

通水状態で水路トンネル内部の変状を調査する 無人調査ロボット

森 充 広・中山 宣 洋・高 岩 庸 博

本装置は、農業用水に浮かべて水路トンネルを自然流下させることによって、通水状態における水路トンネルの覆工コンクリートの変状を調査する装置である。本体は、3台の高感度 CCD カメラが搭載された透明ドーム部と、制御用 PC やバッテリーが搭載された船体部から構成されている。通水中の水路トンネル上流坑口から本装置を投入し、下流坑口において回収することにより、流下中の水路トンネル内の覆工の映像を動画として SD カードに記録する。4箇所を設置した赤外線距離計によって装置と側壁との距離をモニタリングし、その変化に応じて透明ドーム部をモーターで回転させる制御を行うことにより、高感度 CCD カメラは常に壁面を撮影しつづけることが特徴である。これにより、覆工に正対した映像を撮影することができ、覆工の展開図作成も省力化できる。

キーワード：水路トンネル，機能診断，覆工，ひび割れ

1. はじめに

農林水産省¹⁾によると、食料増産に伴って建設されたダム、水路トンネル、頭首工、用排水機場、コンクリート開水路、パイプラインといった基幹的農業水利施設（受益面積 100 ha 以上）の資産価値は、平成 27 年再建設費ベースで 33 兆円と試算されている。このうち、農業用水を送水する農業用水路の延長は末端水路までを含めると約 40 万 km であり、そのうち、農業用水路トンネルは約 2,000 km にも及んでいる。しかし、近年、これら農業水利施設も耐用年数を迎えるものが増加し、各地で施設の老朽化に伴う突発事故も増加傾向にある。トンネル構造物においては、2006 年の広島県の送水トンネルの崩落事故や、2012 年笹子トンネル崩落事故など、基幹的な社会インフラの老朽化も顕在化してきている。このため、道路トンネルや発電用水路トンネルなどでは、トンネルを定期的に点検することがルール化されている。

これまで、農業用水路トンネルは、土地改良区が日常的な管理を行ってきた。しかし、土地改良区は、農家の組合組織であり、必ずしも専門技術者による点検は実施されてきていなかった。農林水産省では、2007 年から施設の点検に基づき、適時・適切な対策を行うことによってライフサイクルコストの低減を目的とする戦略的な維持管理「ストックマネジメント」を提唱し、国で造成した農業水利施設の点検（機能診断）を

開始した。その結果、農業用水路トンネルにおいても、専門技術者が機能診断を実施する体制が構築されている。

一般に、農業用水路トンネルの点検は、水田が終了し、農業用水の通水が停止する非かんがい期に、人が中に立ち入って行う。農業水利施設の機能保全の手引き「水路トンネル」²⁾に掲載されている点検項目の一例を表-1 に示す。覆工に発生しているひび割れなど、主に目視調査に基づく調査を実施し、地山の特性などをふまえて水路トンネルの健全度を評価することになっている。しかし、農業用水路トンネルの中でも、上水道、工業用水との共同利用施設となっている水路トンネルや、畑地かんがい、地域用水などのために通年通水されている水路トンネルも存在する。こうした断水困難な水路トンネルでは、機能診断を実施することが難しい。しかも、通年通水される水路トンネルであるがゆえに、事故が発生したときのリスクも大きくなる。そこで、通水状態で水路トンネルの覆工コンクリートの状態を一次的に調査する方法として、無人調査ロボットを開発した。

2. 調査装置の概要

(1) 開発コンセプト

農業用水路トンネルの点検項目としては、主に覆工コンクリートに発生するひび割れや、通水性を阻害す

表一 1 構造機能に関する標準的な現地調査項目例

構造	力学的安全性	ひび割れ	ひび割れ最大幅	定量計測
			ひび割れ延長	定量計測
			ひび割れタイプ	タイプ判断
			ひび割れ段差	目視による有無, 定量計測
		変形・歪み	内空断面の変位	目視による有無, 簡易計測
		圧縮強度	圧縮強度 (反発硬度)	簡易計測
	耐久性	材料劣化	浮き	目視による有無, 打音調査
			剥離・剥落・スケーリング	目視による有無, 簡易計測
			ポップアウト	目視による有無
			(析出物) エフロレッセンス	目視による有無
			(析出物) ゲルの滲出	目視による有無
			錆汁	目視による有無
			変色	目視による有無
			摩耗・風化	目視による有無, 簡易計測
			漏水 (痕跡)	目視による有無
			鉄筋露出	目視による有無
	中性化	中性化深さ/中性化残り	ドリル法	
		鉄筋かぶり	設計図書の確認, 定量計測	
	安定性	漏水・涌水 背面土砂吸い出し	漏水, 濁り	目視による有無
		不同沈下	沈下, 蛇行	目視による有無, 簡易計測
上記性能を含む 構造性能	地盤変形	覆工背面の空洞化	打音調査	
		周辺地山の沈下・陥没・ひび割れ	目視による有無	
	継目の損傷	継目の開き	目視による有無, 簡易計測	
		継目の段差	目視による有無, 簡易計測	
		止水板の破断	目視による有無	
		継目からの漏水	目視による有無	
周縁コンクリートの欠損等	目視による有無, 簡易計測			

