

37. 大水深対応型水中作業ロボットの活用事例と今後の展望

東亜建設工業株式会社

○小川 和樹 飯田 宏

1. はじめに

水中での潜水作業の安全性と施工能力向上を目的に「水中バックホウ」が平成 7 年に開発・実用化され、現在までに遠隔操縦に対応した機種の開発も行われているが、耐水深に関しては水深 50m までしか対応していないのが現状である。耐圧性能向上を目指し、平成 26 年に開発した大水深対応型水中作業ロボット（写真-1）（以下「本ロボットとする」）は、設計耐圧水深を 3,000m としている。この性能を活かし、大水深下までの海洋調査・作業から、海底資源開発に至るまで、幅広い用途での活用を視野に入れている。現在までに、マニピュレータ先端に取り付けた光学式カメラを用いて、海底ケーブルの敷設状況調査、放水路内部での堆積物確認調査など、調査用ロボットとして実績を重ねてきた。本稿では、これまでに現場で活用した事例と共に、今後の展望について報告する。



写真-1 水中作業ロボット本体

2. ロボットの概要

本ロボットは電動駆動方式を採用しており、遠隔による操作を行う。足回りにはクローラを 4 基装備しており、1 基ずつ単独で可動させることが可能である。また各クローラには小型の調査ロボットなどで実績のあるフリッパー機構を採用しており、クローラを 360°回転させることができる。この機構により、凹凸のある場所での走行性能を向上させている。

機体上部には 4 軸式のマニピュレータを搭載しており、先端に作業ハンドやコアリング装置等を取り付けることにより、様々な作業が可能となる。

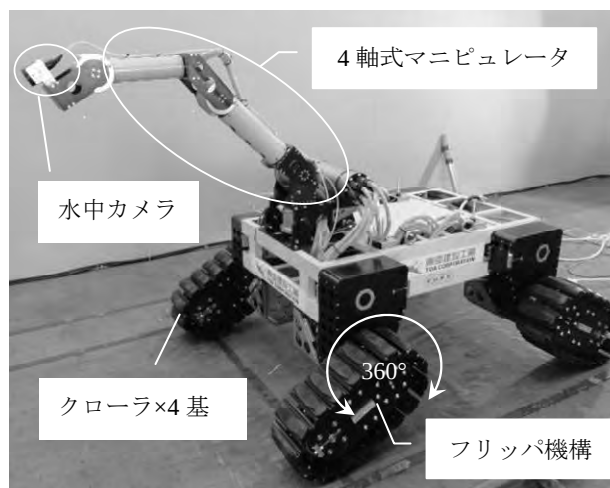


写真-2 水中作業ロボット概要

【装置主要目】

寸 法	2.25×1.65×2.20m (L×B×H)
駆動方式	電動式
質 量	約 1.0t
耐圧性能	水深 3,000m 耐水圧
操作方式	遠隔操縦
通信方式	光ファイバー通信
装 備	4 軸マニピュレータ 光学式水中カメラ 水中音響カメラ搭載可能 3D ソナー搭載可能

【特徴】

- ① アクチュエータには水深 3,000m 相当の耐圧試験¹⁾を行い、仕様通りの耐水圧性能を確認している。
- ② フリッパー角度調整可能な 4 つのクローラを装備しており、不陸のある場所での走破性能を向上させている。
- ③ 小型軽量の装置であるため、運搬や搬入に大型の設備が不要であり、狭隘な環境下でも導入し易い。
- ④ 無人化施工可能な、遠隔操縦システムを採用している。
- ⑤ 簡単なフレーム構造であるため、多様な装備が可能である。
- ⑥ 波浪や潮流の影響を受けやすい橋脚下部、岸壁の調査・補修にも活用可能である。

3. 活用事例

3.1 海底ケーブル敷設状況調査

我が国には数多くの離島があり、送電用や通信用の海底ケーブルも数多く敷設されている。一昨年の10月に、九州地方の離島間に敷設された海底ケーブル調査において本ロボットが適用された。

海底ケーブル調査の目的は、敷設状況の確認と、敷設ルート上の位置確認であったが、この種の作業にはスラスタを搭載した泳動型ROVが有用である。しかし、海岸線（波打ち際）から浅い海域や、波浪の厳しい海域、本調査場所のような潮流の速い海域などでは泳動型ROVによる作業が難しいため、クローラ型のROVである本ロボットを採用した。

