

ダム点検用水中調査ロボット 「Cetus-V・Mark II」の開発

本 山 昇

近年、老朽化が進む社会インフラの効率的・効果的な維持管理が求められている。水深 40 m 以深の大水深となるダム堤体の点検・調査においては、安全面と効率面から潜水土による調査が困難であるといった課題を抱えている。そのような背景から、著者らは 2014 年度より水中調査ロボットの開発に取り組んでおり、2016 年度には初号機の課題を踏まえて新たな水中調査ロボットを新造した。新造した水中調査ロボットはこれまで、室内実験による運動性能および検査機能の検証や、2016 年度に国土交通省が実施した「試行的導入」によって、実環境における調査効率などの検証を行ってきた。

本報は、新造した水中調査ロボットの特徴について、これまでの室内実験や実環境での調査結果を踏まえて紹介するものである。

キーワード：維持管理、大水深、ダム、堤体、水中調査ロボット

1. はじめに

高度経済成長期を中心に整備された我が国の社会インフラは、長きにわたり国民の生活基盤として機能してきた一方で、老朽化が進行しており、効率的・効果的な維持管理が求められている。維持管理を行っていく上で、構造物の点検・調査が基本となるが、水深 40 m 以深の大水深となるダム堤体の点検・調査は、安全面と効率面から潜水土による作業が困難である。

このため、著者らは 2014 年度より、遠隔操作無人探査機 (Remotely operated vehicle : ROV) を利用した、大水深域に適用できる水中調査ロボットの開発に取り組んでいる。

2014 年度に開発した水中調査ロボット初号機「Cetus-V (シータスファイブ)」(以下、「初号機」と記す。)では、2014 年度の宮ヶ瀬ダム、2015 年度の天ヶ瀬ダムにて実施された、国土交通省の公募である「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」に参加し、水中調査ロボットを用いたダム構造物の点検・調査のノウハウ蓄積や、課題抽出を行った。その結果、初号機では、潜水作業が困難な水深 40m 以深において、潜水土が行う目視点検や形状把握と同等の作業を行えることを確認でき、国土交通省より『「試行的導入」を推薦する』と評価された。

それを受け、2016 年度には、「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」によって抽出された課題を踏ま

え、初号機より調査能力を向上させた水中調査ロボット 2 号機「Cetus-V・Mark II (シータスファイブ・マークツー)」(以下、「本ロボット」と記す。)を開発し、室内実験での運動性能および検査機能の検証や、同年度に実施された「試行的導入」に参加し、実際のダムでの調査効率などの検証を行ってきた。

本報は、新造した本ロボットの特徴について、初号機の特徴との比較や、これまでの室内実験や実環境での調査結果を踏まえて紹介するものである。

2. 改良機能および新機能

初号機では、2014 年度および 2015 年度に実施された、国土交通省の公募「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」に参加し、水中調査ロボットを用いたダム構造物の点検・調査のノウハウ蓄積と共に、より点検・調査能力・効率を向上させるための課題抽出を行ってきた。これまでの現場検証によって抽出された主な課題は、ロボットの航行速度向上や、ダム堤体壁面の変状(クラックなど)の有無をロボットのカメラによって調査する概略調査(以下、「概査」と記す。)効率の向上であった。これらの課題を改善するため、新造した本ロボットには、スラストのモータ出力向上による航行速度の向上を行った。また、新たな検査機能として、ダム壁面に正対して離隔距離を一定に保ちながら撮影できるタイヤ付ロッドの装備や、ダムの継目やク

表—1 初号機との主な機能の比較表

	項目	初号機	本ロボット
改良機能	航行速度	25 cm/s	50 cm/s
	計測用カメラ解像度	120 万画素	500 万画素
新機能	タイヤ付ロッド	—	壁面走行が可能
	漏水検知装置	—	漏水量を計測可能