る摩耗等, 目視による評価が多い。そこで, 開発コンセプトとしては, 覆工の状態を可視画像として記録することとした。開発初期には, 水面下となる覆工の画像撮影も試みたが, 水の濁りがあったり, 堆積物があったりするために覆工状態の記録が困難であった。水路トンネルの主な変状は, 覆工コンクリートのアーチ部に発生する縦断方向のひび割れである。そのため, ひび割れの点検は水面より上の気中部を対象とし, 記録が難しい水面下については, 超音波水深計を設置し, 土砂の堆積状況等を確認することとした。

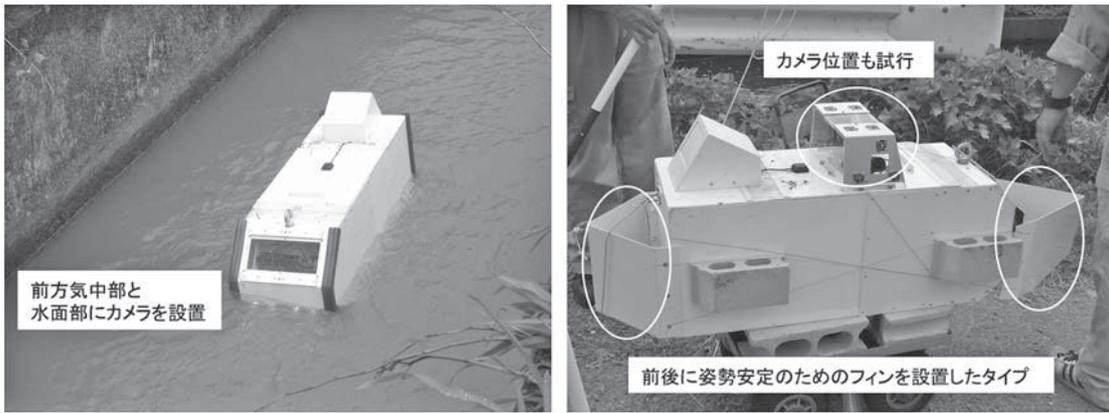
通水中の水路トンネルの調査方法として, ケーブルによって連結されているカメラ付き船体を上下流の坑口から投入し, 人が操作しながらリアルタイムで内部状況を詳細に点検する方法などもアイデアとして考えられた。しかし, 農業用水路トンネルの特徴として, ダムなどの貯水池や, 河川に設置される頭首工直下流から平野部まで農業用水を送水する水路トンネルが多く, 延長が数 km になるものも存在することから, 本

開発では, 農業用水路トンネルをまずは全区間一次診断することを最優先とし, 上流坑口から投入し, 農業用水とともに装置を流下させ, 下流坑口で回収するタイプを選定した。

