

# CCD およびサーモグラフィ連続画像計測システムの開発と適用事例

## DEVELOPMENT OF CONTINUOUS IMAGING SYSTEM COMPRISED OF CCD AND IR THERMOGRAPHY

青木伸之\*・藤原鉄朗\*・森 充広\*\*・増川 晋\*\*・渡嘉敷勝\*\*・財部伸一\*\*\*  
Nobuyuki AOKI, Tetsuro FUJIWARA, Mitsuhiko MORI, Susumu MASUKAWA, Masaru TOKASHIKI  
and Shinichi TAKARABE

The stocks of public infrastructure that accumulated rapidly during the period of high economic growth will from now on progressively reach the end of their service lives, so more efficient maintenance management techniques are required. This paper presents the development and trial application of a measurement system for recording a continuous image along flat surfaces using a CCD line camera and infrared thermography. The technology efficiently identifies deteriorated portions of large linear structures like dam walls, roads, airport runway pavements, etc.

**Key Words :** *CCD line camera, infrared thermography, continuous linear scanning, line monitoring, agricultural water supply, preventative maintenance, functional evaluation*

### 1. はじめに

我が国の社会資本ストックは、戦後から高度経済成長期のピークである 1970 年以降急速に増加し、1993 年には約 617 兆円に達した。今後、戦後直後に建設された各種ストックが順次耐用年数を経過することになり、効率的な維持管理が求められている。本稿では、主に農業水利ストックを取り上げて報告する。

農業に欠かすことのできない農業用ダム、ため池、頭首工、排水機場などの基幹的な農業水利施設は、全国で約 7,100 箇所、主要な農業用水路の延長は 45,000km、末端の用水路まで含めると地球 10 周分の距離にも相当し、平成 14 年度再建設費ベースで 25 兆円と試算されている<sup>1)</sup>。しかし、戦後の食糧増産時期に建設されたこれらの農業水利施設は、建設後数十年を経過し、劣化が進行している。今後、これらは更新時期を逐次迎えるが、資源の有効活用観点から、すべてを取り壊して更新するのではなく、適時に適切な補修・補強対策を行うことにより、農業水利施設を長寿命化する予防保全の施策が進められようとしている。そのためには、農業水利施設の変状を経年的にモニタリングし、変状の程度や進行性を適切に診断することが重

要となる。筆者らは農林水産省の補助を受け、農業水利施設のうち、特に長大な延長を有する農業用水路を対象として、レーザーや CCD ラインカメラによって変状を連続的にデジタル情報として記録できる連続壁面スキャンシステムを開発し、実証試験を行ってきた<sup>2),3)</sup>。今回、主として開水路の壁面画像を連続的に撮影、記録することを目的として開発した CCD ラインカメラによる連続壁面スキャン装置に、赤外線ラインスキャン装置を搭載し、可視画像と赤外線画像を同時にかつ連続的にラインスキャンするシステムを構築した。本論では、ダムの洪水吐を対象として行った実証試験結果をもとに、システムの適用性、適用限界について考察する。

### 2. システムの概要

#### (1) 農業水利施設における機能診断の問題点

農業水利施設を対象として実施される調査のほとんどは、目視調査に主眼を置いたものである。目視調査は農業水利施設の基本的かつ重要な調査手法であるが、①変状状況の確認に個人差が含まれる、②機能診断において必要とされる精度での調査には時間がかかる、③水路トンネルなどの暗所では、変状を見落とす危険性がある、④上水道や発電用水と兼用されている農業用水路では、断水できる時間が数時間に限定され、調査時間が制約される、などの問題点がある。さらに、ひび割れなどの変状の情報が紙ペー

\* コンサルタント国内事業本部 首都圏事業部 インフラマネジ  
メント部

\*\* 独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構  
農村工学研究所

\*\*\* 株式会社ウォールナット

スでしか保管されず、変状の経年的変化を把握することが難しい。したがって、目視調査結果を維持管理や変状モニタリング手法として有効に活用するためには、さらなる調査の効率化、高精度化そして調査結果のデジタル化が課題であった。

