農研機構
NARO 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

農業用水路トンネル壁面連続画像撮影技術の現地適用性の評価

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所 公開日: 2026-07-24 キーワード: 作成者: 森, 充広, 中嶋, 勇, 川上, 昭彦, 川邉, 翔平 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/0002001733

(c) 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
National Agriculture and Food Research Organization, Japan

〔農工研技報　218
51 ～ 63，2016〕

農業用水路トンネル壁面連続画像撮影技術の現地適用性の評価

森　充広＊　浅野　勇＊　川上昭彦＊　川邉翔平＊

＊施設工学研究領域　施設機能担当

要　旨

農業用水路トンネルのひび割れなどの変状を効率的かつ高精度に記録するための点検手法として，レーザー壁面画像連続撮影装置および壁面自動追尾型画像連続撮影装置を開発した。レーザー壁面画像連続撮影装置は，短時間でも断水が可能な場合に適用可能であり，レーザー光を覆工に照射したときの反射強度から，ひび割れなどの変状を連続的に高精度デジタル画像としてスキャニングする。一方，壁面自動追尾型画像撮影装置は，通水中の水路トンネル内部を流下しながら点検が可能であり，装置に搭載した3台の高精度CCDカメラにより，内部の変状を動画として記録する。実証試験の結果，これらの技術は農業用水路トンネルの目視調査の代替として適用できることを確認した。

キーワード：農業用水路トンネル，機能診断，ひび割れ，壁面画像連続撮影装置，レーザー，壁面自動追尾

Ⅰ　緒　言

農業用水を送水している農業用水路トンネル（以下，水路トンネル）は，全国で2,000 km以上整備されており，道路トンネル約3,600 km，鉄道トンネル約2,400 km，発電用水路トンネル約4,700 km（土木学会，2015）に匹敵する膨大なストックを有している。しかし，トンネル構造物も劣化が進行し，近年では，新幹線トンネルの覆工崩落，広島県の送水トンネル崩落，中央自動車道笹子トンネルの天井板崩落など，突発的な事故が発生している。こうした背景から，水路トンネルにおいても，適時適切な診断と対策が求められている。特に，一部の水路トンネルでは，農業用水のみならず，上水，工業用水等と兼用されている重要な社会インフラとなっている場合もあり，定期的な点検・診断が不可欠である。

トンネルの構造的な安全性は，トンネル周辺の地質，地盤と密接に関係している。地山が安定していれば，トンネル覆工に作用する外力も小さい。一方，膨張性の地山など地質，地盤条件によっては，トンネル完成後も徐々に外力を受け，覆工にひび割れなどの変状が発生する恐れがある。このため，トンネル構造物の安全性を把握するためには，地盤状況を把握することが最も有効であると考えられる。しかし，トンネル周辺の地盤の状況をトンネル内から点検することは非常に困難であるため，現状では，トンネル覆工に発生する変状を定期的にモニタリングし，その進行性を把握することが重要となる。ただし，水路トンネルにおいては，道路トンネルのように電灯などの維持管理用の設備が整備されていない。また，水路トンネルへのアクセスも容易ではないため，高頻度の点検は困難である。

筆者らは，2002年から農林水産省農村振興局の「官民連携新技術研究開発事業」の補助を受け，水路トンネルの変状を正確にかつ迅速に把握すること，また，断水が困難な水路トンネルにおいて，簡易的な一次調査を実施して変状を把握することを目的としたいくつかの点検技術の研究に取り組み，既に，実証試験の報告を行っている（森ほか，2008，森ほか，2012）。本報では，これらを総括するとともに，新たに追加した実証試験の結果を報告する。Ⅱでは，水路トンネルの調査，点検に必要とされる条件について，現地調査事例や水路トンネルに見られる具体的な変状から考察する。Ⅲでは，レーザー壁面画像連続撮影装置，Ⅳでは，壁面自動追尾型画像撮影装置の原理を説明し，新たに実施した実証試験の結果を報告する。Ⅴでは，両技術の適用限界を示し，本技術の適用性を示す。

Ⅱ　水路トンネル変状点検技術の具備すべき条件

2.1　水路トンネルの調査結果事例

2.1.1　水路トンネルの調査事例

平成19年に，ストックマネジメントの概念が提唱され，「農業水利施設の機能保全の手引き」（以下，手引き）に基づいた農業水利施設の一斉点検が開始された。水路トンネルにおける調査事例も数多く報告されている。

上野らは，断水が困難な延長約14 kmの水路トンネルのうちの8.6 km区間を2日間で調査した事例を報告し

ている（上野ら，2008）。ただし，断水できる期間が短かったため，点検内容は，目地ごとにバレルNoをつけ，10バレルごとにマーキング，20バレルごとに写真撮影，100バレルごとにリバウンドハンマー試験という限定的なものになっている。

一方，断水期間に余裕がある場合には，変状の原因を究明することを目的とした様々な調査が実施されている。曽我は，水路トンネルにひび割れなどの変状が確認された区間において，ボーリング調査，覆工の圧縮強度試験，衝撃弾性波探査による空洞調査などを実施した結果を報告している（曽我，2012）。これらの調査では，変状が確認された区間全体で，覆工天端背面の空洞や緩みが確認されている。さらに，ひび割れの挙動をデータロガーで連続観測し，今後の変状の進行性を確認している。

これらの事例のように，水路トンネルの機能診断においては，まずは目視調査を実施し，変状が見られた区間においては覆工背面の空洞等の原因究明を行うための詳細調査を実施するのが基本となっている。

2.1.2　現状の変状点検とその問題点

「手引き」に基づく機能診断は，コンクリート構造物のひび割れ等の目視調査やコンクリートコアの圧縮強度確認，中性化試験などに主眼を置いたものである。目視調査は，農業水利コンクリート構造物の点検・変状調査手法として基本的かつ最も重要な調査手法である。しかし，目視調査には，①変状の確認に個人差が発生する，②機能診断に必要とされる精度での目視調査には時間がかかる，③水路トンネル等の暗所での調査では，見落としなどの可能性がある，④得られるデータが紙ベースでしか保存されず，変状の進行性を定量的に判断することが難しい，などの問題点がある。さらに，ひび割れなどの変状は記録されているものの，それらが「いつ」発生したか，あるいは「経年的に進行しているか」という情報はほとんどない（**Fig. 1**）。この一因として，水路トンネルにおいては，維持管理用の設備が整備されておらず，人による目視調査の場合，どうしても点検に時間や手間がかかること，上工水と兼用になっている水路トンネルでは，容易に断水できないことなどが背景にある。また，土地改良区の統合などにより，1改良区当たりの点検すべき農業水利施設の数が多くなるとともに，土地改良区職員の高齢化など，調査人員の不足も要因のひとつと考えられる。

2.2　水路トンネルの特異性

JRが管理する鉄道トンネルの変状として，ひび割れ・目地切れ（34％），漏水（32％），表面欠落・剥落（23％）が主たる変状として報告されている（鉄道総合技術研究所，1990）。道路トンネルでは，漏水，ひび割れ，剥離，施工目地の開きなどが主たる変状となっている（日本道路協会，1993）。