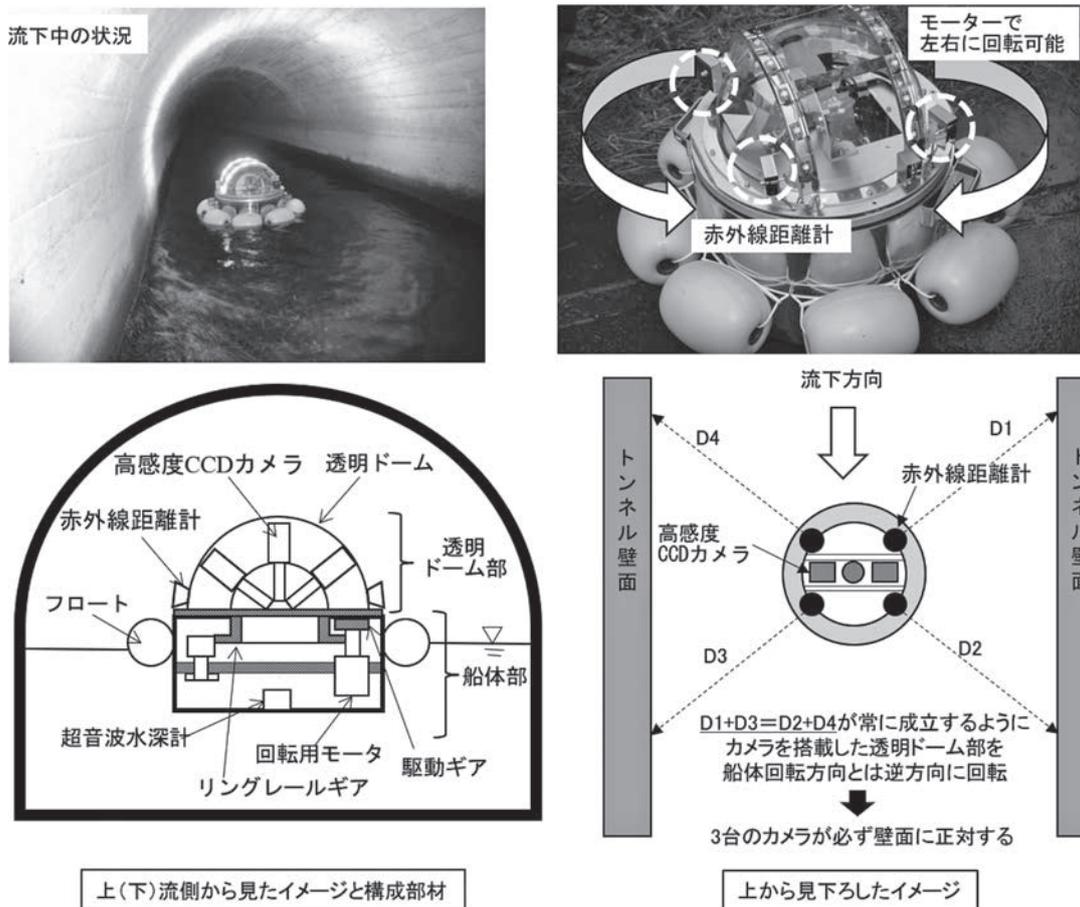
動力で装置を動かす船体では, フィンなどの構造で船体の姿勢を制御することが可能である。しかし, 流れる水に対して動力を持たない船体を投入すると, 水と船体との間の相対速度差がないため, フィンなどの構造的な工作物によって姿勢を制御できず, 船体が回転し, 搭載したカメラで覆工をうまく撮影できないことが分かった。開発当初は, 船体の回転を防止するために試行錯誤したが, どの方法も一長一短があった(図一1)。そこで, 発想を転換し, 「船体の回転を許容するが, カメラは一定方向を向き続ける」という制御を導入することにした。

(2) 調査装置の概要³⁾

調査装置の概要を図一2に示す。本体は直径



図一 1 開発当初のプロトタイプ



図一 2 装置の概要

450 mm，高さ 528 mm，重量約 35 kg であり，農用水路トンネルの覆工の変状を撮影する 3 台の高感度 CCD (Charge Coupled Device) カメラが搭載された透明ドーム部と，制御用 PC やバッテリーなどが搭載された船体部からなる。高感度 CCD カメラは，左右岸の側壁と天端を撮影しつつ，個々のカメラの撮影領域がラップするように角度調整を行うことができる。搭載した高感度 CCD カメラの仕様は表一 2 のとおりである。

船体部には，円形の本体に合わせてリング状のレールギアが設置されており，演算装置に直結している回転用モーターが作動すると，駆動ギアが透明ドーム部を回転させる構造となっている。

透明ドーム部外側には，前方および後方の側壁との距離を測定する赤外線距離計が左右 2 箇所，合計 4 箇所搭載されている。ここで，例えば図一 2 右下の「上から見下ろしたイメージ図」において，船体が反時計回りに回転し始めた場合を想定する。このとき，壁面

表一 高感度 CCD カメラの仕様

撮像素子	1/3 型インターライン転送 CCD 固体撮像素子
有効画素数	768 × 494 (記録画素数 720 × 480)
同期方式	内部同期
走査方式	2 : 1 インタレース
解像度	570TV 本以上
最低被写体照度	0.0002 lux (F1.4)
S/N	50 dB 以上
固定シャッター	1/60, 1/100, 1/250, 1/500, 1/1,000, 1/2,000, 1/5,000, 1/10,000, 1/100,000 秒
電子アイリス	1/60 ~ 1/100,000 秒
センサーサイズ	4.8 mm × 3.6 mm