(2) 研究開発の目的

上記の問題点をふまえ、農業水利コンクリート構造物のひび割れの分布や幅、摩耗の状態を非破壊でデジタル画像化できる連続壁面スキャニングシステムを構築した。本システムでは、短期間で農業用水路の変状を効率的に取得でき、さらに変状はデジタル情報として記録される。

一方、ダムなどの重要構造物の機能診断に際しては、ダム堤体の機能診断に加え、洪水吐や監査廊などの付帯コンクリート構造物に関する機能診断技術の開発が重要である。ダムの付帯コンクリート構造物は、農業用水路と比較して大規模であるため、目視点検そのものが困難である。さらに、致命的な機能低下が人的被害につながる重要構造物であるため、ひび割れや摩耗などの表層に現れる変状に加え、鉄筋腐食に伴うコンクリートの浮きや、吹き付けモルタルの浮きなどの変状まで詳細に把握する必要がある。このような浮き・はく離箇所の調査法としては、打音検査が一般的であるが、ダム付帯コンクリート構造物の規模が大きいことから、全面での打音検査には仮設を設置する必要があり、時間やコストがかかる。打音検査の検査対象範囲をできる限り絞り込むためには、広範囲に非接触で浮き・はく離箇所を検出できる赤外線法が有効であると考えられる。しかし、従来のエリア方式赤外線法では、カメラで撮影している範囲を確認しつつ、調査漏れがないように計測を行う必要がある。このため、躯体表面に目印をつけながら調査を行う必要があり、長大な延長を対象とするには、必ずしも効率のとはいえなかった。そこで、赤外線法をラインスキャンできるシステムに改良し、農業用水路を対象として開発した連続壁面スキャニングシステムを組み合わせた同時ライン計測システムを構築し、その現地適用性を評価することにした。

(3) CCD および赤外線による同時ライン計測システムの概要

構築したシステムの概念図を図-1に示す。CCD ラインカメラ法と赤外線法のシステムはそれぞれ独立しているが、距離検出のために設置した共有のエンコーダから同時に信号を受け取るシステムとなっている。したがって、可視画像と赤外線画像を連続的に撮影することが可能である。

赤外線ラインカメラの仕様を表-1に、CCD ラインカメラの仕様を表-2に示す。赤外線ラインカメラは、市販されている機器のうち、ライン計測が可能なものを選定した。

可視画像を撮影する CCD ラインカメラには、7,500 画素のものを選定した。通常、CCD ラインカメラの絞りは手動で操作を行わなければならないが、今回は作業性を考慮し、CCD ラインカメラに照度計を接続し、壁面の照度に応じて適切な絞りで撮影できるように、絞り自動制御を導入した。

CCD ラインカメラによるひび割れ検出能は、防水性からみた補修を必要とするひび割れ幅である 0.2mm のひび割れ<sup>4)</sup>を認識できることを目標として設定した。デジタルカメラによって 0.2mm を認識できる撮影画角は、1,312×1,312 画素のデジタルカメラで約 2.5m と報告されている<sup>5)</sup>。

