解 説

次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進 —水中維持管理部会における現場検証の紹介—

Introduction to On-site Demonstrations of Next-generation Robotic Technologies for Social Infrastructures, Organized by Advisory Committee on Underwater Structures' Maintenance

角 哲 也* *京都大学防災研究所

Tetsuya Sumi* *Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

1. はじめに

国土交通省が設置した「次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会」における水中維持管理部会（部会長：角哲也 京都大学防災研究所教授）では、平成26年度および平成27年度の2ヵ年において、ダムや河川の維持管理に役立つロボット技術を公募し、国土交通省が直轄管理するダムや河川において現場検証を行った。現場検証は、ロボットの本格導入に向けて“現場で使えるロボット”を見極める目的で行われ、基本要件（ユーザニーズ）に対する機能と性能を現場環境の下で確認するものである。現場検証の結果、実用性が期待できる技術については、試行的導入の対象技術として推薦するものである。

本稿では、これまでの2年間で実施した水中維持管理分野でのロボット現場検証・評価の結果の概要を紹介するとともに、今年度予定する試行的導入の方向性について述べる。

2. 検証の目的ならびに公募の概要

現場検証の対象は、短期（おおむね3年以内）の実用化が見込まれる技術とした。現場検証では、次年度以降の試行的導入の対象技術を推薦することを目的とし、公募要領に示した「基本要件」、「公募技術に期待する項目」の達成度、現場で把握された課題・効果、今後の発展性について評価を実施するものである。水中維持管理分野においては、以下の3つの公募要件に示すとおり、ダムや河川の水中部において人の目視調査を代替できる技術を公募した。公募は、平成26年度は4月9日～5月28日の間、平成27年度は5月28日～6月18日の間実施した。

〔公募要件1〕ダムにおいて、ゲート設備の「腐食、損傷、変形」、堤体等のコンクリート構造物の「損傷等」および洪水吐き水叩き部の「洗掘等」について潜水士による近接目視の代替（精査）または支援（概査）ができる技術・システム。

〔公募要件2〕ダムの貯水池において、堆砂等の「堆積物の状況」について全体像が効率的に把握できる技術・システム。
〔公募要件3〕河床の「洗掘等」について、災害査定等に用いることができる程度の精度で、幅・長さ・奥行等といった洗掘の全体像が効率的に把握できる技術・システム。また、河川護岸において、「コンクリート部の損傷、うき・剥離・剥落、豆板や、コールドジョイント部のうき・剥離・剥落、鋼矢板部の劣化・損傷状況等」について、潜水士による近接目視の代替（精査）または支援（概査）ができる技術・システム。

3. 現場検証が対象とする環境の紹介と特徴

言うまでもなくロボット技術は、これまで人がアプローチして調査するには危険な箇所や、人手では時間やコストが膨大となってしまう箇所などの調査・点検を可能な限りに代わって実施し、ロボットの利用メリットが期待できるかが重要である。このような観点から、水中維持管理分野における検証のポイントは以下のようにまとめられる。

(1) ダムでは堤体の損傷調査[1]や放流設備の健全性の確認[2]など、河川では河床洗掘や護岸の損傷調査[3]など、これまで必要に応じ潜水士により実施しているものの、高水深、高流速かつ広範囲など安全面およびコスト面の制約から一般的に行われていない箇所が多く存在する。

(2) 調査時期は必ずしも平常時とは限らず、ダムでは洪水後に貯水池内が高濁度になった状態、河川では洪水後の高流速が残った状態など、災害後の即時的な調査でも使用可能である必要がある。

(3) ダムや河川内においては、流木や草・ゴミなどの塵芥が浮遊している可能性があり、これら障害物対策が必要である。

(4) ダムの堤体の損傷調査や放流設備の健全性の確認などでは、構造物表面にシルトやコケなどが付着している可能性があり、検査面をケレン（汚れを除去）するためのマニピュレータ機能などが求められる場合がある。

