や海底鉱物資源などの海洋開発事業においても、作業効率の向上や環境影響の低減が求められている¹⁾。

1 背景／目的

海底油田ガス田の開発・建設・維持整備や海底鉱物資源調査等の海洋開発事業において、海底の調査・海中構造物の建設・検査・整備などは、従来、有索の遠隔操作型無人潜水機 ROV (Remotely Operated Vehicle) で行われてきた。近年のオイル価格の下落や環境影響への関心の高まりをきっかけとし、また一方でAUV (Autonomous Underwater Vehicle) 技術開発の進展に伴い、ROVの作業の一部をAUVで自動化することによる作業の効率化、またその結果として支援船の稼働時間の削減によるCO₂排出量の削減への期待が高まっている。AUVはROVに比べて、高度な技量を必要とするオペレータが不要で、かつ索による行動の制限がない。また、ROVは高度な定点保持能力を有する支援船で運用する必要があるのに対し、AUVはより簡易な支援船での運用が可能である。当社は長年の潜水艦や深海救難艇の建造で培ってきた水中ピークルや水中機器の技術を背景に、AUVの研究開発を2013年から開始した。

2 製品コンセプト／技術課題

当社独自の水中ドッキング技術に加えて、AUVを揚取することなく連続して稼働させるための基盤技術である水中給電技術や、水中光通信技術を開発した。さらにオイル・ガス業界への参入を目指し、パイプライントラッキングや検査用ロボットアームといった従来のAUVにない近接検査が可能となる技術を開発して、パイプライン検査用AUV「SPICE (Subsea Precise Inspector with Close Eyes)」として実用化した²⁾。

現状の海洋調査において主用とされているROVとの得失比較やパイプライン検査会社へのヒアリング結果を基に、製品化のための技術課題を以下のように設定した。

- ・電池容量により航行時間が制限されるため、水中充電システムの搭載など水中ステーションへのドッキング技術が必要。
- ・リアルタイムで状況監視および指示ができないため、パイプライン検索・トラッキング・ロボットアーム制御を自律で行う技術が必要。

3 要素技術の詳細／課題解決プロセス

(1) 水中ステーションへのドッキング技術

これまでのAUVは、電池が切れると船上に回収して充電作業を行っていた。しかし、水中でのドッキングと充電・

データ転送機能を使用すると、洋上に回収することなく海底パイプラインの検査を半永久的に行うことができ、洋上作業の安全性が向上する。この技術は海底設置型ステーションにも応用でき、給電と通信が確保されたステーションを中心に一定の範囲を定期的に巡回検査するシステムにも利用できる。AUVと水中ステーションとのドッキングの様子を図1に示す。

(i) 水中でのドッキング³⁾

AUVはドッキングシーケンスを2段階に分けて実行している。1段階目は、ステーションに備え付けられたポールをキャッチすることである。ポール先端に装備されたトランスポンダの音波に向かって進行し、ステーションとの距離が近づくと、ポールの付け根に装備された全周囲光源を捉え、光源の方向に進むことでAUV前方に装備された凹型の金物がポールを捉える。2段階目として、捉えたポールを中心にAUVが回転して、上方に取り付けられた凸型の嵌合金物をステーション側の嵌合装置の位置に合わせて上昇動作を行い、ドッキングする。この位置合わせにはAUVとステーションの双方に対で取り付けられた光無線通信装置を使用している。

(ii) 水中での充電・データ転送

AUVはステーションとドッキングすると電池を充電する。水中で電力伝送するために、AUVとステーションの双方に対で取り付けられた非接触の給電パッドを使用する。ドッキング中はパッド間同士を数cmの間隔に保ち、電磁誘導を利用して90%以上の効率で送電する。