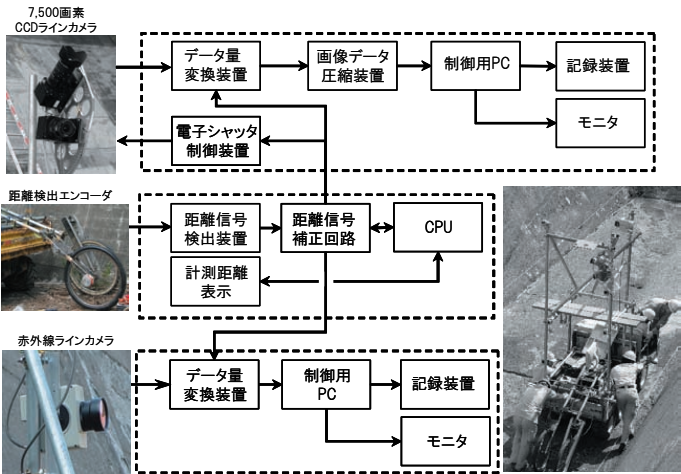


図-1 CCD および赤外線の同時ライン計測システム概念図

| 表-1 赤外線ラインカメラの仕様 |                                                   |
|------------------|---------------------------------------------------|
| 測定温度範囲           | -50～2,000℃                                        |
| 最小検知温度差          | 0.08℃ (at 30℃)                                    |
| 測定精度             | ±0.5%                                             |
| 測定波長             | 8～13μm                                            |
| 水平解像度            | 334 本以上 (1.5mrad)                                 |
| 走査角              | 水平 30°×垂直 28.5°                                   |
| 使用測定範囲           | 0～40℃                                             |
| 外形寸法             | 検出部：約 192×144×229(mm)<br>コントロール部：約 290×88×240(mm) |
| 質量               | 検出部：約 3.4kg<br>コントロール部：約 3.8kg                    |

| 表-2 CCD ラインカメラの仕様     |                                     |
|-----------------------|-------------------------------------|
| 主撮影デバイス               | 7,500 画素 CCD ラインカメラ 2 台<br>キセノン照明装置 |
| 分解能                   | 1mm：トンネル高さ 2.5m まで                  |
| スキャン速度 (最大)           | 1,000 断面/秒                          |
| 計測スピード (最大)           | 1.8km/h                             |
| 画像                    | 16,777,216 色カラー (R,G,B 各 8 ビット)     |
| 記録断面                  | 約 280 度                             |
| 記録フォーマット              | 24 ビット→16 ビット圧縮バイナリ                 |
| 照明                    | 約 3,000 ルックスの照度が必要                  |
| 消費電力                  | 350kW+照明電力 (500kW)                  |
| 記録装置転送速度              | 10.7M バイト/秒                         |
| 1 日の計測距離              | 6km 程度                              |
| 1 日の作業で必要とする計測用電源電池本数 | 4 本 (12V/160AH 41.5kg)              |

これを 1 画素あたりの大きさに換算すると、1.9mm となる。したがって、0.2mm 幅のひび割れを CCD ラインカメラのデジタル画像で検出するためのラインスキャンのピッチは 1.9mm 以下にしなければならないことが分かる。そこで、本システムでは、計測速度を落とすことなく、この精度でのラインスキャンを可能にするよう、CCD ラインカメラのスキャン速度を最大 1,000 断面/s とし、余裕をみて最小 1mm ピッチでのラインスキャンを可能とした。

なお、水路系のコンクリート構造物では、水流などによりコンクリートが著しい摩耗を受けることがある<sup>6)</sup>。摩耗による凹凸の著しいコンクリート上において CCD ラインカメラを搭載した計測車を牽引すると、移動とともに CCD ライン画像が大きくぶれて、正確な画像が得られない<sup>7)</sup>。