本ロボットの気中重量は約1.0t、大きさも2tトラックで運搬できる程度であり、20kVA以上の発電機1台のみで運用することができるため、潜水作業に利用される小型船舶で運用可能である。本調査業務では、潜水土船の船尾ガントリーに本ロボットを吊り下げ現場海域まで運搬し、そのまま潜水土船のウインチを用いて沈降を行った（写真-3）。



写真-3 潜水土船への搭載状況

写真-4には現場海域での本ロボット稼働状況を示す。海底ケーブル調査は、送電用1系統と通信用1系統で調査対象区間の水深は10～20m程度、調査したケーブルの総延長は約500mとなった。現場の海底地形は一部に岩礁や転石もある砂地盤であったため、海底ケーブルの一部は砂に埋もれた形で埋設されており、調査が難しい箇所もあったが、ケーブルの通りを確認しながら本ロボットを走行させることにより、ケーブル敷設座標、水深、敷設状況を確認することができ、所期の目的を達した。また点検していた障害物は、フリック角度を調整し、障害物に合わせて本ロボットの姿勢を変化させることにより安定した走行を可能とした。

現場海域の透明度は非常に高く、マニピュレータ先端に搭載した光学式水中カメラで十分に視認可能であった。また船上にて本ロボットの走行状況を確認すべく、本体後方に俯瞰用のカメラを搭載し（写真-5）、操縦をサポートする形で調査を行った。

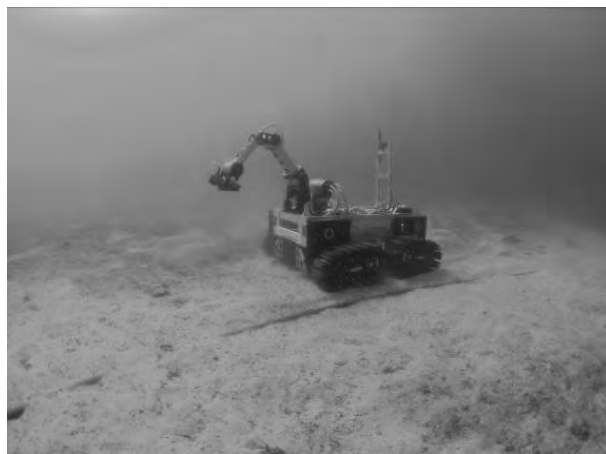


写真-4 海底ケーブル調査状況



写真-5 俯瞰用カメラ映像

3.2 放水路内での堆積状況確認調査

暗渠の維持管理では、経過年数による劣化や生物の付着、土砂の堆積により機能が低下する恐れがあるため、定期的に調査を行い、状況によっては補修や堆積物の除去を行う必要がある。水中構造物における調査や補修工事は、潜水土による作業が一般的であるが、暗渠での作業は安全面から制約が多く、水中を走行することができる機械による対応が望ましい。

当社で保有する水中作業ロボットは、本ロボットの他にも遠隔操縦型の水中バックホウ（写真-6）があり、これまでに数多くの工事に活用してきた。水中バックホウのアタッチメントは、用途に応じて換装することができ、放水路内部の調査以外にも、堆積物を除去する等、多岐にわたる作業に対

応可能である。しかし、狭隘な環境下での作業は、サイズの水中バックホウのような重機での走行は厳しく、設備も大がかりになる。その点、本機は、小型の水中作業ロボットであるため狭隘箇所でも進入が可能であり、運用も 20kVA 以上の発電機 1 台で行うことができる。これらの点から、今回の調査業務では小型軽量で大型設備を不要とする本ロボットが採用された。



写真-6 水中バックホウ（イエローマジック7号）

放水路内部の調査を行うにあたり、障害物の状況を把握し、走行経路を確認しながら操作を行う必要がある。透明度の高い水域で作業を行う場合は、マニピュレータ先端に標準装備している光学式水中カメラのみによる視認も可能であるが、今回調査を行った暗渠は非常に狭隘であり、クローラ走行により発生する濁りによって、光学式水中カメラの映像のみでは走行することが難しい状況であった。そこで今回の調査業務では、周囲を常時確認できる映像を取得すべく、水中音響カメラ（写真-8）と、3D ソナー（写真-9）を装備した。



写真-7 機材搭載状況



写真-8 水中音響カメラ本体

表-1 水中音響カメラ仕様

動作周波数	1.1MHz / 1.8MHz	
ビーム幅	水平	0.6° / 0.3°
	垂直	14°
ビーム数	48 本 / 96 本	
視野角	29°	
耐水深	300m	



写真-9 3D ソナー本体

表-2 3D ソナー仕様

送信周波数	375kHz / 375kHz , 610kHz
ビーム数	128×128
ビン・レート	最速 12Hz
探査レンジ	1～120m / 1～120m, 1～90m
レンジ解像度	4.0cm
探知範囲	最大 50°×50°
耐水深	600m

