

水中調査ロボットのダム堤体点検・調査への適用

水野 剣一* 小笠原 哲也*
杉本 英樹** 森屋 陽一*

要 旨

構造物の維持管理を行う上で点検・調査が基本となるが、水深 40m 以上の大水深となるダム堤体や海洋・港湾構造物では、安全面と効率面から潜水士による目視調査が難しいという課題がある。このため、遠隔操作無人探査機を利用した大水深域に適用できる水中調査ロボットを開発した。

2014 年度および 2015 年度に国土交通省が公募した「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」に参加し、開発したロボットを実際のダム構造物の点検・調査に適用した。水中調査ロボットのシステムの機能、性能、運用性、点検品質、工期、経済性など総合的な側面から検証され、本ロボットは、試行的導入推薦レベルの技術であると評価された。今後は、実証試験で得られた成果をもとに、水中構造物の診断に必要な機能拡張などに取り組み技術の適用範囲を広げていく予定である。

1. はじめに

高度経済成長期を中心に整備された社会インフラは、長期間にわたって国民の生活を支えてきた一方で、老朽化が進行しており、効率的・効果的な維持管理を行う必要が生じている。構造物の維持管理を行う上で点検・調査が基本となるが、水深 40m 以上の大水深となるダム堤体や海洋・港湾構造物では、安全面と効率面から潜水士による目視調査が難しいという課題がある。

このような背景を踏まえ、著者らは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を開発した。本稿では、国土交通省により公募された「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」に参加し、2014 年度の宮ヶ瀬ダム、2015 年度の天ヶ瀬ダムで取組んだ現場実証試験で得られた成果について報告する。

2. 水中調査ロボットの概要

ロボットは、本体のカメラからの映像を見ながら船上や陸上の操作室から遠隔操作して無人航行できる。ロボットの寸法は長さ 90cm、幅 56cm、高さ 63cm、気中重量は約 90kg である (写真-1 参照)。耐水圧性能は、海水中で水深 150m を有する。ダム堤体とロボットの位置関係は、水面に浮かべたブイに設置した GNSS、方位センサ、音響測位装置、ロボットに組み込んだ水圧計、方位・姿勢センサなどのデータからロボットの位置および姿勢をグラフィック表示することで視覚的に把握できる。また、誘導

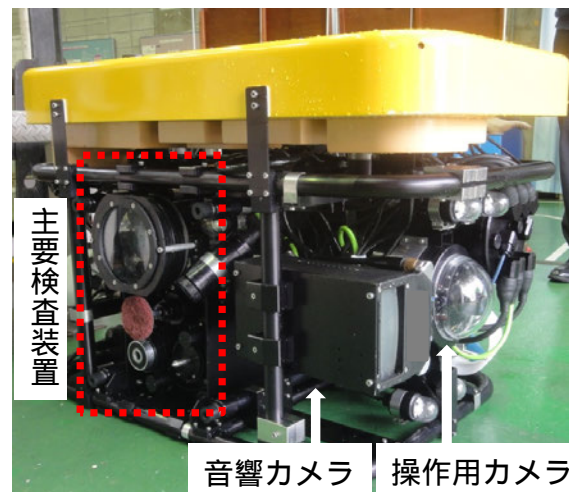


写真-1 水中調査ロボット

支援として予め登録した調査目標地点とロボットを線で結んで表示し、XYZ それぞれの方向のズレ量をテキスト表示する機能を装備している。主要検査装置として、ケレン装置、肉厚計、打音装置を具備する。(写真-2)これらの装置は旋回機能を持つ一枚の円盤上に配置しており、ロボット本体をコンクリート壁面に押し付けたまま同一箇所の作業ができるため、作業ごとにロボットを移動させるなどの操作の必要が無い。ロボットは 3 方向 6 基のスラストによって自由な移動ができ、水中では中性浮力を保持することからスラストの制御によって任意に設定する深度や方位の保持が可能である。