電池が充電されるのと並行して、ドッキング時に使用した光無線通信装置を介して海底パイプライン検査時に取得した映像や画像の検査データを転送する。

(2) パイプサーチ／トラッキング技術

海底パイプラインに取り付くため自己位置を認識し、パイプサーチを行い検査のためにパイプを機体やアームを使ってトレースしてトラッキングする。

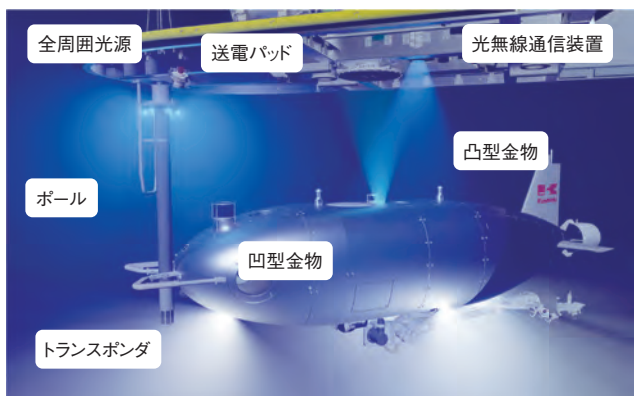


図1 AUVと水中ステーションのドッキング
Fig. 1 Docking between AUV and underwater station

(i) 海中での自己位置認識

海底パイプラインは水深3,000mを超えて敷設されているものもある。このような深海のパイプラインを検査するために、AUVは海中で常に自分の位置を把握しておく必要がある。この役割を果たすのが慣性航法装置 (INS) である。INSはセンサーから取得した加速度・姿勢から自己位置を計算するが、数時間単位で潜航を行うAUVでは、誤差を蓄積してしまう。水中では陸上と違い、自分の位置をGPS等で計測することができないため、音響測位・音響通信によって洋上船から補正を行っている。

(ii) パイプサーチ

海底に到達したAUVはパイプラインの側方の離れた場所から、パイプがあると予想する位置を目指して航走する。マルチビームソナーを使用して、海底マッピングを行いながらパイプの上を通過すると、直線状の濃淡が現れるため、これを画像処理してパイプの位置を特定する。

(iii) パイプトラッキング

パイプの位置を捉えたAUVはあらかじめ決められた方向を向いてパイプ上方数mでパイプトラッキングを開始する。パイプトラッキングは、図2で示すように、パイプサーチで使用したマルチビームソナーを使用してパイプ断面と海底を「かまぼこ型」の形状として検出する。このかまぼこ型の形状を追従制御することで、パイプラインをトラッキングすることができる。さらにAUVの姿勢・高さ・高度を加味して、ロボットアームを制御し、ロボットアーム先端をパイプ近傍へと正確に導いている⁴⁾。

(3) アーム制御技術

水中での近接検査を可能とするために、カメラなどの各種センサ類をパイプラインに正確に近づける技術として、AUV底部に装備する専用ロボットアームを開発した。

(i) 構造

AUVに装備するため、軽量かつ海水中での作動を考慮する必要がある。構造部材は主に耐食アルミ合金を使用した。加えて、使用する軸受やアクチュエータも海中での使用に耐えるものを採用した。

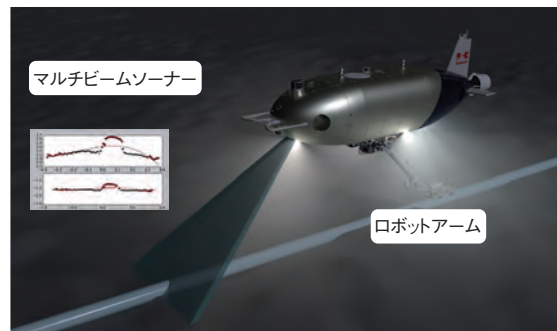


図2 パイプトラッキング
Fig. 2 Pipeline tracking

† 海底パイプラインを中心とするインフラの近距離検査を目的とした自律型無人潜水機 (AUV) や支援船、ステーションなどから構成されるシステム

アームは、手先が任意の位置・姿勢でセンサ類を近接させることができるように、図3に示すように6軸6自由度を持つ設計になっている。ただし、能動的に制御する軸は3軸、残りの3軸はバネによる受動リンク構造とすることで、センサ類が検査対象に合わせて馴染むようにパイプラインに追従する設計となっている。この構造の簡易化によって、軽量化と制御負荷の低減を実現した。