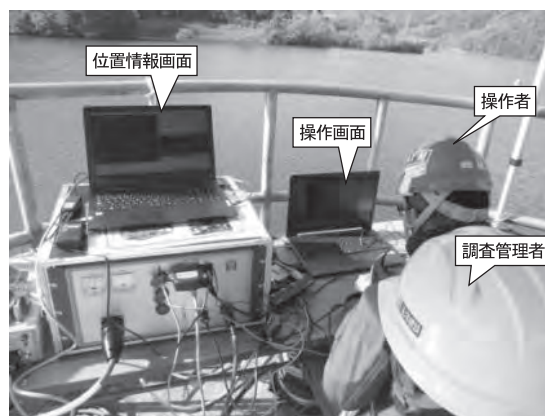
ラックから漏水が発見された場合に、その場で漏水量を計測できる漏水検知装置を搭載した。表—1に初号機と、本ロボットとの機能の比較表を示す。各改良機能や新機能の詳細については、次章の「3. 本ロボットのシステム概要」に示す。

3. 本ロボットのシステム概要

図—1に本ロボットのシステム概要図を、写真—1に操作室を示す。本ロボットは、陸上に設置した操作室より、本体に搭載した操作用カメラの映像を見ながら遠隔操作することが可能である。また、本ロボットは、操作室内に設置した本ロボットの制御装置とテザーケーブルで接続されており、ケーブルを介して制御信号の通信や、陸上に設置した発電機から動力を得ている。

本ロボットの位置は、GNSSと水中音響測位装置を組み合わせたポジショニングシステムによって、測位することが可能である。また、取得した測位データより、本ロボットと構造物をパソコンにグラフィック表示することで、操作者は本ロボットと構造物の位置関係を視覚的に把握することが可能である。

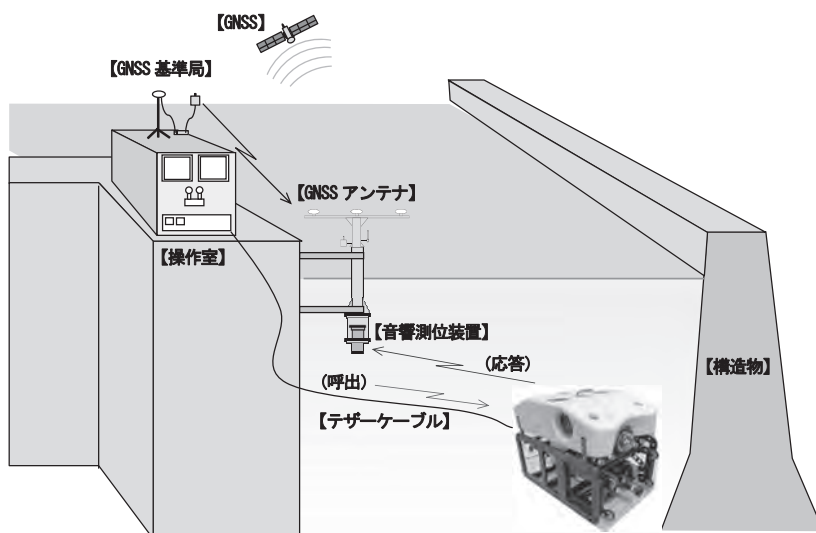
本ロボットの投入および回収には、吊りケージを使用する。写真—2に吊りケージを示す。吊りケージ



写真—1 操作室



写真—2 吊りケージ



図—1 システム概要図



写真-3 吊りケージによる本ロボット投入状況

に本ロボットを載せ、積載型トラッククレーンなどを使用して陸上より吊り下げ、本ロボットを水面に浮かべる。その後、本ロボットを遠隔操作してケージ内から離脱させ水中へ投入する。また、回収時は、投入時と逆の手順によって行う。これによって、水面上での玉掛け・玉外し作業が不要となり、そのための船舶および人員の配備が不要である。写真-3に吊りケージを使用した本ロボットの投入状況を示す。

(1) 本ロボット

写真-4に本ロボットを示す。本ロボットは、長さ100 cm、幅70 cm、高さ77 cmであり、質量は約100 kg、適用水深は150 m以浅である。水中では中性浮力を保持し、機体の各方向に配備した計6基のスラストによって、前後、上下、左右方向へ航行することが可能であり、スラストの自動制御機能によって、任意に設定した深度や方位の保持が可能である。また、航行速度は、スラストのモータ出力の向上や、スラストを管内に設置し、スラストの流水路を確保したことによって、初号機に比べ大きく改善されている。室内実験にて航行速度を計測した結果、初号機での前進の