これまでに筆者らが調査した水路トンネルでは，道路トンネルや鉄道トンネルと同様，ひび割れが多く見られた（**Fig. 2a〜d**）。水路トンネルにおいては，日々の日常点検作業が不可能であり，通常，毎年の非かんがい期（すなわち年1回程度）にしか調査できない。一方で，道路，鉄道トンネルとは異なり，覆工コンクリート塊のはく離・はく落による第三者に対する安全性や，走行の

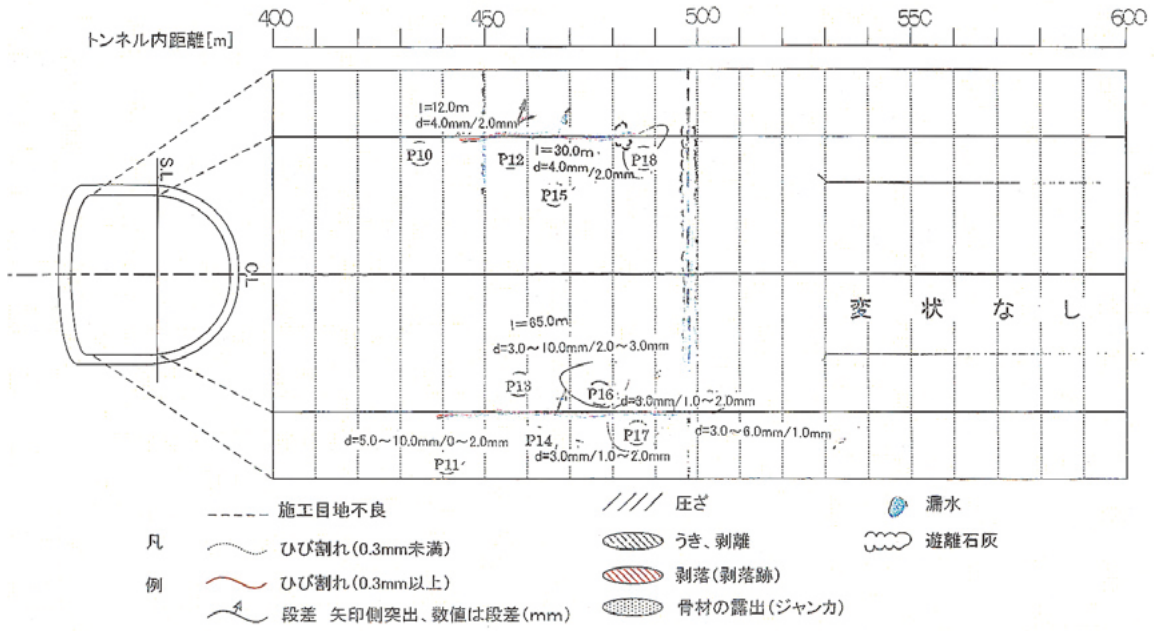

Fig. 1　トンネル目視調査結果の一例
An example of tunnel linig deformation by visual inspection

障害となる天端からの漏水などは，特別な事情がない限り考慮する必要性は小さいと思われる。

さらに，上工水と兼用されている水路トンネルでは，どうしても断水できない，あるいは断水できるとしても数時間という，調査に制約があるものが多いのが特徴である。また，水路トンネルにおいては，通水面以下の覆工からの漏水は，通水量を減少させる要因となり，水利用機能の低下を招くことになる。漏水により地盤が浸食されると，水路トンネルの構造性能にも悪影響を及ぼす。

2.3　水路トンネルの変状点検技術に要求される性能

以上の点から，水路トンネルの機能診断に際しては，①調査頻度が確保できないことから，ひび割れなどの目視情報を1回の調査時に確実にかつ正確に記録できること，②短い断水期間においても調査できる効率性を有すること，③通水状態においても点検できる柔軟性を有すること，が要求される。

そこで，本研究では，断水できる場合には，水路トンネル覆工全面に発生している様々な変状を，効率的かつ高精度に記録すること，一方，断水が困難な場合には，「断水して調査点検する必要性があるかどうか」を判断するための一次情報を得ることを目的として，水路トンネル変状点検技術を開発することとした。

以下では，開発した2種類の調査システムおよびその検証結果を示す。

Ⅲ　レーザー壁面画像連続撮影装置の開発

短時間でも断水できる場合の水路トンネルでは，1回の調査で覆工に発生している変状を正確に記録できることを目的として，覆工に発生しているひび割れなどの変状を高精度デジタル情報として記録するレーザー壁面画像連続撮影装置を開発した。既に道路トンネルでの利用を目的としたシステムが構築されていた（日比野ら，1993）が，本研究開発では，それを水路トンネルに適用できるように，小型化を図るとともに，壁面の湿潤状況の相違による色調の濃淡差に対応できるよう，改良を加えた。以下にその原理や実証試験において確認した性能を示す。

3.1　原　理

レーザー光を壁面に照射し，壁面で反射する光量の強弱をフォトマルと呼ばれる光検出器でとらえることにより，ひび割れなどの変状情報を連続的に検出する。本装置の概要を **Fig. 3**, **4** に示す。レーザー光は装置から真後ろに照射されるが，ミラーに反射させて水路トンネル壁面に向きを変えられる。このミラーが回転することに



(a) 半径R=0.85m　ほろ形水路トンネル



(b) 半径R=0.95m　2R馬蹄形水路トンネル



(c) 半径R=0.75m　ほろ形水路トンネル



(d) 半径R=0.9m　3R馬蹄形水路トンネル

Fig. 2(**a**)～(**d**)　水路トンネルに発生しているひび割れの事例
Examples of cracks occuerd in a tunnel lining

より，レーザー光は，水路トンネルの横断面を高速で回転することになる。4台のフォトマルにより，壁面全面からのレーザー光の反射強度を連続的に計測する。レーザー光がひび割れに当たった場合には，反射する光量が小さくなる。本装置を水路内を牽引していくことによって，縦断方向の反射光量の大小が連続画像として記録される。この画像をパソコンに読み込み，ひび割れなどの長さや位置を人が確認して展開図にトレースする。