(5) ダム・河川とも、上記のような制約から、水中点検はこれまで限られた場面でしか実施されてこなかったために、点検の標準仕様や要求精度などを一から組み立てる必要が

原稿受付 2016年7月1日

キーワード: Underwater Inspection, Dam, River, ROV

*〒611-0011 宇治市五ヶ庄

*Uji-shi, Kyoto

図1 天ヶ瀬ダム（クレストゲートと戸当たり）

図2 弥栄ダム（予備ゲートと選択取水設備）

ある。

点検を行うロボットには、点検対象までの移動能力、損傷等の変状の検出能力、変状を正確に記録する能力が求められる。水中維持管理部会では、ダム・河川における上記のようなポイントを考慮して、点検時に必要な移動能力、検出能力、記録精度を検証するために必要な流速・水深（水压）、水の濁度、点検対象の規模・形式・種類を備えた検証現場を以下のとおり選定した。

3.1 ダム

ダムの水中心点検では、ダム堤体上流面および放流設備の点検、加えてダム貯水池内の堆積物の状況についての調査が対象となる。潜水士による調査では、水深10[m]を超える水深では、高気圧作業安全衛生規則により潜水時間の管理が必要となり、減圧施設が必要となり費用もかさむことから、ロボット使用のメリットが期待される。

①宮ヶ瀬ダム（平成26年度検証現場：神奈川県相模原市緑区青山）

重力式コンクリートダム，堤高156[m]，堤体積206万[m³]，2000年竣工

②天ヶ瀬ダム（平成27年度検証現場：京都市宇治市槇島町六石～槇尾山）

アーチ式コンクリートダム，堤高73[m]，堤体積12.2万[m³]，1964年竣工（図1）

③弥栄ダム（平成27年度検証現場：広島県大竹市小方町小方～山口県岩国市小瀬）

重力式コンクリートダム，堤高120[m]，堤体積155万[m³]，1991年竣工（図2）

3.2 河川

河川の水中心点検では、調査対象となる河床や護岸の場所によって水深・流速・河床状態（河床材料など）・護岸形状や材質も大きく異なる。特に水衝部は、流速が大きく洗掘や深掘れが発生しやすいため、潜水が困難であり、ロボット使用のメリットが期待される。

①多摩川緊急船着場（平成26年度検証現場：東京都大田区多摩川2丁目地先）

②信濃川妙見堰上流側（平成27年度検証現場：新潟県長岡

図3 妙見堰（上流から望む，手前は魚道）

市妙見地先（右岸））（図3）

4. 平成26年の現場検証（実施状況，応募状況，評価結果）

4.1 応募状況

平成26年度は、15者から16技術22検証項目の応募があった。水中維持管理部会では、実用化段階にあると期待され、技術システムの精度、安全性、効率、信頼性等に基づいて、実際の導入に向けた総合的な現場検証・評価を行う「実用検証技術」6技術が選定された。そのほかに、現時点では開発段階にあり、一部の要素技術を用いたデータ収集や各要素の稼働状況などの確認を目的する「要素検証技術」8技術を現場検証の対象とした。

4.2 実施状況

(1) 宮ヶ瀬ダム

宮ヶ瀬ダムにおいてゲート設備の「腐食、損傷、変形」、堤体等のコンクリート構造物の「損傷等」について潜水士による近接目視の代替または支援ができる技術（公募要件1）に該当する実用化技術4件の検証を実施した。また、ダムの貯水池において堆砂等の「堆積物の状況」について全体像が効率的に把握できる技術（公募要件2）に該当する実用化技術1件の検証を実施した。

【ゲート設備】

①水深40[m]程度の施設の状況の把握

高位常用洪水吐まで潜行し、施設の状況の画像等を取得する。ただし、水位状況により高位常用洪水吐が水深40[m]を超える場合は、水深40[m]付近の施設を点検対象とすることも良い。この検証により、潜航能力と操作性、取得データの品質および視認要求に対する達成度等を確認する。