水中音響カメラと、3D ソナーを現場に導入するにあたり、本ロボットへの取り付け方法と、実際にどのように視認できるのか確認すべく、事前に試運転を行った（写真-10）。

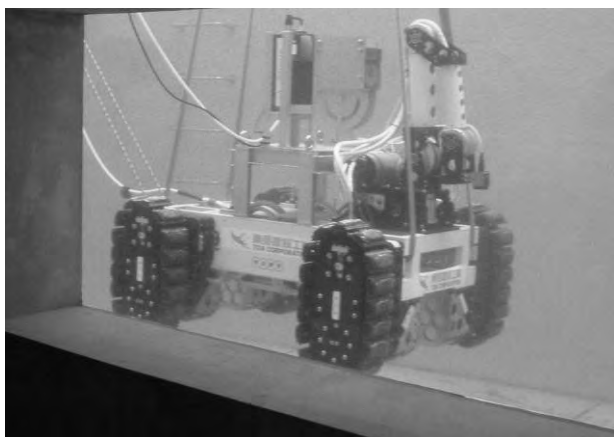


写真-10 試運転状況

今回使用した水中音響カメラは、1.8MHz及び1.1MHzと極めて高い周波数の超音波を使用した音響ビデオカメラであり、音響ビームによる反射でターゲットを映像化するものとなっている。実際に取得した映像を図-1に示す。画面左側が放水路内左壁面、右側が右壁面となり、今回の調査では本ロボットの位置から10m先までの映像を取得し、放水路内部を上から俯瞰的に見下ろすような形で確認しながら調査を行った。水中音響カメラの映像により、壁面との距離と障害物の位置情報をリアルタイムで取得でき、常時安定して走行することが可能であった。

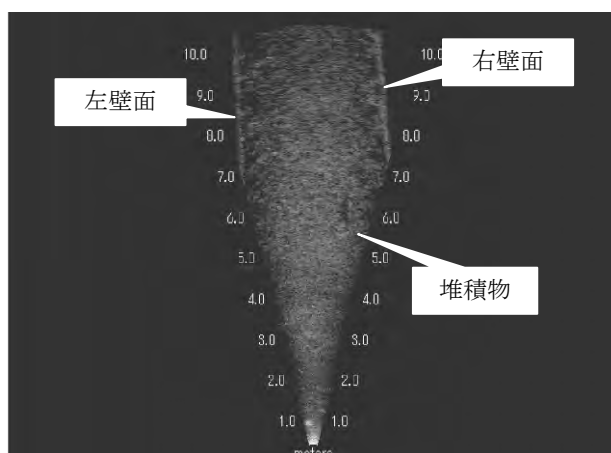


図-1 音響カメラ映像

3D ソナーにて取得した映像を図-2に示す。実際に撮影された映像から、ほとんど堆積が無く平坦な場所でも、水中の遮蔽物やノイズなどの影響を受けて、堆積物があるような凹凸が多く見られたため、3D ソナーにて堆積状況を正確に把握するこ

とは難しい印象を受けた。しかし比較的大きな堆積物（高さ 300 mm程度）に関してははっきりと確認することができた。また底面の堆積状況によってはクローラの走行痕が残るため、音響カメラによる映像と併用し操縦の目安として用いる分には有効的であった。

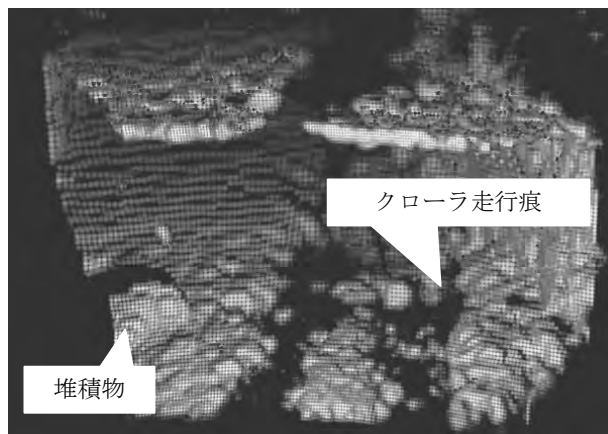


図-2 3D ソナー「Echoscope」映像

壁面に付着した堆積物の調査は、本ロボットのマニピュレータ先端に搭載した光学式水中カメラを用いて撮影した（写真-11）。また、本体左側面にも同カメラを搭載し、壁面と本体との間隔を確認しながら走行した（図-3）。