3.2　本装置の特徴および仕様

本装置の仕様は**Table 1**に示すとおりである。本装置の利点は，以下の点である。

①調査速度は最大1.44 km/hと迅速な調査が可能である

②覆工全面を高精度デジタル情報として記録可能であり，見落としがない

③調査時に照明が不要である

一方，レーザー光は水面で乱反射してしまうので，底版にたまり水が残っている場合には，その部分のデータは取得できない。

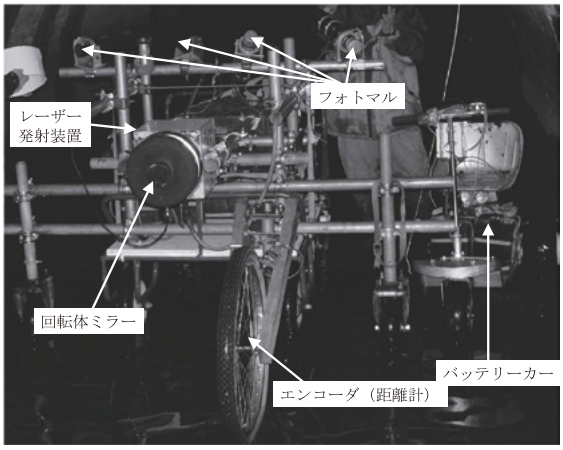

Fig. 3　レーザー壁面画像連続撮影装置の概要
Continuous digital scanning system

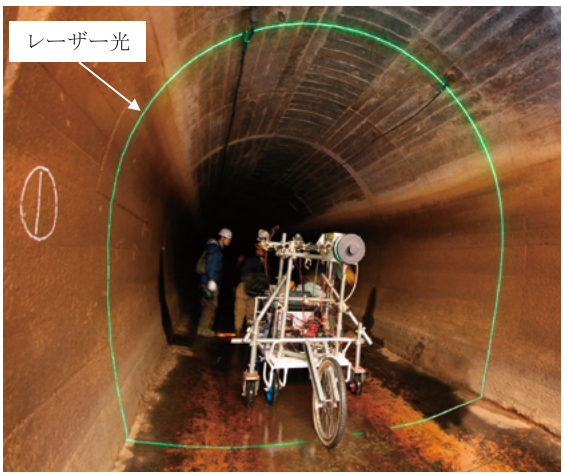

Fig. 4　覆工内面に放射されたレーザー光
Emitted laser light around a tunnel lining

3.3　実証試験による検証

開発したレーザー壁面画像連続撮影装置による実証試験を実施した。以下に，その方法および検証結果を示す。

3.3.1　実験対象地区

水路トンネルにおいて，実証試験を行った。対象地区の水路トンネルの規模は，R = 0.85 mのほろ形水路トンネルで，延長は791 mである。本地区は，上水と兼用されており，断水時間が約6時間に限定された水路トンネルである。

3.3.2　方　法

調査は，午前9時～午後3時までの6時間で実施する計画とした。まず，本装置を分解した状態で水路トンネル内に持ち込み，内部で組み立てた。次に，坑口近傍で予備的な撮影を行った。この目的は，適切な露出で壁面画像が撮影できるように，4台のフォトマルの向き，角度，ダイナミックレンジなどを調整することである。調整完了後，本調査を実施した。調査では，水路トンネル内部に段差や堆積物の有無を確認するために装置の前を先導する作業員1名，装置の牽引やバッテリー交換等を行うための作業員1～2名，画像の確認を行う技術者1名の，合計3～4名で実施した。

なお，対象水路トンネルに直結する開水路区間に敷地の余裕があれば，**Fig. 5**に示すように，断水開始前に装置を組み立てておき，断水直後にユニックで搬入することにより，さらに調査時間の短縮を図ることが可能である。

3.3.3　結　果

Fig. 6に，撮影した水路トンネルの壁面画像の一例を示す。また，図中，四角の枠で囲まれた部分を拡大した画像を**Fig. 7**に示す。図中の数値は，クラックスケール

Table 1　レーザー壁面画像連続撮影装置の仕様
Specifications of continuous digital scanning system

撮影デバイス	フォトマル
レーザー光	スポット径0.36 mm　波長532 nm
ひび割れ検出能力（理論値）	0.1 mm
スキャン速度（最大）	200断面／秒
計測スピード	1.44 km/h
画像	4,096階調（表示256階調）
記録断面	360°（全周）
記録フォーマット	12bit
照明	不要

で計測したひび割れ幅（単位：mm）を示している。

Fig. 7に示されるように，幅0.2～0.3 mm程度のひび割れも十分に撮影できる解像度を有していることが示された。本技術の利点は，展開図のみからはイメージしにくい湧水の状況や，湿潤面の広がり，遊離石灰の状況などを画像として確認できる点である。また，画像は高精度デジタル画像として保存しているため，特定部分を拡大して変状を詳細に確認できる。このため，定期的に行われる調査結果と比較することにより，変状の進行が確認できる。

また，調査時間については，断水時間6時間以内に終了することができ，その効率性も確認できた。

3.3.4　課　題

Fig. 7に示すように，詳細に画像を見ると，本来直線であるはずの覆工コンクリートの型枠の痕跡が直線でなく，ゆがみが生じている。これは，装置を牽引するときの段差等の影響によるものである。特に水路トンネルでは，底版が摩耗により凹凸状態となっていたり，砂礫が堆積していたりするため，道路トンネルと比べると安定して本装置を走行させることが難しく，どうしても画像にゆがみが発生する。

このゆがみをなくすため，画像中の直線部分を利用した画像補正技術（森ほか，2006）を適用し，展開図を作成するときには，可能な範囲でゆがみの少ない画像とする工夫なども行っている。

底版など，水が貯まっている部分は，本技術では撮影できない。レーザー壁面画像連続撮影装置を牽引しながら，可能な範囲で人が目視確認することになる。



Fig. 5　装置の搬入状況
Continuous digital scanning system carried into a canal

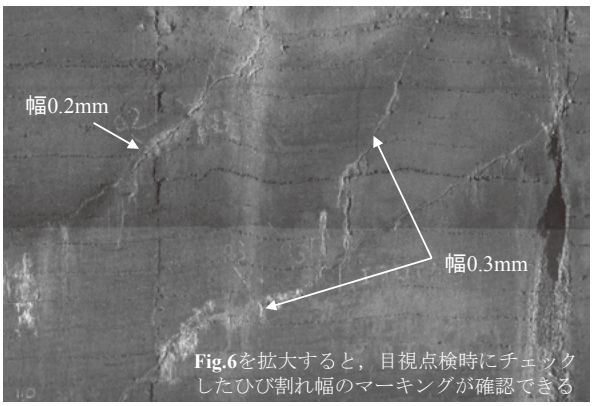

Fig. 7　**Fig. 6**四角部分の拡大画像
Extended image surrounded in a white line in **Fig. 6**