*技術研究所 土木技術開発部

**本社 土木本部 船舶機械部

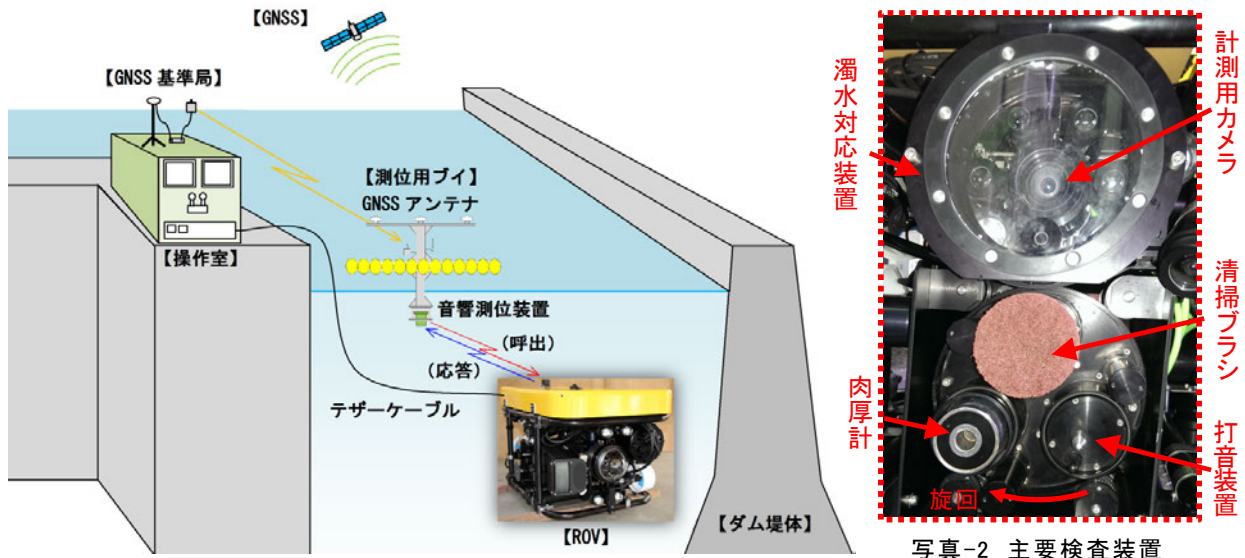


図-1 システム概要図

ロボット側面に主要検査装置を配備しており、ダム堤体などの壁面調査を行うときには、角度調整した伸縮ロッドを介して適切な角度と距離でロボットを壁面に押し付けて位置保持して、主要検査装置により近接点検する。近接点検では、調査箇所をケレン装置で清掃したのち、計測用の光学カメラによって高精細な画像を取得することができ、さらにダムゲートのような鋼材の肉厚測定や、ダム堤体などのようなコンクリート壁面の打音検査を行うことができる。水中深くではLEDライトによって必要な光量を確保できる。なお濁水中においても、音響カメラによって、距離情報を含んだ扇状の画像で水中の様子を可視化することができる。

図-1に水中調査ロボットのシステム概要図を示す。

3. 宮ヶ瀬ダムの現場実証

3.1 宮ヶ瀬ダムの現場実証の概要

水中調査ロボットの現場実証試験は、2014年11月に神奈川県宮ヶ瀬ダムにおいて実施した。宮ヶ瀬ダムは、2001年に運用開始した首都圏最大のダムであり、堤頂長約400m、堤高156m(日本で6番目)で型式は重力式コンクリートダムである。ダム堤頂の標高は290m、ダム上流側の壁面は標高210mまで1:0.2の勾配を有し、それ以降では1:0.6の勾配となる。現場実証を行った11月は非洪水期であり、水面高は標高283m程度に調整されていた。現場実証試験の調査項目は5項目であり、①ダム堤体コンクリートの浮き・剥離などの状況確認(水深約20m)、②ひび割れ、突起物や剥落部をあらかじめ設けた模擬体の変状確認(水深約17m)、③高位常用洪水吐の状況確認(水深約48m)、④低位常用洪水吐の状況確認(水深約93m)、⑤ダム最深部付近の状況確認である。