② 80[m]程度の施設の状況の把握

低位常用洪水吐施設まで潜行し、施設の状況の画像等を取得する。この検証により、潜航能力と操作性、取得データの品質および視認要求に対する達成度等を確認する。

【堤体等のコンクリート構造物】

① 堤体上流部のコンクリートの浮き剥離等の状況把握（打ち継ぎ目等）

打ち継ぎ部まで潜行移動し、コンクリートの状況の画像等を取得する。この検証により、潜航能力と操作性、取得データの品質等を確認する。

② 模擬体のクラック確認

あらかじめクラックを入れたコンクリート版を設置して、クラックの幅およびクラックの長さを計測し、そのクラック図の品質と精度を確認する。

【貯水池の堆積物の状況】

① 深浅測量による断面図の作成

定められた測線で深浅測量を行い断面図を作成する。

この検証により操作性と取得データの品質等を確認する。

（2）多摩川

多摩川においては、河床の「洗掘等」について全体像が効率的に把握できる技術、河川護岸の「コンクリート部の損傷、うき・剥離・剥落、豆板、コールドジョイント部のうき・剥離・剥落等」について潜水士による近接目視の代替または支援ができる技術（公募要件[3]）に該当する実用化技術1件の検証を実施した。

【河川の護岸および河床の状況】

① 護岸施設の状況の把握

護岸施設の状況を潜行して画像等を取得する。この検証により、操作性と取得データの品質および視認要求に対する達成度等を確認する。

② 深浅測量による断面図の作成

指定した測線で深浅測量を行い断面図を作成する。この検証により、操作性と取得データの品質を確認する。

4.3 評価結果

ダムゲート設備やコンクリート構造物等の近接目視を代替する技術として、光学カメラを用いた技術は、ダム湖水が比較的低濁度ではあったものの、ほぼ画像を取得することができ、一定の評価を行うことができた。また、一部技術においては、「期待する項目（より深く潜れる・ケレンができる・打音検査ができる）」まで満足することが確認された。実用検証技術4件のすべてについて、実用化に向け

て解決すべき課題が確認された。

堆積物の状況の全体像を把握する技術として、音響測深機を用いた実用検証技術1件の検証を実施した。技術的に確立していることが確認できたが、測量速度が遅いため、その適用条件には課題が残った。河床の地形および護岸の損傷等を把握する技術として、音響ソナーを使用した実用検証技術1件については、取得画像の処理技術の改良等、実用化に向けて解決すべき課題が確認された。

一方で「概査」（損傷が疑われる箇所を抽出するための、広域を対象とする一次スクリーニング）および「精査」（一次スクリーニングで抽出された箇所の詳細調査）といった、段階的な点検計画を考慮した場合にはそれぞれの段階で水中ロボットに求められる仕様や精度を明らかにすることで、精度は劣るものの、広域かつ機動的な概査には十分活用し得る技術など、それぞれの段階の現場ニーズにマッチしたシーズの提示により水中ロボットの利用方法を提案する方向性が示された。

5. 平成27年の現場検証（実施状況、応募状況、評価結果）

5.1 応募状況

平成27年度は、11者より13技術13検証項目の応募があった。水中維持管理部会で現場検証および評価対象とする実用化技術12技術が選定された。そのほかに要素検証技術1技術を現場検証の対象とした。平成26年度の検証結果を踏まえ、より広い汎用性を核にする目的から、ダムについては形式の異なるアーチ式ダムと重力式ダムにおいて、ある程度の濁度のある条件下で検証を実施した。また、河川については、多様な水流があり、水中構造物の状況を確認したいとのニーズがある妙見堰において実施した。

5.2 実施状況

（1）天ヶ瀬ダム

天ヶ瀬ダムにおいては、ゲート設備の「腐食、損傷、変形」、堤体等のコンクリート構造物の「損傷等」について潜水士による近接目視の代替または支援ができる技術（公募要件1）に該当する実用検証技術7件、要素検証技術1件の検証を実施した。平成26年度に宮ヶ瀬ダムで現場検証を行った実用検証技術4件のすべてが再度参加した。