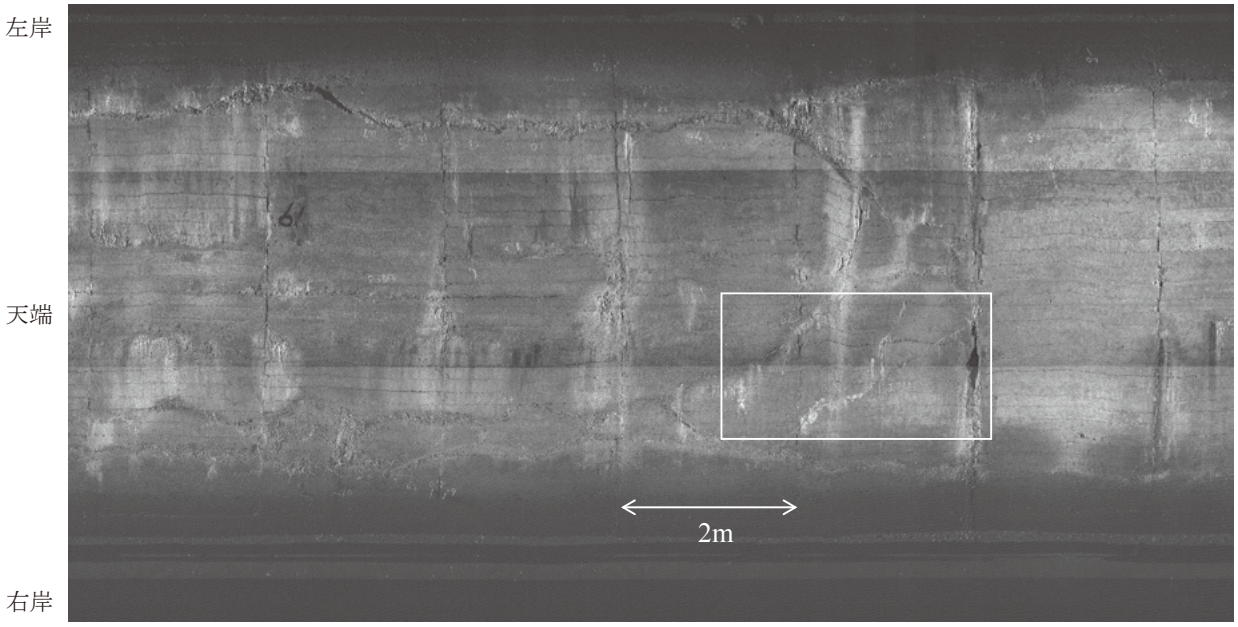

Fig. 6　レーザーによる壁面画像
Digital image taken by continuous digital scanning system

Ⅳ　壁面自動追尾型画像撮影装置の開発

通水状態において水路トンネルの機能診断を行うための様々な技術が開発されている。通水状態での調査方法は，大別すると，①流水中に装置を浮かべ，流下しながら内部の情報を得る方法，と，②制御用ケーブルで接続した状態で，人が機器を手元で操作しながら点検する方法，とに区分される。しかし，①の方法では，制御装置がほとんど組み込まれておらず，安定した画像などを得るためには，流水中を直進させる装置や治具が必要となる。一方，②の方法では，制御や情報通信用にケーブルが必要となるため，調査できる延長にどうしても制限がある。

そこで，これらの課題を克服するため，水路トンネル内部を自然流下しながら，覆工の状態を記録する技術開発を行った。

4.1　原　理

基本原理は，高感度CCDカメラを搭載した船体を水路トンネル上流坑口から放流し，下流坑口で回収することにより，無人で水路トンネル内部の動画を撮影するものである。本装置は，水路トンネル内部を流下しながら，水路トンネル内の変状を装置内部のSDカードに動画として記録する。下流で回収後，ノートPC等によってSDカード内の情報を読み出し，その場で映像を確認できる。

高感度CCDカメラを船体に固定して流下させた場合，船体が回転するとカメラも同時に回転してしまい，見落としなどが発生した（藤原ほか，2009a）。そこで，船体をカメラを搭載する上部と，フロートの役割をする下部とに分割した。すなわち，流水の影響を受けて下部が回転しても，上部のカメラは常に壁面と正対するシステムを考案した（森ほか，2013）。

装置の概要を**Fig. 8**に示す。船体下部には，リング状のレールギアが設置されており，船体上部が回転する構造となっている。船体上部には，水路トンネル側壁までの距離を計測する赤外線距離計を4個所設置している。

壁面自動追尾の原理を**Fig. 9**に示す。例えば，船体が反時計回りに回転し始めたとする。このとき，赤外線距離計により計測したD2およびD4は，壁面との距離が近づき，D1およびD3は，壁面との距離が離れるように変化する。感度をより敏感にするために，（D1 + D3）の値と，（D2 + D4）を計算し，この値を比較することによって，船体がどちらの向きに回転し始めているかを100 msごとに判定する。そして，（D1 + D3）と（D2 + D4）の出力電圧値に比例して回転用モータへの通電時間を制御する。すなわち，距離の差が大きくなるほど，

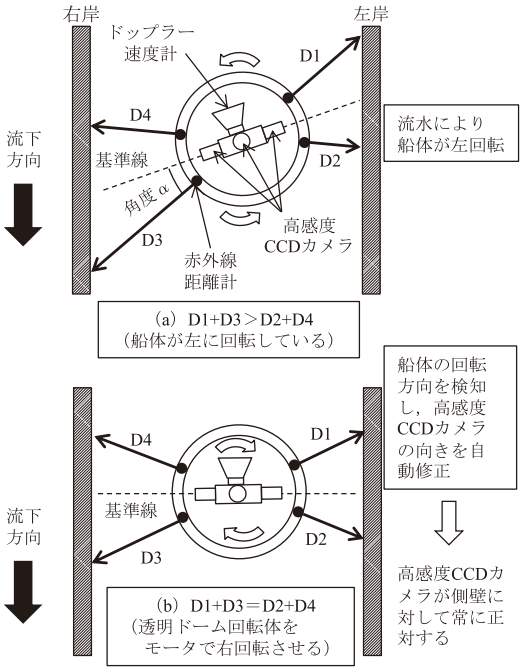

Fig. 9　壁面自動追尾の原理
Principle of automatic lining surface tracking

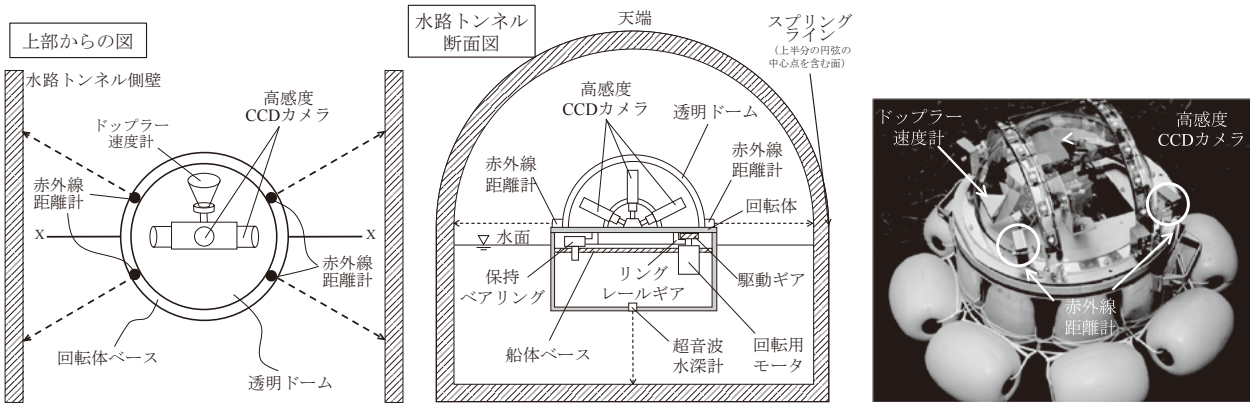

Fig. 8　開発した壁面自動追尾型画像撮影装置
Outline of automatic lining surface tracking system for taking continuous digtal movies

回転用モータの作動時間が長くなり，結果的に回転量が大きくなる。この機構によって，下側の船体が回転しても，カメラは常に壁面を向き続けることになる。

4.2　本装置の特徴および仕様

本装置の仕様は**Table 2**に示すとおりである。水路トンネル覆工のひび割れ等の変状を撮影する高感度CCDカメラ以外にも，坑口からのおよその流下距離を計測するドップラー速度計を搭載している。また，水理機能の低下などを判断するための参考情報のひとつとして，よどみや土砂の堆積状況等を計測する超音波水深計を搭載している。

本装置の長所は，以下のとおりである。

①通水状態で点検可能である。

②壁面に対して正対した画像が得られるため，展開図の自動作成が可能である。

③無人での調査が可能であり，安全性が高い。

4.3　実証試験による検証

開発した壁面自動追尾型画像撮影装置による実証試験を実施した。以下に，その方法および検証結果を示す。

4.3.1　実験対象地区

農業用水と工業用水が共有されている水路トンネルを対象として調査を行った。水路トンネルの形状はR = 0.95 mの2R標準馬蹄形トンネルであり，トンネル延長は224.6 mである。上流投入から下流で回収するまでの時間から求めた流速は，約1.2 m/sであった。