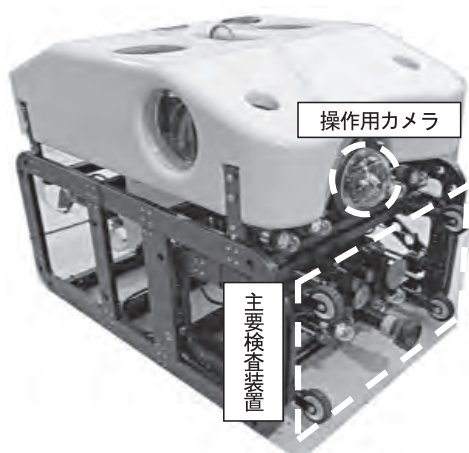


写真-4 本ロボット

最高航行速度は約25 cm/sであったのに対し、本ロボットでの前進の最高航行速度は約50 cm/sであり、速度は2倍に向上している。

(2) 主要検査装置

写真-5に主要検査装置を示す。機体前面には、主要検査装置を搭載しており、構造物の高精細な画像を取得する計測用カメラ、構造物壁面をケレンする清掃用ブラシ、壁面からの漏水量を計測する漏水検知装置などの機能を有する。検査装置は下方方向に30°まで傾けることができるため、壁面の傾斜に合わせて検査装置を正対させることが可能である。また、検査装置は、左右方向に移動させることが可能であるため、壁面に対して正対する際の左右方向への微調整が可能である。

図-2にタイヤ付ロッドの使用イメージを示す。主要検査装置を使用する際は、装置の四隅に配置したタイヤ付ロッドを使用する。タイヤ付ロッドは、新造したロボットに新たに装備した機能であり、ロッドを張り出した本ロボットを壁面に向かって前進させて、ロボットを壁面に押し付ける。その状態で、壁面と平

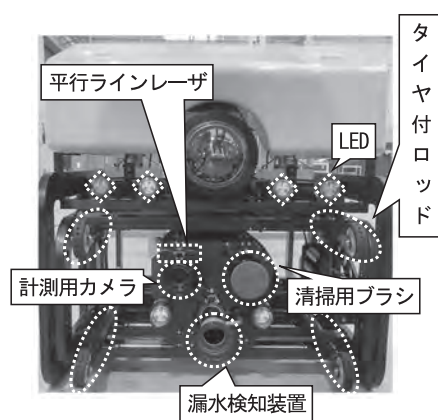


写真-5 主要検査装置

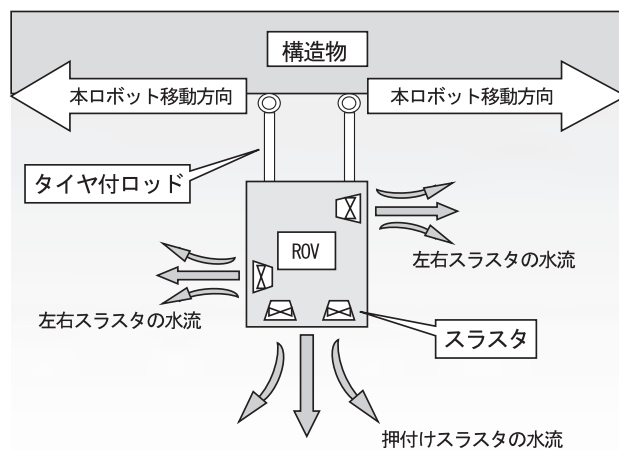


図-2 タイヤ付ロッド使用イメージ図

行方向のスラストを動作させることで、本ロボットを壁面に沿って走行させることが可能である。

また、押し付け状態から、さらにスラストの推進力を上げ、より強く壁面に押し付けることで、ロッド内部に仕込んだピンが突出し、タイヤ表面に開けた穴にピンが入ることでタイヤをロックできる機構とした。これによって、堤体壁面において本ロボットの位置を保持することが可能であり、合わせて清掃用ブラシや漏水検知装置を使用する際の反力を得ている。