までの距離 D2 および D4 は壁面との距離が短くなる。一方、距離 D1 および D3 は、壁面との距離が長くなる。そこで、本装置では、(D1 + D3) の値と、(D2 + D4) の値を 100 ms ごとに比較して、船体がどちらの向きに回転し始めているかを認識し、船体の回転とは逆方向に透明ドーム部を回転させる。回転量は、(D1 + D3) と (D2 + D4) の値の差に応じて回転用モーターへの通電時間を制御する。つまり、この差が大きくなるほど、回転用モーターの作動時間が長くなり、結果的に回転量が大きくなる。このような処理を 100 ms ごとに行うことにより、高感度 CCD カメラは、常に

トンネル内空断面に直交した配置を維持するように制御され、覆工に対して正対した状態で動画を記録することができる。

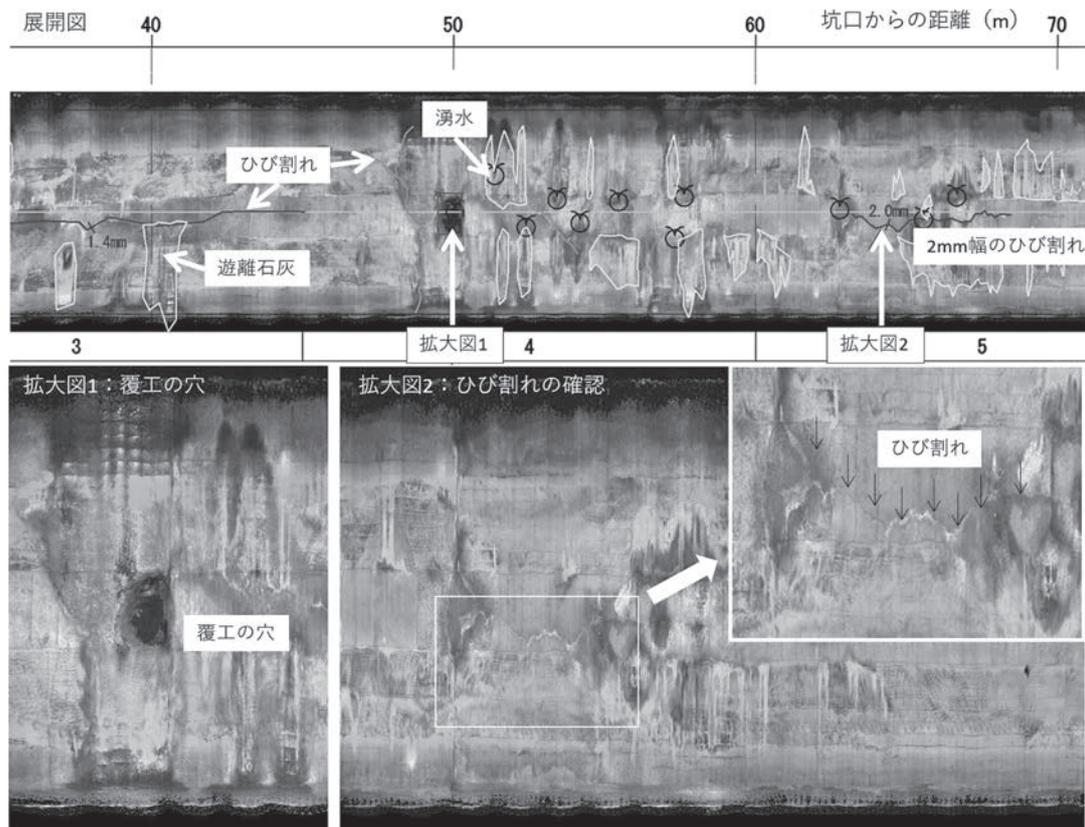
3. 現地調査の事例

(1) 調査地区の概要

農業用水と工業用水が共有されている合計 8 箇所の水路トンネルを対象として、本装置を適用した。水路トンネルの形状は、2R および 3R 標準馬蹄形 (R = 900 ~ 950 mm) であり、その延長は最短 163.88 m、最長 674.56 m、8 箇所の水路トンネルの総延長は 3,586 m であった。なお、詳細については、文献⁴⁾を参考にさせていただきたい。