（2）弥栄ダム

弥栄ダムにおいてもゲート設備の「腐食、損傷、変形」、堤体等のコンクリート構造物の「損傷等」について潜水士による近接目視の代替または支援ができる技術（公募要件1）に該当する実用化技術5件の検証を実施した。

【ゲート設備】

① 水深25[m]程度の施設の状況の把握

アーチ式ダムである天ヶ瀬ダムでは、主放流管の底部まで傾斜した堤体に沿って潜行し、放流管および予備ゲ-

図4 設置した模擬板

ト設備の状況が確認できる画像等を取得し位置を記録する。予備ゲート（ローラーゲート）は、ダム堤体に沿って傾斜状態で設置されている。戸当たり、吊り金具、主ローラー、ボルトなどの状態（腐食や変形の有無等）を確認する。

現場検証に先立って潜水士によるゲート設備の目視点検を実施し、変状箇所については写真撮影および計測、位置の記録を実施している。ロボットの検証結果との比較により精度検証等を行った。

②水深 45 [m] 程度の施設の状況の把握

重力式ダムである弥栄ダムでは、主放流管の底部まで垂直に潜行し、天ヶ瀬ダムと同様に放流管および垂直に開閉するよう設置された予備ゲート設備の状況が確認できる画像を取得し位置を記録する。また、上流面に設けられている選択取水設備のスクリーンバーの全面の状態について、変形や腐食の状況（板厚計測等）、流木の捕捉状況が確認できる画像等を取得し位置を記録する。弥栄ダムについても、天ヶ瀬ダム同様の方法で精度検証を実施した。

【堤体等のコンクリート構造物】

①堤体上流部のコンクリートの浮き剥離等の状況把握

天ヶ瀬ダムにおいては、ジョイント 5～8 の範囲で水面から主放流管直下の堆砂面までの水深約 30 [m] の範囲について、弥栄ダムにおいては、ジョイント 19～21 の範囲で水面からフィレットまでの水深約 50 [m] の範囲について、堤体上流面の横継目および水平継目の状態（開き具合等）、堤体コンクリート表面の損傷の状況（損傷の有無等）が確認できる画像等を取得し位置を記録した。なお、堤体表面の一部には貝類や藻類が付着している箇所もあった。湖水は浮遊物質による濁りがある状況であった。

現場検証に先立って、潜水士によるゲート設備の目視点検を実施し、変状箇所については写真撮影および計測、位置の記録を実施している。ロボットの検証結果との比較により精度検証等を行った。

②模擬体のクラック確認

あらかじめ様々なパターンの凹凸やクラックを模擬したコンクリートブロック（図4）を予備ゲートの主桁上に

設置し、ロボットによりクラックの幅の変化や長さ、凹凸の大きさを計測し、計測精度等を確認した。

(3) 信濃川（妙見堰上流）

信濃川中流に位置する妙見堰上流側において、堰の開閉により変化する流速条件下（0.5～1.5 [m/s] 程度）で技術検証を実施した。河床の「洗掘等」について全体像が効率的に把握できる技術、河川護岸の「コンクリート部の損傷、うき・剥離・剥落、豆板、コールドジョイント部のうき・剥離・剥落等」について潜水士による近接目視の代替または支援ができる技術（公募要件 3）に該当する実用化技術 4 件の検証を実施した。

【河川の護岸および河床の状況】

①護岸施設の状況の把握

無人ボートや陸上自走式運搬機械（クローラ運搬車）に搭載されたセンサを用い「護岸（コンクリート擁壁、鋼矢板護岸）」および「精度検証用に設置した模擬試験体」の状況を光学映像、三次元点群データ、画像等により取得した。あらかじめ事務局で実施した調査成果や模擬試験体と比較し取得したデータの精度・品質を確認するとともに、設営から撤去までの一連の作業状況を記録し費用対効果についても検証した。