(a) 計測用カメラ

計測用カメラは、約 500 万画素の光学カメラを搭載しており、初号機の 120 万画素から大幅に解像度を改善した。これによって、構造物の高精細な画像を取得することが可能である。カメラは、1 秒間に約 15 枚の画像を連続的に取得できるため、タイヤ付ロッドを使用して、壁面と本ロボットの離隔距離を一定間隔に保ち、壁面を走行しながら撮影することによって、効率的に壁面の概査を行うことが可能である。また、機体前面には LED ライトを搭載しており、水深の深い暗い調査箇所においても必要となる光量を確保し、調査することが可能である。写真—6 にタイヤ付ロッドを使用した壁面走行状況を示す。タイヤ付ロッドを使用した概査は、「試行的導入」の際に実際のダム堤体を対象に実施しており、その際のカメラと堤体の離隔距離は 55 cm、走行速度は 15 cm/s である。概査の結果、4 時間 30 分で約 500 m² の調査が可能であり、調査効率は約 110 m²/h であった。これは、初号機の調査効率の約 90 m²/h に比べて、20% の向上である。

(b) 清掃用ブラシ

清掃用ブラシは、調査対象の壁面に藻などが付着している場合に、先端のブラシを回転させることで壁面をケレンし、付着物を取り除くことが可能である。ブラシは、簡易に取り外して交換することができるため、付着物に応じて適したブラシを使用することが可



写真—7 壁面清掃状況

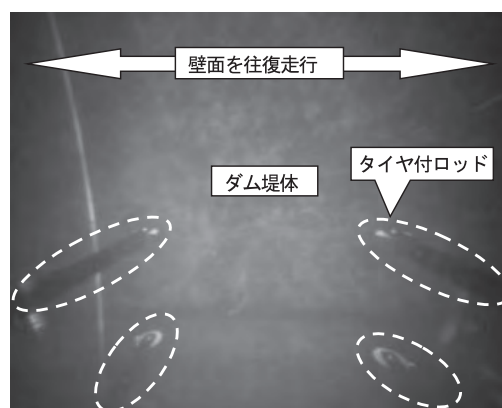
能である。写真—7 に壁面の清掃状況を示す。清掃用ブラシによる壁面の清掃は、「試行的導入」の際に実際のダム堤体を対象に実施しており、ダム堤体に付着した藻などの付着物を取り除き、清浄な検査面にすることが可能であった。

(c) ラインレーザー

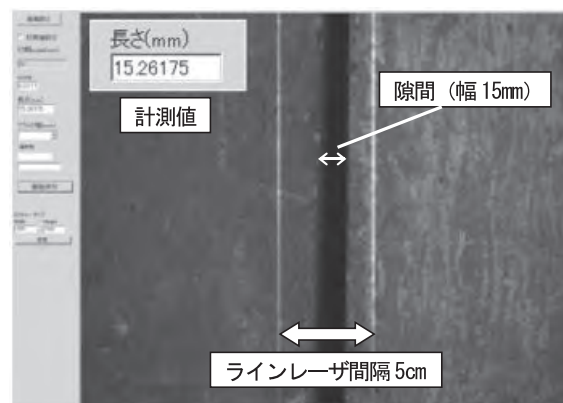
壁面のクラック幅などを計測する場合は、平行ラインレーザーを使用する。レーザーを壁面に照射し、レーザーを計測用カメラの画角内に写り込ませて計測対象を撮影する。レーザーは 5 cm の間隔を有しており、取得した画像上から、レーザーの間隔の画素数を長さの基準とし、計測対象の画素数からクラック幅や剥落面積などを計測することが可能である。また、計測精度については、室内実験にて検証を行った。水槽にコンクリートブロックを 15 mm の隙間を開けて設置し、その隙間の幅を対象に計測を行った結果、約 15.3 mm であり、高い精度で計測可能であることを確認した。写真—8 にラインレーザーを写り込ませてブロックの幅を撮影した計測用カメラの写真を示す。

(d) 漏水検知装置

漏水検知装置は、新造した本ロボットの新機能であり、構造物壁面のコンクリート継目やクラックに漏水がある場合、漏水量を計測することが可能である。装置は、内径 4 cm の管内に電磁流速計を設置しており、管軸方向の流速を計測することが可能である。先端部