必須とされたのは①～③の項目であり、④、⑤については任意であったが、継続して本ロボットにより調査を行った。現場実証状況を写真-3に示す。

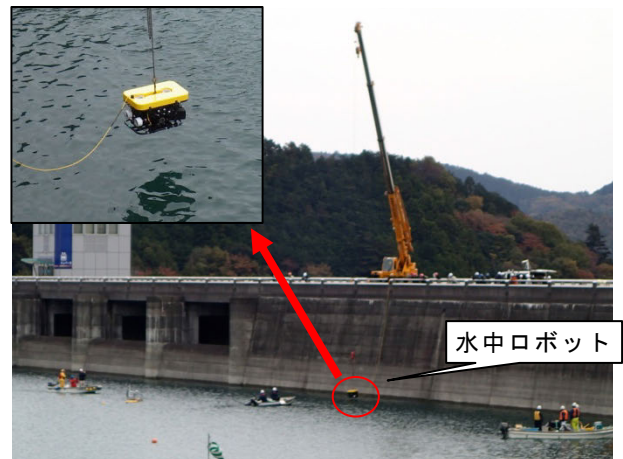


写真-3 宮ヶ瀬ダム現場実証状況

3.2 宮ヶ瀬ダムの調査結果

宮ヶ瀬ダムの湖水の濁度1と透明度は高く、水深約20mにおいて計測用カメラによってダム堤体の鮮明な画像を取得でき、コンクリート打継目の視認も可能であった。水平方向に約50mロボットを走らせ調査したが、画像取得できる範囲内で浮き・剥離などは確認できず、調査した箇所は健全であると判断できた。ダム堤体水深約17mに設置された模擬体の鮮明な画像を計測用カメラで取得し、調査後に画像を撮影する時に照射したグリーンレーザ(間隔10cm)を長さの基準として模擬体の外形、ひび割れ、突起物や剥落部の寸法を算出して図化した(写真-4参照)。模擬版が緩やかな斜面に設置されていたため、

ロボットを模擬体に正対した画像が取得できず、模擬体長さ（実際は 2m）の計測誤差が大きくなったが、そのほかの測定対象物は概ね計測ができた。

また、傾斜のあるダム上流面においては薄く堆積物で被覆されている箇所が多い。写真-5に示すように清掃用ブラシで清掃を行うことで、写真-6に示すような堆積物を除去した清浄な検査面とすることができた。機械駆動のハンマーで検査面を叩き、近傍の水中マイクで打音を取得することができたが、宮ヶ瀬ダムでは明らかな浮き・剥離箇所がなく、健全部のみで打撃音を取得したこともあり、検出比較はできていない。水深約48mの高位常用洪水吐では、管口部を光学カメラと音響カメラで撮影し形状を比較した。写真-7に示すように、光学カメラと音響カメラの形状は概ね一致しており、本ロボットに搭載した音響カメラによって水中の透明度が悪い場合でも構造物を視認できる可能性が示唆された。また、水深約93mの低位常用洪水吐では鋼管内に進入し、管内底部に木や葉が堆積していることを確認した。最後に、ダム最深部と推定される水深約127mまで潜航して堆砂や沈木を確認し、潜水士では難しい大水深域まで調査が可能であることを確認した。（写真-8）