(2) 調査結果

本装置によって得られた画像から作成した展開図の一例を図一 3 に示す。過去の断水時の目視点検調査により発見されていた大きさ 760 mm × 630 mm × 深さ 580 mm の覆工の穴の存在は、本装置による調査でも十分確認できた (拡大図 1)。ただし、深さの情報は画像だけでは分からなかった。拡大図 2 は、目視点検により幅 2 mm と評価されたひび割れ部分を拡大したものである。拡大図 2 では、幅 2 mm のひび割れの存



図一 3 現地調査において確認された変状展開図とその拡大図

在が十分確認できることが示された。なお、検出できるひび割れ幅は、対象とする水路トンネルの規模と、搭載した高感度 CCD カメラの性能、照明の強さ、装置の移動速度（ほぼ流速に等しい）などによって決まる。試算ではあるが、本装置では、壁面までの距離が 850 mm の場合、水路断面方向の 1 画素あたりの撮影範囲は 1.69 mm である³⁾。また、水路流下方向に関しては、流速による移動速度と高感度 CCD カメラのシャッタースピードの関係により被写体ブレの問題が発生する。これに関しては、壁面までの距離が 1,000 mm の場合、移動速度 1.38 m/s 以上になると被写体ブレによりひび割れの検出精度が落ちる可能性がある。このため、この確認試験以降、LED 照明は約 3 倍に増やして計測を行っている。

(3) 本装置を利用した場合の効果検証

①ひび割れ検出能力

調査に先立ち、あらかじめひび割れをイメージした幅 1 ~ 20 mm の線を描いた疑似クラックシートを上流坑口天端部に貼り付け、どの幅の線まで確認できるかを確認した結果、1 mm 幅の線まで認識することができた。背景とのコントラストが十分にあれば、水路トンネルの断面形状が 2R および 3R 標準馬蹄形 (R = 900 ~ 950 mm) の場合には、1 mm 幅のひび割れを認識することが可能であった。また、過年度に行われた断水中の目視調査によって、「1 mm 未満」との記載があったひび割れについても、遊離石灰や湧水を伴っている場合には、ひび割れと壁面とのコントラストがついて、検出することができた。

②変状検出能力

壁面とのコントラストが大きい遊離石灰や湧水箇所は明瞭に認識することができた。ただし、壁面全体が湿潤し、コントラストが付きにくい状況では、湧水地点を明確に特定することが困難な可能性もある。本装置による調査では、高感度 CCD カメラによる動画が記録されるため、動画をチェックすることによって、湧水の位置などを求めることができる。

③作業効率

水路トンネル 8 箇所を調査した時間と調査延長から、1 時間あたりの平均調査距離を算出した結果、0.98 ~ 4.84 km/h (平均 2.63 km/h) であった。時間は装置の搬入から回収までを考慮したものであり、防護柵の設置時間等の準備時間は含んでいない。作業効率は、水路トンネルの流速にもよるが、従来の目視調査と比較すると、現地における作業効率は大幅に向上し、作業時間を短縮できる。一方で、動画データの解

析作業に時間を要することになるが、本装置では、壁面に正対した動画になっているため、3 台の高感度 CCD カメラの動画から同時間のフレームを抽出し、短冊状に画像合成を行うことにより展開図を作成することができる。距離の情報は、動画に記録されている距離票や、型枠寸法などを参照して入力することにより、距離の補正も可能となる。

(4) 本装置の課題と対応方針

①ひび割れ幅の特定

現地調査において、ひび割れの検出能力をチェックすることができたが、本来であれば、画像からひび割れ幅を特定することが必要になる。現時点では、映像に記録された様々な情報（覆工施工時の板型枠の幅など）から、画素数を数える等により、おおよその幅を算定することができるものの、正確ではない。

②装置の小型化

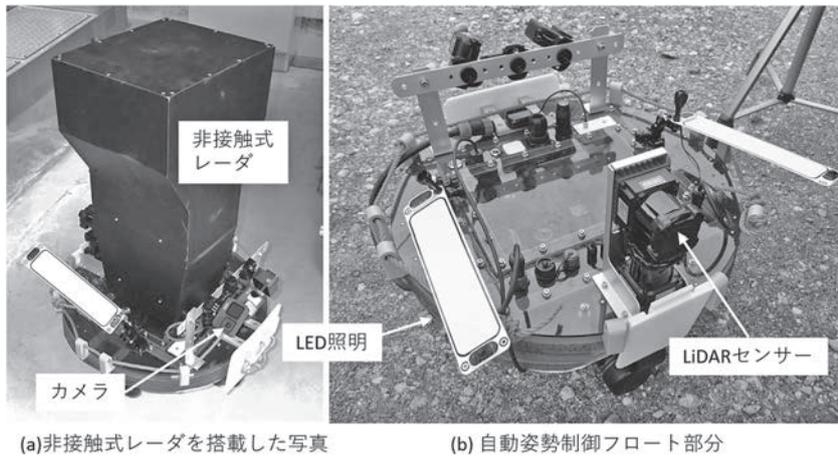
搬入口が狭く、本装置を部分的に解体して搬入し、水路トンネル内で再度組み立てる作業が必要な区間では、作業効率が著しく低下 (0.98 km/h) した。このように、古い水路トンネルでは、坑内にアクセスできる場所も限定される可能性があることから、さらなる小型化が必要である。