放水路内は、通常より流量を減らしながらも排水を行っており、常時流れがある状況であった。しかし、本ロボットの走行時に発生した濁りが滞留してしまい、水中ライトの光によって撮影した映像がハレーションを起こしてしまうことから、光学式水中カメラで調査を行うためには、被写体までできる限りカメラを近づける必要があった。そのためマニピュレータ先端に 500mm のメジャーを取り付け、カメラと被写体との撮影間隔が毎回一定になるように調整しながら調査を行った。



写真-11 光学式水中カメラ

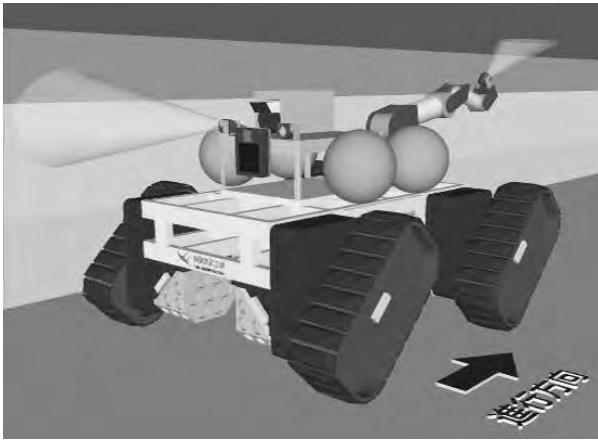


図-3 調査状況イメージ図

撮影場所によって堆積状況にばらつきが見られたが、一番堆積物が多い箇所では写真-12 の様に、海生生物が隙間なく付着している状況を確認した。放水口から 5m 間隔で上下左右の撮影を行い、所定の距離までの測点を調査することができた。



写真-12 光学式水中カメラ映像（放水路内壁面）

4. 今後の展開

4.1 アタッチメントの開発

本ロボットは、箱型に組まれたフレームにクローラなどを搭載した簡単な構造としているため、多様な装置の搭載が可能である。現状、本ロボットのアタッチメントとして 4 軸マニピュレータを取り付けており、先端には光学式水中カメラを搭載している。今後は、海洋資源開発・海洋インフラの調査・施工などへの活用も視野に入れており、より多機能な水中作業ロボットとすべく、使用用途に合わせたアタッチメントの開発が望まれる。

本ロボットのフレーム上に搭載するアタッチメントの一例として、図-4 に双腕型アーム装着時のイメージ図を示す。

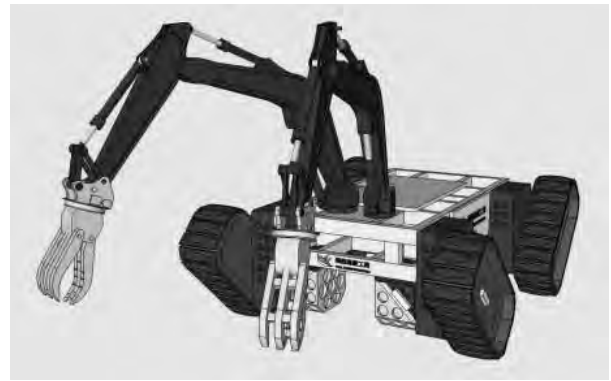


図-4 双腕型アーム装着イメージ

アームを双腕とすることによって、より繊細な作業にも対応できる。しかし、それに起因して機能が複雑化するため、今後オペレーターの育成も視野に入れたアタッチメントの開発が求められる。

図-5 には削孔機（ドリフター）を装着したイメージ図を示す。これにより、岩盤掘削にも活用可能と考えられる。また、図-6 のようなダンプユニットを搭載することにより、海底の荷役機械として活用することも考えられる。今後、多様な作業に対応できる汎用性の高い装置とすべく、これらのアタッチメントの実用化に向けた開発に取り組んでいきたい。