写真-5 壁面清掃状況

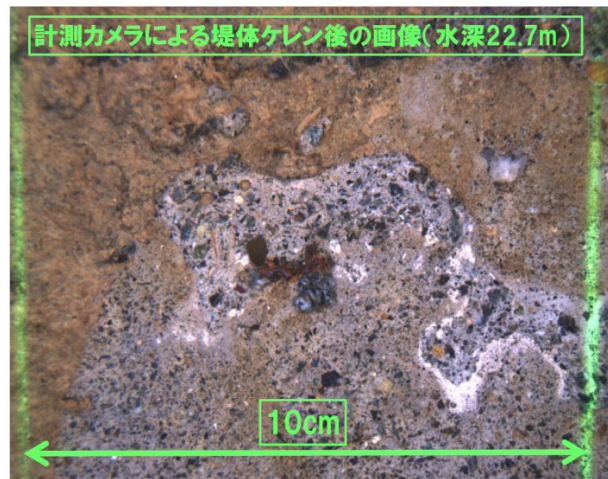


写真-6 壁面清掃後状況

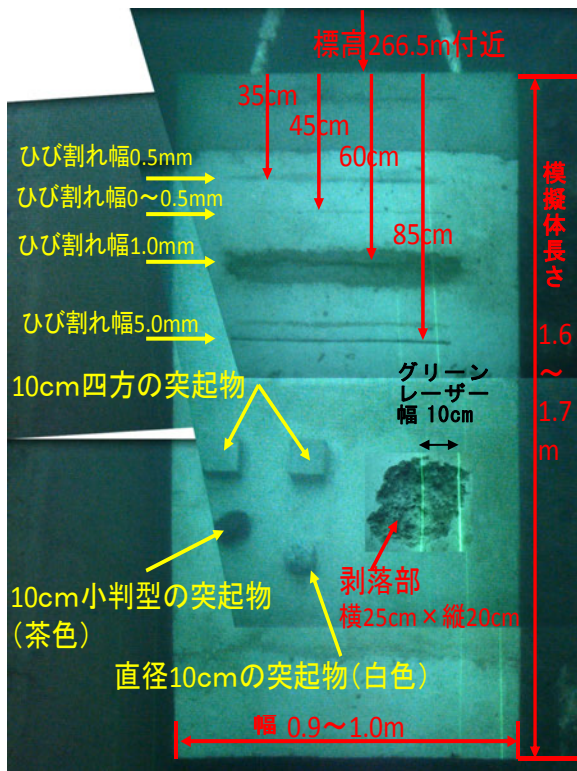


写真-4 宮ヶ瀬ダム模擬体計測結果

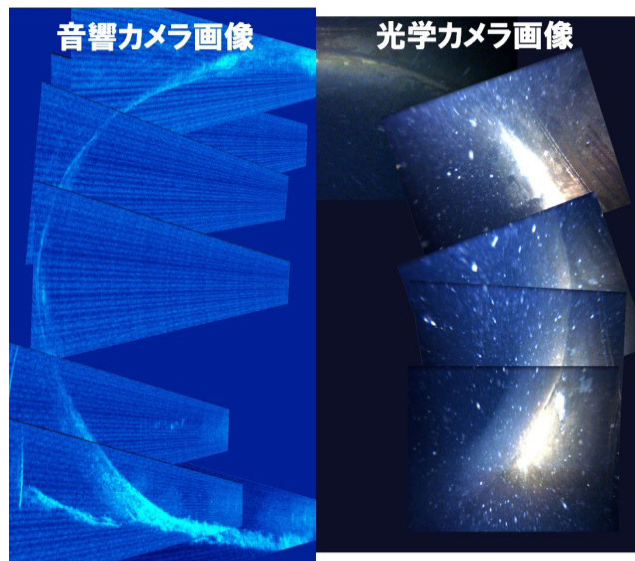


写真-7 高位常用洪水吐の管口部（ベルマウス）光学カメラ画像と音響カメラ画像の比較

4. 天ヶ瀬ダムの現場実証

4.1 天ヶ瀬ダムの現場実証の概要

天ヶ瀬ダムの現場実証試験は2015年11月に実施した。天ヶ瀬ダムは京都府にある1964年に竣工した淀川本川に建設されたダムであり、堤頂長約254m、堤高73mで型式はアーチ式コンクリートダムである。