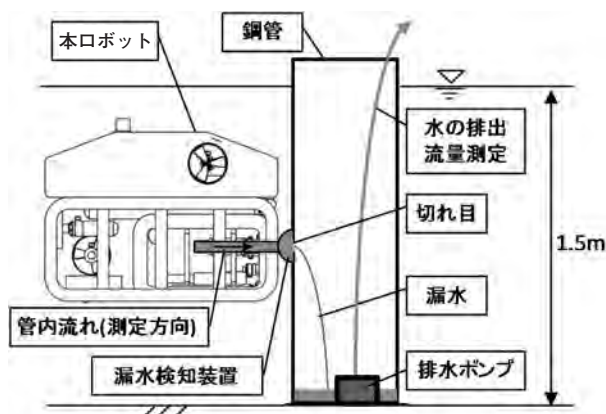


写真—6 タイヤ付ロッドによる壁面走行状況

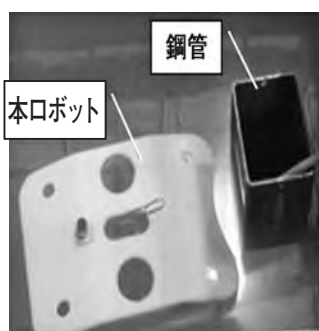


写真—8 ラインレーザーを写り込ませた隙間

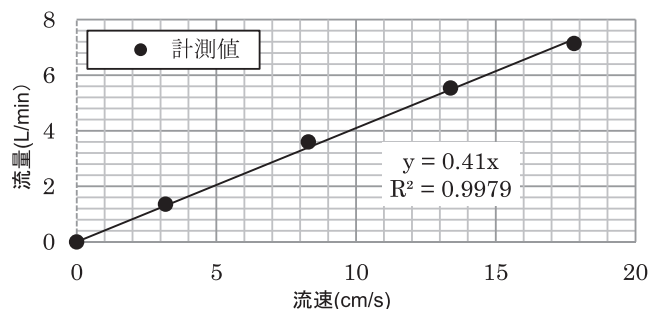
分は直径 15 cm のドーム形状であり、壁面の調査箇所をドームで覆うように押し付ける。この時、管軸方向に流速が検出された場合は、壁面に漏水が発生していると判断し、得られた流速から漏水量を算出することが可能である。得られた流速と漏水量の関係を算出するため、室内実験を行った。鋼管に切れ目を入れて漏水を模擬し、そこへ本ロボットに搭載した漏水検知装置を押し付け、流速と鋼管内に流入する流量の計測を行った。図一 3 に実験イメージを、写真一 9 に実験状況を示す。実験の結果、流速 x (cm/s) と漏水量 y (L/min.) との関係は、 $y = 0.41x$ であった。この時の流速は 30 秒間の平均値を使用した。図一 4 に測定された流速と流量の関係を示す。この関係式を用いて、計測した流速から流量（漏水量）を算出することが可能である。



図一 3 実験イメージ



写真一 9 実験状況



図一 4 流速と流量の関係グラフ

4. おわりに

新造した本ロボット Cetus-V・Mark II では、これまでの室内実験や「試行的導入」によって、初号機に比べてダム堤体の調査能力および効率が大幅に改善されたことが確認された。今後は、更なる機能の拡張などに取り組むことで、本技術の適用範囲を広げ、より効果的・効率的な維持管理に貢献していく所存である。

謝 辞

「試行的導入」において、格別のご配慮をいただいた国土交通省、(一財)先端建設技術センター、試行現場をご提供いただいたダム管理所ほか、多大なご協力をいただいた関係各位に誌面を借りて謝意を表す。

J C M A

《参考文献》

- 1) 水野剣一, 杉本英樹, 武井俊哉, 森屋陽一, 小笠原哲也: ダム上流面の水中部における水中調査ロボットの点検・調査, 土木学会第 72 回 年次学術講演会, VI-957, pp.1913-1914, 公益社団法人土木学会, 2017.8
- 2) 水野剣一, 杉本英樹, 森屋陽一, 小笠原哲也, 武井俊哉: 水中調査ロボットによる水中部のダム上流面の点検・調査の現場実証, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 17 巻, pp.539-544, 公益社団法人日本材料学会, 2017.10

【筆者紹介】

本山 昇 (もとやま しょう)
五洋建設㈱
船舶機械部開発グループ