③壁面自動追尾機能

現地試験では、水路トンネル (645.54 m) の一部区間において、診断ロボットが約 32 m 区間で自動追尾がうまく作動せず、画像が回転してしまった。この水路トンネルの平均流速は 1.52 m/s 程度であったが、回転した区間は、水路トンネル内部で断面が変化している部分の直前区間であった。このことから、当該区間は断面変化地点で流速が速く、流れが複雑になっていた可能性がある。そのため、自動追尾の制御が追いつかなかったものと推測される。このことから、流速 1.5 m/s 以上もしくは断面変化等の影響で水路トンネル内の流況が複雑に変化している区間では、現状では自動追尾が機能しない可能性があることが示された。

4. 今後の展開

本装置は、一次診断技術として活用することを想定している。データロガー機能を有する簡易的な計測機器、例えばガス検知機などを搭載して流下させることにより、今後、人が入って点検することが可能かどうか、といった判断材料を入手することができる。また、2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震後、重要なライフラインのひとつである水道用水路トンネルの応



図一五 新型装置の概要



図一四 東北地方太平洋沖地震発生後の水道水路トンネル調査

急点検として、断水することなく、本ロボットによる調査を行った（図一四）。このように、地震などの自然災害が発生した直後に、安全性を確認しなければならないものの、人が入って点検することが危険な水路トンネルに対して、応急点検技術としての活用も期待できる。

これまで複数地区において調査を実施し、その都度、様々な課題が発見できた。現在は、これらの課題の解決に向けて、本装置をベースにして、画像だけでなく、覆工背面の空洞分布や断面形状を把握するために、地中レーダやLiDARセンサーを搭載した新型装置（図一五）の開発が進められている⁵⁾。この新型装置では、LiDARセンサーによって得られるトンネルと装置との位置情報にもとづいて、新型装置が常に水路トンネルの中心を流下するように、複数のスラスターにより位置および角度を制御する機能を有している。

農業用水路トンネルを対象として開発してきた技術であるが、上水、工業用水、発電用水等、さまざまな水路トンネルにも適用可能である。近年、様々な分野でデジタル化が進められているので、今後は得られた

データをAR技術などによって三次元的に確認できるような工夫や、画像解析技術と組み合わせたトンネル診断補助機能の開発なども考えられる。

JCMIA

《参考文献》

- 1) 農業生産基盤の整備状況について（令和2年3月），<https://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/totikai/attach/pdf/index-44.pdf>
- 2) 農業水利施設の機能保全の手引き「水路トンネル」，<https://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/sutomane/attach/pdf/kinouhozen-4.pdf>
- 3) 森 充広，森 丈久，渡嘉敷 勝，中矢 哲郎，藤原 鉄朗，齋藤 豊（2012）：通水状態での農業用水路トンネル調査・点検技術の開発，農業農村工学会論文集，278，pp.9-17
- 4) 森 充広，森 丈久，河原 昭，藤原 鉄朗，青木 伸之，財部 伸一，高岩 庸博（2015）：壁面自動追尾型水路トンネル診断ロボットによる調査事例，ARIC 情報，117，pp.12-19
- 5) 中山 宜洋，松田 貞則，工藤 晶子，久保田 直行，武居 直行，藤本 泰成，高橋 文緒，財部 伸一，笠原 翔，高岩 庸博（2023）：DX時代における農業水利施設保全へのロボットの活用，農業農村工学会誌，印刷中

【筆者紹介】

森 充広（もり みつひろ）
（国研）農業・食品産業技術総合研究機構
農村工学研究部門 施設工学研究領域
研究領域長



中山 宜洋（なかやま のぶひろ）
日本工営(株)
大阪支店 流域水管理部
課長



高岩 庸博（たかいわ つねひろ）
（株）ウォールナット
企画営業グループ
グループ長