天ヶ瀬ダムの現場実証試験の調査項目は、①ダム堤体コンクリートの浮き・剥離などの状況確認、②ひび割れ、突起物をあらかじめ設けた模擬版の変状確認、③コンジット予備ゲート戸当たりの変状確認、④コンジット予備ゲートのボルト緩み・板厚測定・表面の清掃、⑤ダム最深部の堆砂状況確認である。これらの5項目のうち必須とされたのは①～③の項目であり、④、⑤については任意であった。本実証試験では、すべての項目を実施した。現場実証状況を写真-9～11に示す。

4.2 天ヶ瀬ダムの調査結果

天ヶ瀬ダムでは現場実証試験の調査項目の他に、濁度が大きい環境下でも調査で出来ることが求められた。そこで著者らは、ロボットの計測用カメラ前面に濁水対応装置を追加装備した。濁水対応装置とは、内部に洗浄な水を注水し、その装置を計測用カメラの前面に取り付け、ダム壁面に押し付けながら撮影することで、濁水中でも鮮明な画像を取得できる装置である。

調査時のダム湖水の濁度は1程度であったが、堤体面には堆砂や貝等が付着しており、コンクリート横目地の視認は所々で確認できない状況であった。水平目地については、水平方向に約30mの距離を4箇所走らせて調査したが、画像取得できる範囲内で目地の開きや浮き・剥離などは確認できず、調査したひび割れなどを設けた模擬版が詳細な位置不明の



写真-8 宮ヶ瀬ダム(水深約127m)



写真-9 天ヶ瀬ダム現場実証状況(投入)



写真-10 天ヶ瀬ダム現場実証状況(調査)

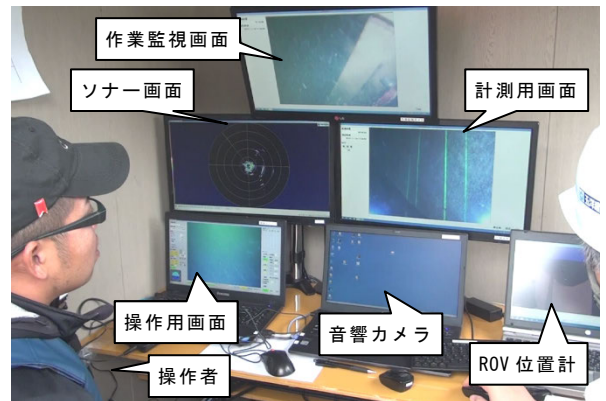


写真-11 天ヶ瀬ダム現場実証状況(操作室)

箇所は健全であると判断できた。次に、あらかじめ状態で放置されていたので、概査により模擬版を探索して水深 12m 付近に発見した後、計測用カメラで詳細な画像を取得した。画像内に写り込んだ平行グリーンレーザの間隔を基準に模擬版の外形、ひび割れ、突起物の寸法を算出し、概ね実寸法と合致することを確認した（写真-12 参照）。コンジット予備ゲート戸当たりでは、操作用カメラにより戸当たり全体を調査した。一部のゲート鋼材の錆などの変状について確認できた（写真-13 参照）。ダム堤体面は薄く堆積物や貝で被覆されている箇所が多く、清掃用ブラシで清掃を行うことで、堆積物や貝を除去した清浄な壁面とすることができた（写真-14 参照）。

また、予備ゲートの鋼材清掃では、写真-15 に示すように塗装面を損傷することなく清掃でき、鋼材の肉厚も 14.7mm と測定できた（写真-16 参照）。ボルトの緩み確認については、室内実験で清掃用ブラシを回転させながら当てることによって緩みの有無を確認できており、現場実証でも同様に行った結果、緩みは確認されなかった（写真-16 参照）。ダム最深部の堆砂状況確認は、水深約 28m に細かな堆砂や沈木が堆積していることを確認した（写真-17 参照）。

さらに、清掃用ブラシによる清掃時に、ダム堤体上の堆積物が舞い上がって視認しづらくなることを利用して、濁水対応装置の効果を検証した。

写真-18 に示すように、濁水対応装置を装備した計測カメラでは、鮮明な堤体面を観察できたが、濁水対応装置を装備しない作業監視用カメラでは、浮遊物などにより視認できない状況となりやすく、濁水対応装置の有効性を確認できた。また、実施試験とは別に実施した濁水対応装置の室内実験結果では、被写体と装置が接触していれば、濁度 500 であっても鮮明な画像