②無人ボートによる河床地形図の作成

音響測深器や電磁波レーダを搭載した無人ボートを航行させ、妙見堰上流側の指定した範囲で河床の状況を計測した。護床ブロックの設置状況や河床の三次元地形データを取得した。あらかじめ事務局で実施した音響測深器によるスワス測量の成果と比較し取得したデータの精度・品質を確認するとともに、設営から撤去までの一連の作業状況を記録し費用対効果についても検証した。

6. 2 年間の総括と試行的導入に向けての課題と対応

6.1 現場検証の評価結果と可能性

「ダム用」については、潜水士の作業時間が制限される水深条件下における堤体やゲート設備を対象とした点検作業への適用を想定し、光学カメラや音響センサ等を搭載した ROV について検証を実施した。運動性能や姿勢制御性能、濁水環境下での高精細な画像取得性能などについて、優れ

た特長を有するロボットが複数確認できた。

なかでも光学カメラで取得した画像の鮮明化処理により、構造物の状況を鮮明な映像で確認できた技術は、堤体表面の損傷把握や継目の開き具合の計測に適用が期待できる。また、姿勢制御技術を用いて堤体に正対し、静止状態で観察（動画撮影）することにより漏水箇所を特定する等の作業を支援できる可能性があると考えられる。

また、現場検証で確認された少なくとも 80 [m] 以上の耐圧性能に加え、優れた運動性能を有する ROV に光学カメラ・音響センサを組み合わせ、清掃用ブラシやグリーンレーザにより正確なサイズ計測や変状の把握を可能とした技術や、ROV にジャイロ効果を利用した姿勢保持装置により安定した映像取得を可能とした技術の有効性が確認され、これらの技術は現場適用性が高いことが想定され、試行的導入に際し有望と考えられる。

2 年間の現場検証を経て、応募技術の技術水準が向上し、水面および水中構造物へのアクセス性能が高まり、点検対象物に自在に近づくことが可能な技術が出てきている。平成 27 年度の検証は、濁水中での映像取得性能、コスト優位性、変状の位置把握精度、現場適応性を基本要件とし、その評価結果に基づき試行的導入への推薦を行った。

なお、ROV 搭載のセンサについては、既存の製品の利用がほとんどであり、アクセス方法や取り付け位置、使い方の組み合わせで、十分に実用レベルにあると考えられる。これら ROV を用いて得られた点検成果に関しては、点検の一次スクリーニングとしての広範囲の調査（概査）、二次スクリーニングとしての特定箇所の調査（精査）として 2 段階の点検をする場合において、構造物の概況および詳細な損傷状況も、一部の技術では十分に把握できるレベルになってきている。

「河川用」については、ボート型、陸上自走型ともに有望と考えられる。ボート型技術は、自律航行可能な無人ボートに高精度 GNSS、光学カメラおよびスワス測深機（マルチビームソナー）を取り付け、精度の高い水中の三次元地形データを広範囲に取得できる。ただし、現段階では実際の現場での活用は流速の制約を受けることから、今後は現場条件に則した運動性能を高めることで、河床や構造物周辺の洗掘状況等の調査への適用が期待できる。

陸上自走型技術は、自走式運搬機械（クローラ運搬車）に搭載した水中 3D スキャナと地上部用 3D レーザスキャナを組み合わせ、濁りの影響を受けることなく水中構造物の形状を取得できた。ただし、アーム部分の構造は実際の現場での活用に制約を受けることから、今後は現場に則したアーム部の安定性、測定範囲の改善を図ることで水衝部など局所的な洗掘の調査への適用が期待できる。平成 27 年度の検証は、基本要件を満足することに加え、面的な状態把握の可否、変状の位置把握精度、流速への対応力、コ