(ii) 制御

地上に固定される従来のロボットアームと異なり、絶えず移動するAUVに装備されるため、図4に示すように移動するAUVが捉えたパイプラインの位置座標と移動後AUVの位置や姿勢を考慮しながら、パイプラインに向けて絶えずアームの手先位置を制御し、AUVの機体がパイプラインから外れてもアーム先端はパイプライン上に制御するロジックを開発した。

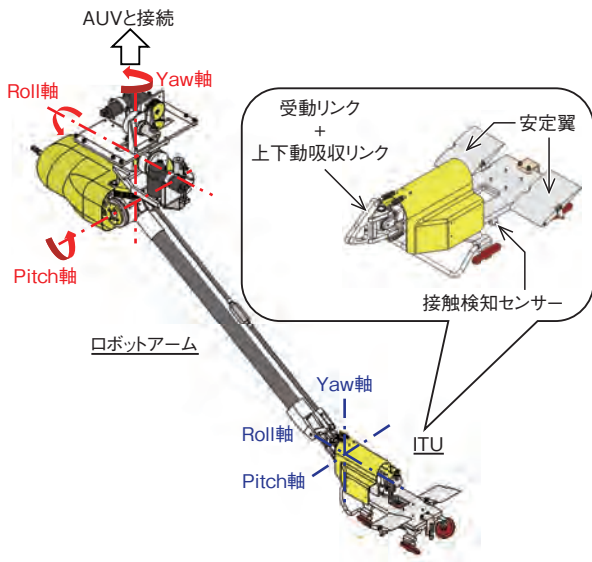


図3 アーム構造
Fig. 3 Structure of robot arm

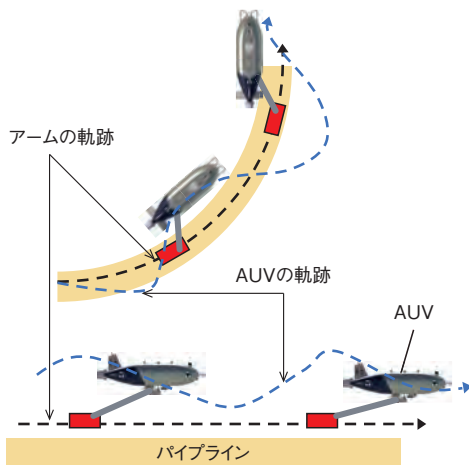


図4 AUVによるパイプ追従動作イメージ²⁾
Fig. 4 Pipeline tracking by AUV²⁾



図5 産業用ロボットを使用したアーム追従動作模擬
Fig. 5 Simulation of robot arm tracking operation using an industrial robot

(iii) ITU (Inspection Tool Unit)

アーム手先に装備するセンサ類を安全かつ確実にパイプラインに追従させるために、ITUを開発した。ITUには走行時の水流によりパイプラインに押し付け力を発生させるための安定翼や、過度な押し付けや障害物など衝突を軽減するためのセンサや吸収機構を有している。ITUはアームの手先に取付けられ、パイプライン上を走行することで、ITUに取り付けられたセンサ類を安定した姿勢でパイプラインに近接させ続けることを可能とした。これにより、従来AUVでは成し得なかった正確かつ精度が高い検査データを取得することを可能となった⁵⁾。

(iv) 実証

AUVに装備されるロボットアームは、世界初の取組みであり、設計・製造や各種試験からAUVに装備するまでの検証方法に多くの課題があった。しかし、当社が蓄積してきたロボット技術により、図5に示すように、産業用ロボットの手にAUV用ロボットアームを取りつけて、AUVを模擬した動きに対してアームの追従動作を確認するなど要素試験を効率的に実施でき、AUVに装備しての動作実証試験までを短期間で進めることができた。

加えて、数々の試験で当社AUVの安定したパイプ追従能力と海底パイプライン近接検査のプラットフォームとして高いポテンシャルを示したとことで、Oil & Gas分野での注目を浴びることになり、2022年9月エネルギースーパーメジャーのトタルエナジーズ社（仏国）と当社AUVを用いて、海底パイプライン近接検査における防食電位計測に関する共同研究海上試験に成功して（図6）、当社AUVの有用性を世界に示すことができた⁶⁾。