Table 2　壁面自動追尾型画像撮影装置の仕様
Specifications of automatic lining surface tracking

部位	項目	規格その他
本体	大きさ	735 × H528 mm
	重量	35 kg
CCD	素子	1/3インチCCDインターライン転送個体撮像素子
	有効画素数	768（H）× 494（V）
	最低被写体照度	0.0002lx F1.4
	レンズ	バリフォーカルレンズ
	焦点距離	2.6～6.0 mm可変
	画角	TELE　47.1° × 35.4° WIDE 111.3° × 83.5°
水深計	超音波周波数	200 kHz
	測深範囲	0.5～99.9 m
	指向角	15°
	測定精度	± 2%
ドップラー速度計	周波数	10.5 GHz
	電力	8 dBm
	アンテナ	8.2～12.4 GHzホーンアンテナ
	開口部	75 × 95（mm）
	ゲイン	17 dBi
	半値角	25°
	通過帯域	6～180 Hz
	速度換算	0.15～4 m/s相当

4.3.2　方　法

本装置による調査は，以下の手順で実施した。まず，下流坑口において，確実に装置を回収できるように，ネット等の防護柵を設置した。続いて，水路トンネル内にゴミなどの通水阻害箇所がないか，また，事前に計測した流速および水路トンネル延長から想定される流下時間と，実際の流下時間が一致するか，などを確認し，装置が水没することや回収不能になることを未然に防ぐことを目的として，浮き袋等の模擬体による流下テストを行った。模擬体流下テストにより，調査に支障がないことを確認できた後，装置を上流坑口に投入し，装置を流下させた。

4.3.3　結　果

得られた画像の一例を**Fig. 10**～**12**に示す。**Fig. 10**は，壁面自動追尾型画像撮影装置によって得られた動画から，フレーム単位で静止画を抜き出してつなぎ合わせ，展開図にしたものである。遊離石灰の状況，ひび割れ，漏水による湿潤状況などの全体像を確認することができる。**Fig. 10**の黒色四角で囲んだ部分の拡大図を**Fig. 11**に示す。この部分に見られるひび割れは，目視点検により幅2 mmと評価されたひび割れ部分である。このことから，本装置による調査により，R = 0.95 m程度の規模の水路トンネルであれば，幅2 mmのひび割れは，十分確認できることが分かった。

これ以外に見られた変状の事例として，覆工欠損部の事例を**Fig. 12**に示す。過去，断水時に目視点検調査した結果では，この欠損部の大きさは76 cm × 63 cm × 深さ58 cmであることが確認されている。**Fig. 12**では，地山まで照明が届いていないため，深さの情報は画像だけでは判別できなかった。

また，本実証試験では，**Fig. 13**に示すように，白色用紙に，ひび割れに見立てた太さの異なる黒色の線を描いた疑似クラックシートによって，検出できる幅を求めた。その結果，今回の水路規模では，幅1 mmの黒色線も十分確認できることが分かった。現地で確認できた幅1 mm以下のひび割れの事例を**Fig. 14**に示す。遊離石灰を伴っていたり，水が滲み出したりしているようなひび割れでは，黒矢印で示したように幅1 mm未満のひび割れであっても周辺覆工とのコントラストが明瞭となり，認識できるものが存在した。

4.3.4　課　題

本地区では，上述した水路トンネルに加え，他の7個所の水路トンネルにおける調査を実施した。その中に

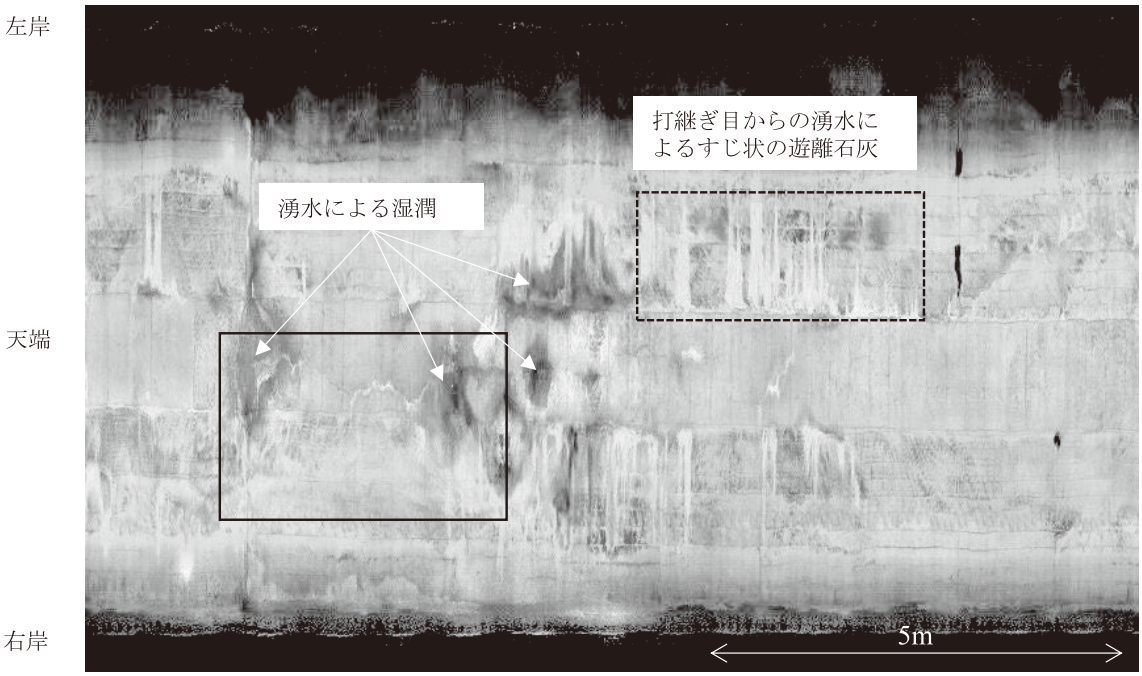

Fig. 10　壁面自動追尾型画像撮影装置よって得られた動画から作成した水路トンネル展開図の例
An example of tunnel lining decelopment view which was made from movies taken by automatic lining surface tracking

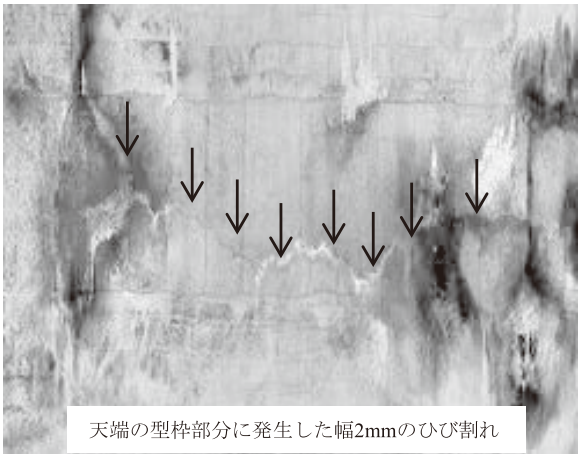

Fig. 11　得られた画像の一例
An example of digital picture



Fig. 12　覆工の欠損個所
A defect of concrete lining

は，流速が1.5 m/sを越える水路トンネルもあった。これらの調査の結果，次に示す課題が抽出された。

まず，流速が1.52 m/sの水路トンネルの一部区間で，壁面自動追尾がうまく機能しない区間があった。この区間は，ちょうどトンネル断面変化点になっており，流況が変化した区間と考えられる。流速が速い水路トンネルでは，今後このように壁面に追従しない可能性もある。CCDカメラの追尾速度は，任意の速度に修正可能であるが，あまりに回転速度を上げすぎると，画像がぶれてしまう危険性がある。今後さらに適用事例を増やし，適切なパラメータに修正していくことで，対応できる可能性がある。