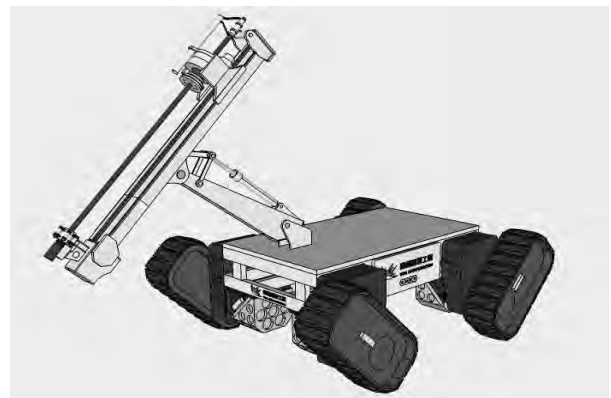


図-5 削孔機（ドリフター）装着イメージ

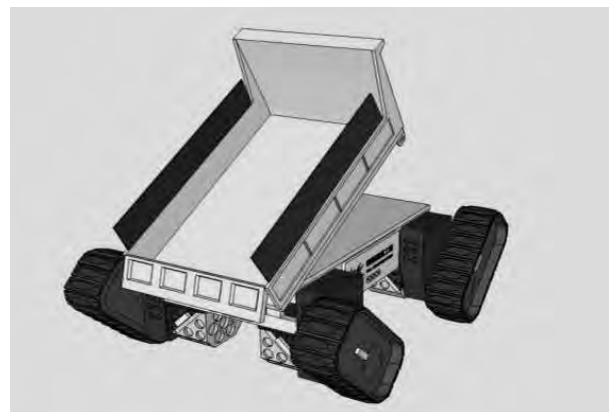


図-6 ダンプユニット装着イメージ

4.2 作業性の拡大

本ロボットは、小型軽量で耐水圧が水深 3,000m と大水深での作業も可能であるため、水中のインフラ施設の調査・メンテナンスの他（図-7）、海底資源開発（図-8）にも活用できると考えられる。

また、動解析シミュレーションを用いた性能確認試験により、本ロボットにスラスタ（推進装置）を取り付けることによって、壁面上を平面的に移動しながら作業可能であることを確認している。これにより、図-9 に示すような垂直に近い壁面上での調査や、障害物が多く堆積する暗渠において、目的地点到達の実現性を飛躍的に向上させることができると考えられるため、今後の導入を検討中である。



図-7 橋脚下部 洗掘調査 イメージ図

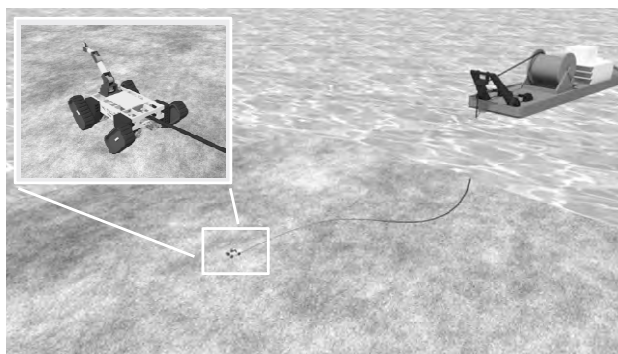


図-8 大水深での海洋開発 イメージ図

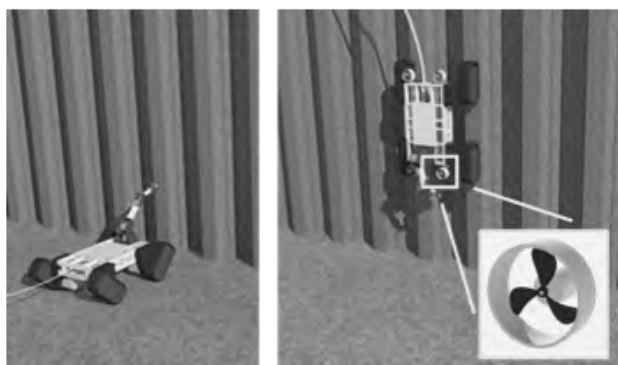


図-9 鋼矢板側面調査 イメージ図

5. おわりに

本稿で紹介した大水深対応型水中作業ロボットは、新たな事業を開拓できるツールとして非常に有用な施工機械であると考えている。現状の作業実績としては、前述した海底ケーブル調査（最大水深 20m）や、放水路内部調査と、比較的水深が浅い環境下において「調査ロボット」という形で用いられているが、今後は大水深での構造物の建造、調査、メンテナンス、更には海底資源開発、石油天然ガスなどの開発も視野に入れた技術開発にも積極的に取り組んでいく所存である。

当社は港湾工事を得意とする建設業として、事業を発足してから 100 余年を迎えている。今後はこれまで培ってきたノウハウを活かし、従来の建設工事にとらわれない独自の発想で海洋インフラ調査・施工や海洋開発などの分野に参画していきたい考えである。また本開発で得た知見をもとに、既存の水中作業ロボットの作業フィールド拡大に繋げていければと考える。

参考文献

- 1) 泉信也，飯田宏，津久井慎吾，大村誠司，高橋弘：大水深対応型水中作業ロボットの開発，第15回建設ロボットシンポジウム講演集，O-51，2015