4 納入／導入事例

これらの技術を搭載した商用AUV 1号機（図7）を、英国のパイプライン検査会社から2020年に受注した⁷⁾。主



図6 トタルエナジーズ社との共同研究海上試験成功
Fig. 6 Successful offshore testing jointly with TotalEnergies

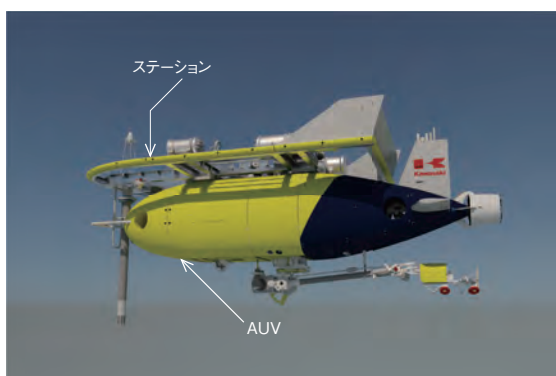


図7 商用AUV 1号機
Fig. 7 First commercial AUV

表1 商用AUV 1号機の主要目
Table 1 Principal particulars of first commercial model

	AUV	ステーション
全長 [m]	5.6	5.6
全幅 [m]	1.3	2.0
全高 [m]	1.5	2.6
空中重量 [ton]	約2.5	約1.2
運用深度 [m]	3,000 (max.)	500 (max.)
電池	リチウムポリマー電池	-
速力 [knot]	4.0 (max.)	-
運用時間 [hours]	10 (検査作業)	-
充電時間 [hours]	3 (水中)	-
非接触充電システム [kW]		10
光無線通信 [Mbps]		100

要目を表1に示す。商用AUVは、最大水深3000mまで潜航が可能で、速力2ノットで10時間のパイプライン検査が可能である。また、ステーションは最大500mまで潜入させることが可能であり、AUV潜航時の電池消費量を減らすことができる。また、水中充電システムは10kWのものを搭載しており、3時間での充電が可能である。

あ と が き

AUVによるパイプライン検査の自動化を目指して技術

開発を行い、パイプライントラッキングの実証試験においてはオイルメジャーの高い評価を得ることができ、実フィールドへ投入も間近なところまで来ている。

今後は浮体式洋上風力発電設備などに対象を広げ、パイプライン検査AUVで培った機体制御技術およびアーム制御技術を生かして、検査対象のニーズに沿った機体や検査手法の開発を行っていく。また、国土交通省が発行した「AUVの安全運用ガイドライン」で示された機体要件や運用要件を満足させ、より安全に運用が可能なAUVを目指す。

最後に、検査用ロボットアームの開発ならびにパイプライントラッキングの実証試験に助成いただいた日本財団、検査センサならびにそのデータ処理の開発に助成いただいた国土交通省殿に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 阪上, 岡矢, 益田: “海底油田を守る: 川崎重工のAUV”, Kawasaki News, No.199, pp.4-8 (2020)
- 2) 特許 第5806568号, “水中移動型検査装置及び水中検査設備”
- 3) 特許 第6990708号, “自律型無人潜水機の充電システムおよび自律型無人潜水機の揚収方法”
- 4) 特許 第7001730号, “潜水艇 (自律型無人潜水艇のアーム協調制御)”
- 5) 特許 第7137342号, “自律型無人潜水機 (パイプラインに対する追従性を高めた本体及びアーム構造)”
- 6) “自律型無人潜水機 (AUV) による海底パイプライン近接検査の実証試験に成功”, 川崎重工業プレスリリース, 2020年7月15日
- 7) “世界初の海底パイプライン検査用ロボットアームを搭載した自律型無人潜水機「SPICE」を受注”, 川崎重工業プレスリリース, 2021年5月18日



岡矢 紀幸



福井 厚市



松居 学



益田 興佑



小谷野 薫



中村 和行