また，一部の水路トンネルにおいて，搬入口が狭く，搬入困難な場合があった。今回は，装置を分解して搬入し，水路トンネル内で再度組み立てて調査を実施したが，さらなる小型化が必要となる。

また，天端付近からの湧水が大量にある場合，高感度CCDカメラを覆う透明ドーム部に水滴がつき，画像がうまく撮影できない可能性も考えられる。

Ⅴ　壁面画像連続撮影技術の現地適用性検証

開発した2種類の点検技術は，水路トンネル覆工の状況を効率的に記録できることが実証試験で確認された。

ここでは，それぞれの技術の特徴や適用限界を示すとともに，本技術の有効性を発揮できる活用方法を提案する。

5.1　各技術の特徴および適用限界

本報で報告した2種類の点検技術の適用範囲，適用条件を，目視調査と比較した一覧表を **Table 3** に示す。ただし，それぞれの数値に関しては，実証試験で得られたデータを根拠として記述している。例えば，壁面自動追尾型画像撮影装置において検出できるひび割れ幅は，調査対象の水路トンネルの規模と，搭載しているCCDカメラの画素数や，流下速度により変化する。したがって，条件の組み合わせによっては，所定の性能が発揮できない可能性もあることに留意する必要がある。

断水できる場合，最も簡便に実施できるのは，レーザー壁面画像連続撮影装置である。特に大規模な水路トンネルでは，近接目視しなければならない目視調査と比較すると，足場などが必要ないため，調査は効率的であり，また得られる画像も高精度である。一方，断水が困難な場合には，壁面自動追尾型画像撮影装置が有効である。目視調査やレーザー壁面画像連続撮影装置と比較すると精度は落ちるものの，断水して本格的な調査を実施する必要があるかを判定する一次的な点検手法として有効である。また，トンネルの径が小さい場合にも，レーザー壁面画像連続撮影装置と比べて機材が搬入しやすく，また無人であるため，安全性が高いというメリットもある。

目視調査の利点は，対象規模，対象施設等の制約がほとんどないことである。例えば，サイフォンなど充水状態個所でも，潜水夫などによって調査することができるという柔軟性を有する。ただし，調査後の記録の保存という面では，正確性に乏しいという問題がある。変状発生位置，規模は，ラフなメジャー計測値となったり，変状記録は，スケッチや局所の写真となるためである。したがって，変状の進行性を明瞭に把握することが困難となる。

それに対し，開発した技術は，適用範囲は限定されるものの，覆工の状態を画像として記録できる。通常，目視調査で確認された各種の変状は，展開図に示される。それ以降行われる目視調査では，過去の展開図をもとに変状の再確認や，新たな変状の抽出が行われる。このとき，新たに見つかった変状や，展開図と同じ位置にあるひび割れにもかかわらず，幅や延長が異なっているものなどが確認された場合には，実際新しく発生したのか，進展したのか，あるいは過去の目視点検結果の誤記や見落としなのか，が明確に判別できないという問題がある。画像として記録していれば，これらを区別できるという利点がある。