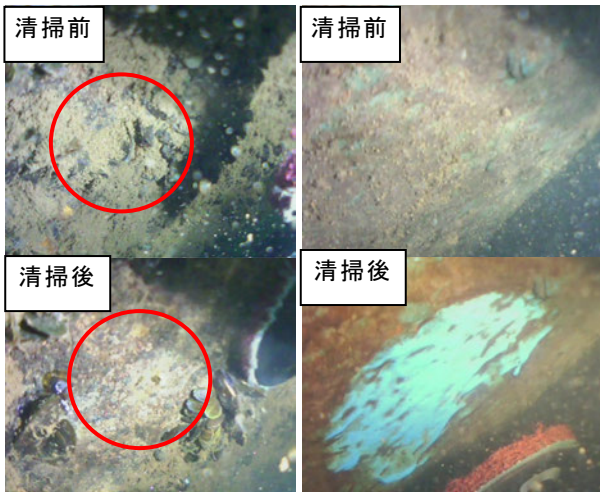


写真-14 堤体面清掃状況 写真-15 鋼材面清掃状況

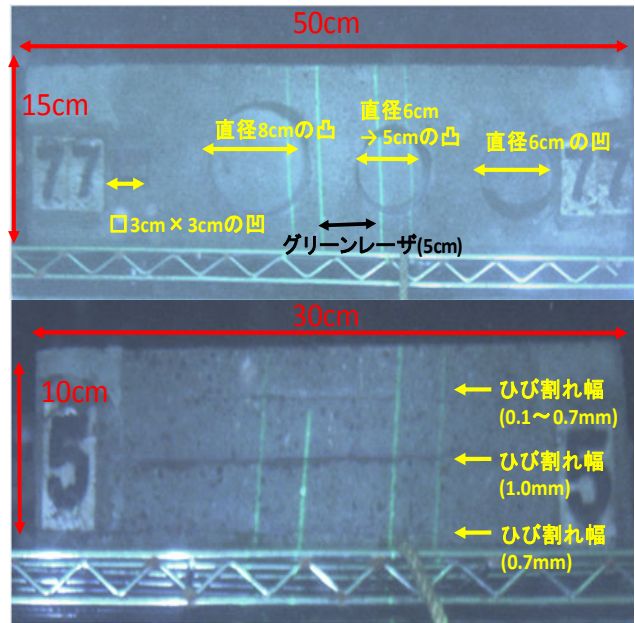
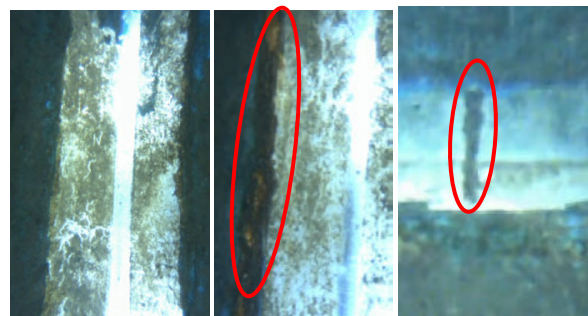
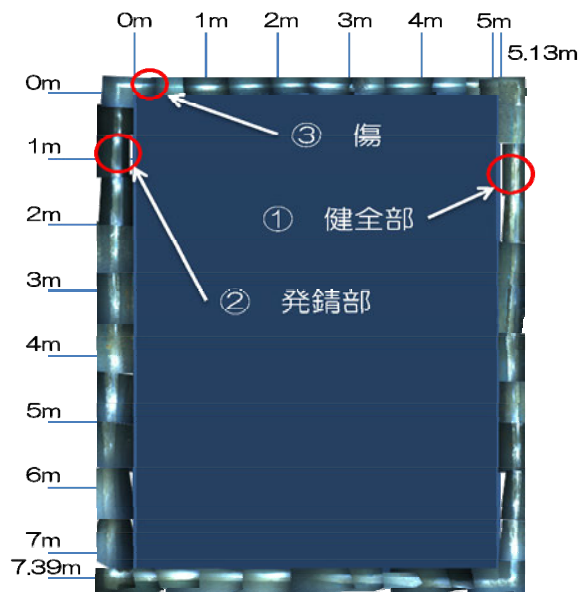