そこで、図-2 のフローに示すぶれ対策を行った。

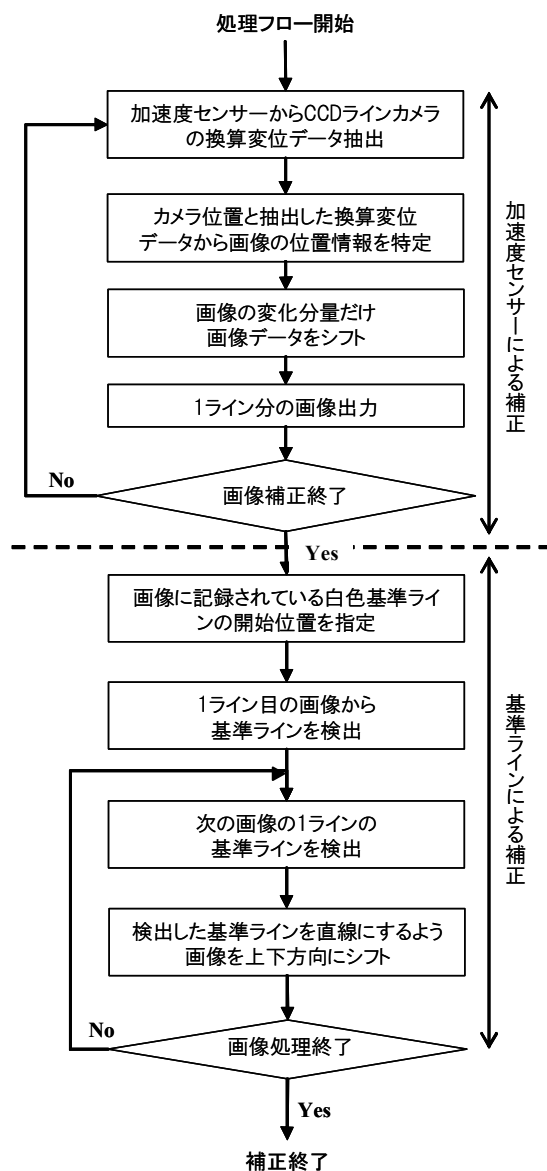


図-2 ぶれ補正の処理フロー

## 1) 加速度センサーによるぶれ補正

カメラ部および計測車の二箇所に加速度センサーを取り付け、牽引時の鉛直方向および壁面までの距離の換算変位データを画像記録と同期して取得した。これらのデータから、カメラ自体の位置と、カメラによる撮影領域を計算で求め、撮影した画像データをその変化量に対応した画素数だけシフトする補正を行った。

## 2) 直線近似によるぶれ補正

走行距離が長くなると 1) では誤差累積が生じる可能性があるため、CCD ラインカメラの連続壁面画像撮影時に壁面に設置した水平の白色水糸（以下、基準ラインと称する）を画面内に記録した。まず、1 ライン目のデータから基準ラインの画素を決定する。そして、次の 1 ラインのデータを読み込み、基準ラインの画素を検索、抽出し、これが直線となる画素数の分だけ、ラインデータを上下にシフトさせる。この操作を全測定ライン数繰り返し、ぶれを補正した。

## 3. ダム洪水吐における実証試験

### (1) 実証試験の目的と方法

開発した CCD および赤外線同時ライン計測システムの性能を確認するため、昭和 31 年に建設された東北地方のダム洪水吐を対象とした実証試験を行った。実証試験では、以下の 1) ～3) の性能を検証することを目的とした。

#### 1) CCD ラインカメラ画像のぶれ補正および絞り自動制御機能

図-2 に示した CCD 画像のぶれ補正の有効性を検証した。さらに、照度計に応じて CCD ラインカメラの絞りを自動的に制御するシステムの作動性、有効性を検証した。

#### 2) CCD ラインカメラのひび割れ検出能

ひび割れを模擬した幅 0.1mm から 1.0mm まで 0.1mm 間隔の黒色線を描いた透明シートを洪水吐コンクリート躯体に貼り付け、検出できる最小ひび割れ幅を検証した。

#### 3) 赤外線ラインスキャンの精度

事前実施した打音調査によって判別した浮きやはく離危険箇所が、赤外線画像で判別できるかを検証した。

### (2) 施設の概要

実証試験を行ったダム洪水吐の形式は非調整型横溢流式であり、設計洪水量は 288m<sup>3</sup>/s である（写真-1）。これまでに、本洪水吐では、厚さ 2～6cm のモルタル吹付（昭和 38 年）、底盤の空洞部分を充填するためのグラウチングおよび越流水放流水路壁面の 15cm コンクリート打ち増し（昭和 53 年）、越流部補強アンカー（昭和 60 年）などの補修補強工事が実施されている。