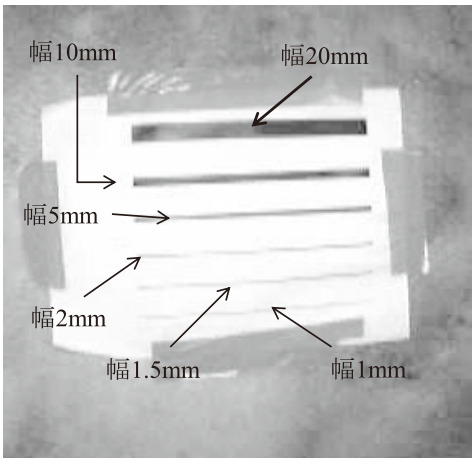

Fig. 13　ひび割れ検出能力の確認
Detection sheet to evaluate detection capability

5.2　各技術の適用方法の提案

以下では，どのような場面で開発技術が有効に活用で

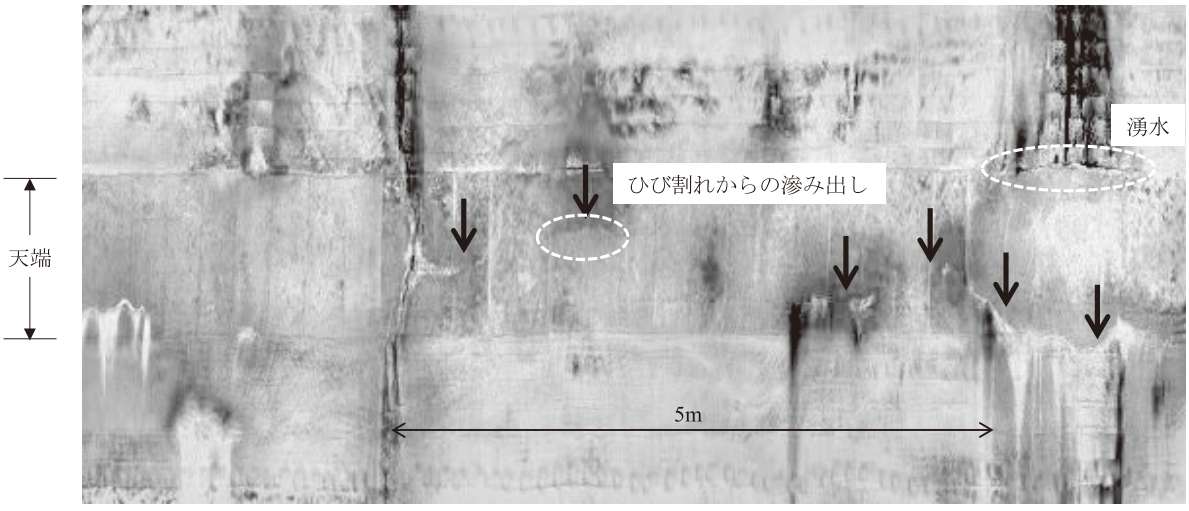

Fig. 14　検出された幅1mm未満のひび割れ（天端部分の拡大図）
Detected crack less than 1 mm width

Table 3　各手法の適用範囲および適用条件
Scope and application of each methods

	目視調査	レーザー壁面画像連続撮影	壁面自動追尾型画像撮影
対象規模	0.8 m ～ （足場等を活用すれば制約なし）	直径1.5 ～ 8.0 m	直径1.5 ～ 2.0 m
検出できる 最小ひび割れ幅	0.05 mm ～ （クラックスケールによる）	0.1 mm ～ （実証試験による）	1.0 mm ～ （実証試験による）
調査時間	変状の程度により変化	最大1.44 km/hr	最大3.6 km/hr （流速1.0 m/sとした場合）
許容通水環境	水深40 cm以下※1) （流速1.0 mのとき）	水深50 cm以下※2) 流速 1 m/s以下程度	水深50 cm以上 流速1.5 m/sまで
搬入出に必要な規模	φ800 mm以上	最小通過径900 × 900 mm	最小通過径750 × 750 mm
トンネル内での作業 に必要な明るさ	懐中電灯等の明かりが必要	照明不要	照明　LED（0.0002lx）
主な特長	・安価 ・打音などの調査も同時に可能 ・サイフォン等，構造物の形状 によらず対応が可能	・高精度 ・調査速度が迅速 ・見落としがない ・画像が記録として残る	・通水状態でも可能 ・無人で調査でき，安全 ・画像が記録として残る
現状の課題	・変状の位置，規模に誤差 ・見落としの可能性あり ・点検精度に個人差	・水面下の情報が得られない ・目視調査に比べると高価 ・ひび割れ幅は推定値	・サイフォンは通過できない ・目視調査に比べると高価 ・ひび割れ幅は推定値

※1）国土交通省「洪水避難時に水中歩行できる領域」による
※2）藤原ほか（2009b）による

きるかを提案する。

5.2.1　レーザー壁面画像連続撮影装置

本技術の最大の利点は，高精度なデジタル画像を短時間で取得できることである。このため，本技術の活用方法としては，冬季に通水していない水路トンネルや，数時間程度であれば断水が可能な水路トンネルの目視調査の代替として活用できる。一方で，通常，人が行う目視調査と比較するとコストがかかる。このような状況を加味した上で，本技術は，次のような現地で貢献できると考えている。

①断水時間が十分でない水路トンネルにおける機能診断

断水時間が限定される場合には，時間的な制約により点検すべき項目が限られる。しかし，本技術では，短時間に覆工表面の変状情報を高精度に記録できる。変状の確認は，得られたデジタル画像上で行うことができるため，見落としなどは発生しない。

ただし，このような高精度の調査は，何度も行う必要はないと考える。一度，本技術により，覆工全体の正確な目視情報を収集すれば，その後の点検は，人による目視調査でも，十分な精度での点検が可能であると考えられる。すなわち，本手法で得られた画像を基礎となる初期データとし，「著しい変状の進行」や，「新たな変状の発生」を追跡することが可能となるためである。

②新設あるいは補修補強対策直後の竣工検査

現在の水路トンネルの機能診断の問題点のひとつが，確認される変状がいつ発生したのかが分からないことである。覆工コンクリートには温度応力，乾燥収縮等により，どうしても施工直後にひび割れが発生してしまう。しかし，これらの変状は，経年的にはほとんど進行しない。こうしたひび割れと，まさに外力によって発生する構造的なひび割れとを区別する必要がある。そこで，竣工検査時に，これらの初期欠陥の情報を本技術により記録することを提案する。これにより，供用後の点検で確認されたひび割れ等の変状が，初期から発生していたものか，供用後に新たに発生したのかを区別することが可能となる。また，あらかじめ初期欠陥の情報を収集しておくことで，新たに発生したひび割れなどの変状発生の原因を絞り込みやすくなる，という利点もある。

5.2.2　壁面自動追尾型連続撮影装置

本技術の最大の利点は，断水しなくても水路トンネル内部の情報が得られることである。一方で，通常人が行う目視調査と比較するとコストがかかる。したがって，本技術は，次のような現地で貢献できると考えている。

①断水による損失コストが大きい調査

わずかの時間でも断水できる場合には，精度が高いレーザー壁面画像連続撮影が適切である。しかし，短時間でさえも断水できない水路トンネルの調査には，壁面自動追尾型画像撮影装置が有効である。例えば，先述した実証試験事例においては，8個所，合計延長約3.6 kmの水路トンネル調査を行っている。調査には，技術者4名で4日間を要し，データ処理を含めて120万円/km程度のコストがかかっている。

一方，同規模のトンネルを断水して調査した場合には，とりまとめを含めて70～100万円/km程度である。このように，壁面自動追尾型画像撮影装置による調査費用は必ずしも低コストではないが，原水単価と断水期間から算定される社会的損失を考慮すると，本技術は，コスト縮減に貢献しているといえる（藤原，2014）。このように，断水に伴う損失コストを考慮する場合，本技術は有効となる。

②災害時の応急点検

東日本大震災では，農地や多くの農業水利施設に被害が発生した（農村工学研究所，2015）。過去の地震においても，水路トンネルの崩落などが報告されている（常住ら，2009）。こうした災害時の応急点検では，人命尊重を優先し，無人で調査可能な本技術の適用が有効である。

③過去に一度も点検したことがない水路トンネル

過去に点検記録があれば，少なくとも人による調査が可能と判断できる。しかし，場所によっては，有毒ガスなどで水路トンネル内部への立ち入りが不可能な場合も想定される。このような水路トンネルでは，本装置にあらかじめガス検知機などを搭載して流下させることにより，画像とともに水路トンネル内での有毒ガス発生個所等を検知することができ，有人調査の可否を判断する目安となる。

5.3　留意点

開発したこれらの技術適用に関して，以下に留意すべき事項を示す。

①あくまで目視調査の代替技術である

本技術は，基本的に目視情報の代替である。したがって，壁面が泥や水草で覆われている場合には，その画像しか得られない。

水路トンネルの構造的な安全性を目視情報から得ようとすると，ひび割れの幅だけでなく，ひび割れの段差，発生個所などの情報も不可欠である。このことから，本技術により，水路トンネルの構造的な安全性を直接評価することができない。構造的な安全性評価に結びつけるためには，変状の発生に加え，断面の変形，覆工背面の空洞分布や，その限界値を明らかにする必要があると考える。なお，断水できる場合には，内空断面計測や，近年では3次元レーザースキャニングなどにより，水路トンネルのひび割れの段差や全体の変形を捉える技術も開発されている。覆工背面空洞調査には，電磁波レーダなどの技術が実用化されており，水路トンネルの構造的な安全性を評価するためには，これらの技術と組み合わせることが必要である。

②本技術で得られるひび割れ幅は推定値である

実証試験においては，あらかじめ，あるいは後日行われた目視調査との比較によって，「どれくらいの幅のひび割れを検出できたのか」ということに着眼して評価した。しかし，実際の調査では，得られた画像のみからひび割れ幅や欠損の大きさなどを特定する必要がある。

現状では，画像中に写る距離表示標識の間隔，型枠跡の大きさ，トンネルのスパン長などから相対的な比率によって求める，あるいは坑口近傍のひび割れなどを計測しておき，計測で得られた画像との比較から，ひび割れ幅を推定する。つまり，本技術で得られた「ひび割れ幅」を指標としたモニタリングは，精度面から困難であるといえる。したがって，本技術は，ひび割れの長さが進展したり，新しくひび割れが発生したりする事象を発見することが目的であり，仮に，進展しつつある個所が検出された場合には，その部分に局所的に亀裂変位計などのセンサーを取り付けてモニタリングすることが重要である。