写真-12 模擬版計測結果



①健全部 ②発錆部 ③傷部

写真-13 ゲート鋼材の変状



写真-16 予備ゲート精査

を取得できることを確認している。(写真-19 参照)

ロボットの位置精度の確認のため、一度位置記録と画像の取得をした後、一旦離れ同じ位置に戻った時の値の違いを確認した。その結果、位置の相違は約 90cm であった。この相違については、音響測位装置が構造物の反射の影響を受けることや GNSS と音響測位装置の装置誤差でないかと思われる。

5. まとめ

国土交通省が公募した「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」では、水中調査ロボットのシステムの機能・性能、運用性、点検品質、工期、経済性など総合的な側面から検証された。本ロボットは、2014 年度の宮ヶ瀬ダムと 2015 年度の天ヶ瀬ダムでの実証試験に参加し、試行的導入推薦レベルの技術であると評価された。今後は、実証試験で得られた成果をもとに、調査範囲の拡大を狙った運動性能の向上、コスト削減を狙ったシステム構成機器の簡素化と運用体制の見直し、水中構造物の診断に必要な機能拡張などに取り組み、本技術の適用範囲を広げていく予定である。

6. おわりに

現場実証試験において、格別のご配慮をいただいた国土交通省、(一財)先端建設技術研究センター、(一社)日本建設機械施工協会、実証現場をご提供いただいた宮ヶ瀬ダムを管轄する相模川水系広域ダム管理事務所、天ヶ瀬ダムを管轄する近畿地方整備局淀川ダム統合管理事務所ほか、多大なご協力をいただいた関係各位に紙面を借りて謝意を表す。

【参考文献】

1)小笠原, 杉本, 森屋:遠隔操作無人探査機(ROV)を利用した大水深水中調査ロボットの現場適用, 土木学会第 70 回年次学術講演会(平成 27 年 9 月) VI-142, pp.283-284

2)水野, 小笠原, 杉本, 森屋, 武井:大水深水中調査ロボットによるダムの点検・調査への現場適用, 土木学会第 71 回年次学術講演会(平成 28 年 9 月) VI-740, pp.1479-1480



写真-17 水深 28m 付近の堆積状況

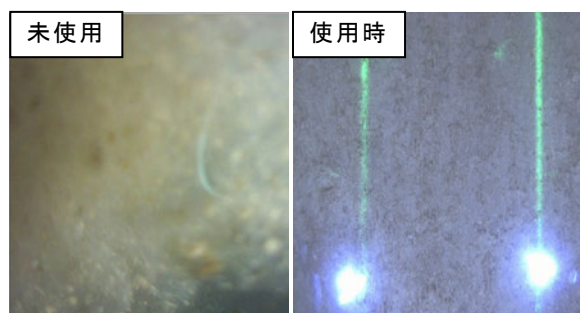


写真-18 濁水対応装置の現場実証

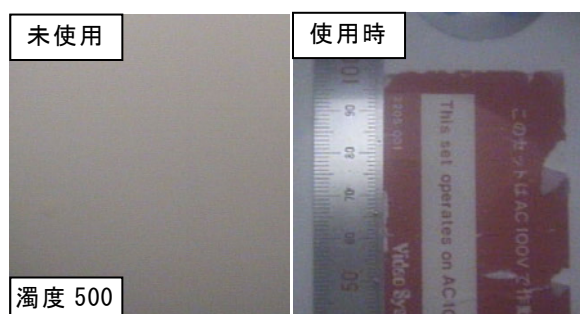


写真-19 濁水対応装置の実験