実証試験に先立ち、目視および一部打音による変状調査を行った。変状を写真-2 に示す。特に目立った変状は、

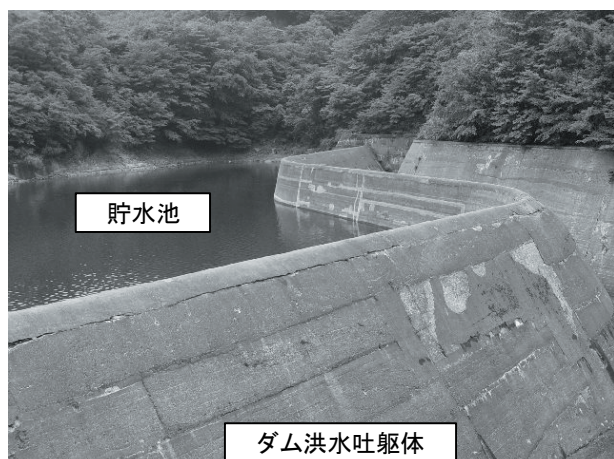


写真-1 実証試験を実施した洪水吐

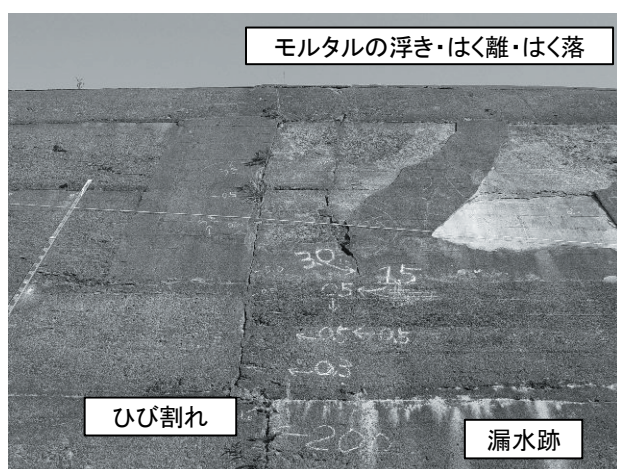


写真-2 洪水吐に発生している変状の一例

凍結融解作用によるスケーリング、施工継ぎ目の開き、施工継ぎ目からの漏水、底盤の骨材露出、断面欠損および断面欠損による鉄筋露出などであった。

#### 4. 調査結果

##### (1) CCD ラインカメラのぶれ補正および自動絞り機能の効果

図-2 のフローにおいて、未補正の画像、二箇所の加速度センサーによって補正した鉛直方向と壁面との距離を補正した画像、基準ラインによって補正した画像の三種類の CCD ラインカメラ画像を図-3(a)、(b)、(c)に示す。ただし、(a)の未補正画像については、他の画像より1年前に撮影したものである。自動絞り機能を追加する以前の画像であるため、図中に示されているように濃淡の不連続が存在している。

洪水吐壁上部において、(a)、(b)、(c)の順に鉛直方向のぶれ補正効果が顕著に表れていることが分かる。なお、これらの画像について、さらに拡大した画像により補正効果を比較したが、同様に(a)、(b)、(c)の順でゆがみがでない画像となっていることを確認した。すなわち、CCD ラインカメラによる連続壁面画像撮影を行う際、底盤の凹凸が著しい場合には、撮影時に少なくとも1本の基準ラインを図中に撮影しておく