Ⅵ　結　言

本研究では，水路トンネルの覆工に発生している変状を点検する技術として，2種類の調査技術を開発し，その有効性を検証した。その結果，以下のことが示された。

(1) 水路トンネル覆工に発生した変状などの情報を，高精度デジタル画像として記録できる，レーザー壁面画像連続撮影装置を開発した。実証試験の結果，ひび割れの段差の有無の確認は難しいものの，幅0.2 mm以上のひび割れは記録できることが確認できた。

(2) 断水して調査することが困難な水路トンネルの変状を調査する技術として，壁面自動追尾型画像撮影装置を開発した。2Rおよび3R＝1.8～1.9 mの標準馬蹄形水路トンネルにおける調査の結果，幅2 mm以上のひび割れは十分検出できること，疑似クラックシートによる検証では，幅1 mm以上のひび割れを検出できる能力を有すること，また，幅1 mm未満のひび割れについても，遊離石灰や湧水等により周辺壁面とのコントラストが明瞭であれば，十分検出できること，が確認された。

開発したレーザー壁面画像連続撮影装置は，これまでに230 km以上の水路トンネルの調査に活用されている。金平・江崎は，水路トンネルの受益面積，断水時の影響などから重要度区分を設定し，その重要度に応じた水路トンネルの調査項目およびその方法の案として，重要度の高い水路トンネルの覆工調査に壁面画像撮影を提案している（金平・江崎，2012）。また，2006年に発生した広島県送水トンネル崩落事故後の課題検討会報告書「広範囲に影響を及ぼす施設事故に関する課題検討会」では，今後のトンネル点検のあり方として示したガイドラインの中で，おおむね5年に1回程度の頻度で，開発したレーザー壁面画像連続撮影装置を図ることが提案される（(社)日本水道協会，2007）など，技術が普及しつつある。一方の壁面自動追尾型画像撮影装置は，当初水路

トンネルを対象としたものであったが，企業局，水道局からの問い合わせがあり，実際，東日本大震災後，仙台市水道局からの依頼を受け，水道トンネルの緊急点検を行った。水路トンネルについては，平成25年度に，中国四国農政局管内のストックマネジメント技術高度化事業として採択されるなど，徐々に現地への適用事例が増えつつある。

今後の課題として，このような点検で検出された変状が，どの程度水路トンネルの構造，水理，水利用機能を低下させているのかを定量的に評価することが挙げられる。水路トンネルがどの程度構造的に危険な状態なのかを判定できれば，補強対策の必要性，対策時期，具体的な補強工法などを検討することが可能となる。水路トンネルの構造的な安全性とひび割れ発生位置，ひび割れ幅などを明らかにすることができれば，本技術の有効性はさらに高まると考えられる。

謝辞：本研究は，平成14～18年度に実施した官民連携新技術研究開発事業効率的な農業用水路維持管理のための非破壊調査技術および劣化診断システムの開発」および平成19～23年度に実施した「農業用水路トンネル・サイホンの不断水調査・診断技術の開発」により得られた研究成果の一部をとりまとめたものである。研究開発にご協力頂きました農村工学研究所の増川晋施設工学領域長，渡嘉敷勝業務推進室長，中矢哲郎主任研究員，現島根大学長束勇教授，現東北農政局石村英明氏，現石川県立大学森丈久准教授，官民連携新技術研究開発事業に参画して頂きました日本工営(株)，(株)ウォールナット，(株)小松製作所，日本シビックコンサルタント(株）の関係者各位にお礼申し上げます。

引用文献

(社)土木学会（2015）：地下構造物のアセットマネジメント－導入に向けて－，地下空間・ライブラリー1

藤原鉄朗（2014）：水路トンネルの診断技術の高度化によるライフサイクルコストの改善，農業農村工学会誌，**82**(**4**)，15-18.

藤原鉄朗，齋藤　豊，森　丈久，森　充広，渡嘉敷勝（2009a）：通水状態での農業用水路トンネル点検手法の開発，農業農村工学会誌，**77**(**4**)，25-28.

藤原鉄朗，小谷　拓，永吉洋之，吉田典明（2009b）：減量通水条件での水路トンネル調査診断技術の開発，こうえいフォーラム，**17**，59-65.

日比野悦久，野村智浩，太田資郎（1993）：レーザーを利用したトンネル内面クラック探査装置の開発，電力土木，**248**，74-79.

金平修祐，江崎正美（2012）：水路トンネル診断技術検証事例について，水と土，**166**，18-23.

国土交通省：避難行動における限界条件の設定　洪水避難時に水中歩行できる領域，（オンライン），入手先＜http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/saigai/tisiki/chika/pdf/g-11_g-14.pdf＞，（参照2015.9.28）

森　充広，藤原鉄朗，齋藤　豊，増川　晋，渡嘉敷勝（2008）：農業用水路変状調査システムの開発，農業農村工学会論文集，**253**，71-78.

森　充広，増川　晋，渡嘉敷勝，藤原鉄朗，財部伸一（2006）：CCDおよび赤外線による同時ライン計測システムの開発，コンクリート構造物への非破壊検査の展開論文集，**2**，71-78.

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**，9-17.

森　丈久ほか15名（2013）：壁面自動追尾型水路トンネル撮影装置，特許第5487409号

(社)日本道路協会（1993）：道路トンネル維持管理便覧　第2編　トンネル本体工，9-58.

(社)日本水道協会（2007）：広範囲に影響を及ぼす施設事故に関する課題検討会報告書，（オンライン），入手先<http://www.jwwa.or.jp/houkokusyo/pdf/case_study/case_study_all.pdf>，（参照2015.9.15）

農業食品産業技術総合研究機構　農村工学研究所（2015）：研究者からみた東日本大震災と復旧・復興，農工研技報，ISSN1882-3289

曽我　力（2012）：群馬用水の水路トンネルの機能調査と評価について，水と土，**165**，71-78.

(財）鉄道総合技術研究所（1990）：トンネル補強・補修マニュアル　参考資料2，325-331.

常住直人，森　丈久，田中良和，高木強治（2009）：平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震による震源近傍の老朽水理施設被災状況に関する調査，農工研技報，**209**，139-152.

上野直也，土屋　司，福士将児（2008）：長大水路トンネルの現況調査について，水と土，**154**．15-21

受理年月日：平成27年10月6日

Evaluation of Applicability of the Continueos Scanning System for Irrigation Tunnel Lining

MORI Mitsuhiro*, ASANO Isamu*,KAWAKAMI Akihiko* and KAWABE Shohei*

*Laboratory of Faciliteies Engineering, Facilities and Geotechnical Engineering Research Division

Abstract

Authors developed two types of digital scanning system to take visual information in agricultural irrigation tunnels quickly, efficiently, and accurately. One is a continuous digital laser scanning system, and the other is an automatic linning surface tracking system. The laser scanning system can be applied for a survey of a tunnel lining when a water supply is stopped even in a short time. This system can detect all defective events in a concrete lining as a continoues digital image using the distribution of reflected laser. Automatic lining surface tracking system can survey a tunnel lining surface under water servicing. This system can also detect all defective events as a digital movie by three CCD cameras. In this report, we describe technical summaries of these methods and show a result of onsite experiment. As a result, we confirmed that these techniques could be applied as an alternative technology for a visual investigation.

Key words: *tunnels for irrigation, Functional diagnosis, cracks, continuous digital scanning system, laser, automatic linning surface tracking system*