スト優位性に着目して有用度を評価した。

「ダム用」、「河川用」のこれらの実用化レベルに達している技術は、今後、実際の業務の一環での使用を通じて、その費用対効果も含め、現場適用性を検証すべく、試行的導入を進めることが可能であると考えられる。

6.2 試行的導入に向けての課題と対応等

平成 28 年度の試行的導入に向けて、まずは、ある特定の河川やダムの現場で実際に行っている水中点検作業において、試行的導入に推薦された有用なロボットが適用しうる場面を明確にし、試行的導入の具体の形を明確にする必要がある。ダムでは建設後 30 年を目途に実施されている総合点検において必要に応じて潜水調査が実施され、また河川では定期横断測量や必要に応じて出水後の洗掘調査などが実施されているが、いずれも先述のような安全面、コスト面などの制約により調査事例は限定的である。

試行的導入では、有望な技術の特徴を活かし、現場ニーズに合う形で具体的業務での利用法を明らかにしていく必要がある。その際、今の技術レベルで行っていることのみをロボットに置き換えるといったことにとどまらず、新しいロボット技術により、品質や効率が高められるような点検方法を見いだすことが、ロボット適用効果を高めるためには重要と考えられる。特に、既存技術では困難な、ダム用では高水深、河川用では高流速や流速変動のある環境下での使用実績を積むことが、ロボットによる点検技術導入の価値を高めることに大きく貢献すると期待される。一例をあげれば、ダムにおける漏水箇所を特定するために堤体上流面から染料を注入する作業を行っている事例が見られるが、この一連の作業をロボット化することができれば、高経年劣化後のみならず、初期湛水時の対応にも有力な検査方法となりうる可能性がある。

試行的導入に際しては、その後の本格導入を見越して、現場適用性にかかわる評価指標および方法を定めること、また既存の点検方法および根拠としている点検のルールについて、ロボットの適用により見直すべき箇所を検討する必要がある。さらに、今後ロボットが収集する点検データを維持管理に使用する情報システムも重要になると考える。

7. お わ り に

水中維持管理分野へのロボットの試行的導入は、平成 28 年度に実施を予定している。現場検証とは異なり、実際の点検業務での使用を想定した検証を行う予定であるが、点検成果の納品はもちろんのこと安全面やコスト面からの検証が実施される。水中部の点検は、橋梁点検やトンネル点検分野と違い従前一般的に行われていないため、管理者にとって有益な成果情報の在り方については、継続的な取り組みが必要と思われる。例えば、試行的導入に推薦されたのはわずか 3 技術であるが、ダムの放流設備の点検等に有

効なマニピュレータの実用化や、水中における位置特定技術のさらなる精度向上が期待されるし、河川であれば、航空機搭載型グリーンレーザとの組み合わせ利用によるコスト低減や、河床の洗掘調査における河床材料の判別の実現等も考えられる。

現場検証を行ったわずか2年の間においても、現場検証の実施によりユーザーニーズに対応し相当の技術改良が進んだとも言える。今後も継続的にロボット技術の現場検証を行い、優れた技術のスパイラルアップの仕組みを発展させていくことが望まれる。

参 考 文 献

- [1] 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課：ダム総合点検実施要領・同解説（平成25年10月）。

- [2] 国土交通省総合政策局建設施工企画課，河川局河川環境課流水管理室：ダム用ゲート設備等点検・整備・更新検討マニュアル（案）（平成23年4月）。
- [3] 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課：堤防等河川管理施設及び河道の点検要領（平成28年3月）。

角 哲也（Tetsuya Sumi）

1985年京都大学大学院修士課程修了，博士（工学）。建設省土木研究所主任研究員，京都大学助教授を経て，2009年教授，現在に至る。ダムや河川構造物の維持管理，流砂系総合土砂管理などの研究に従事，2008年土木学会水工学論文賞など受賞。近著「ダムの科学」（編著，ソフトバンク・クリエイティブ，2012年），日本工学アカデミー，土木学会，ダム工学会などの会員。（日本ロボット学会正会員）