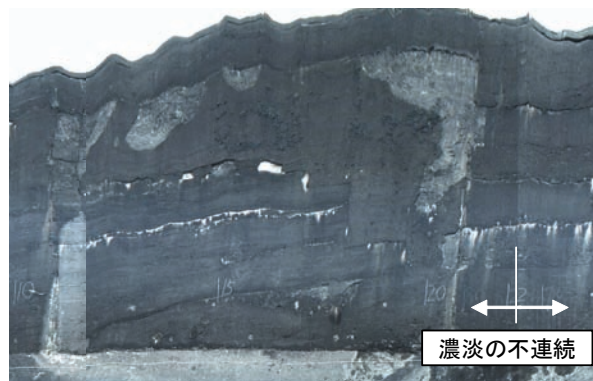


図-3(a) 未補正画像の CCD 画像

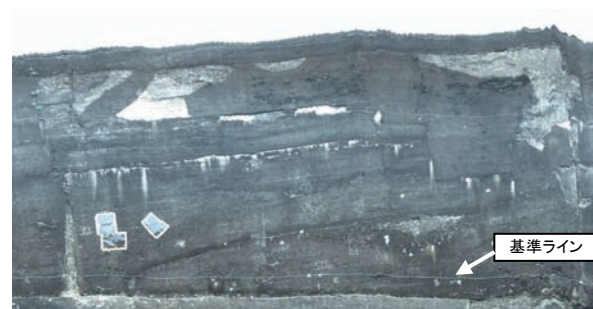


図-3(b) 加速度センサーによる補正後の CCD 画像

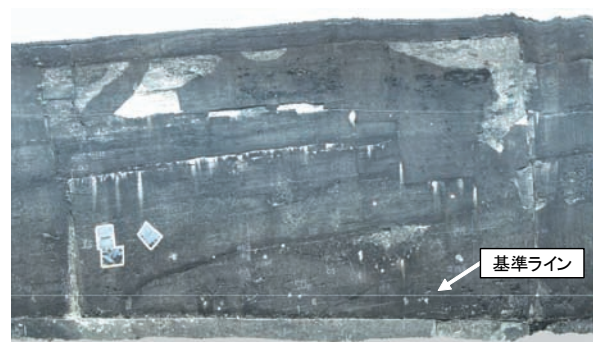


図-3(c) 加速度センサーおよび基準ラインによる補正後の CCD 画像

ことによって、高い精度で画像のぶれを補正できることが明らかとなった。

また、自動絞り機能を付加した(b)、(c)の画像では、(a)に認められる壁面変状によらない濃淡の不連続が現れておらず、連続した濃淡で画像が記録できた。したがって、自動絞り機能は有効に動作することが確認できた。

##### (2) CCD ラインカメラのひび割れ検出能

ひび割れを想定した透明シートの撮影画像および実際のひび割れを撮影した画像を図-4に示す。コンクリート表面色の濃淡により認識のしやすさは異なるが、透明シートの結果では、0.2mm 幅のひび割れを識別することができた。また、実際のダム洪水吐躯体に発生している 0.2mm 幅のひび割れ箇所について、CCD ラインカメラによる連続壁面画像を確認したところ、ひび割れを認識できることが分かった。

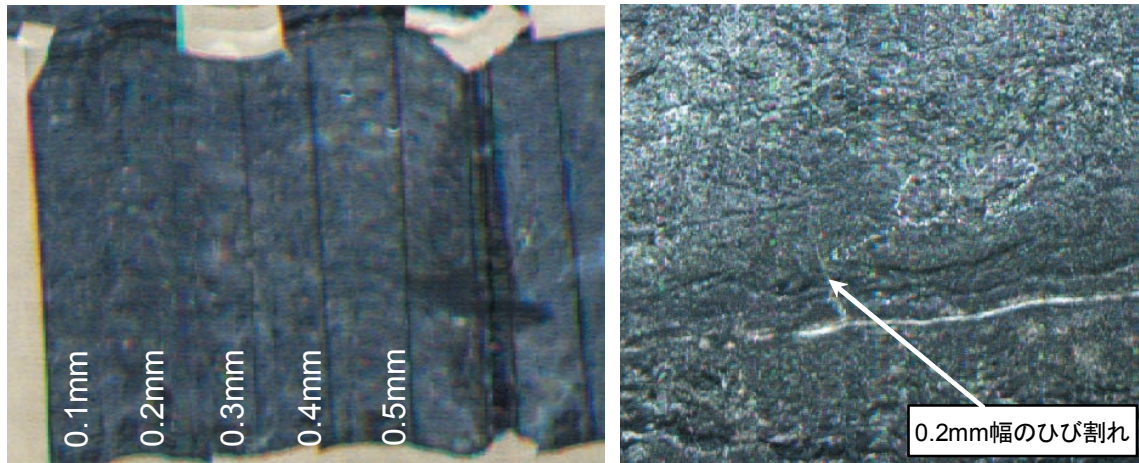


図-4 ひび割れ幅の検出精度（左；透明シート、右；洪水吐躯体）

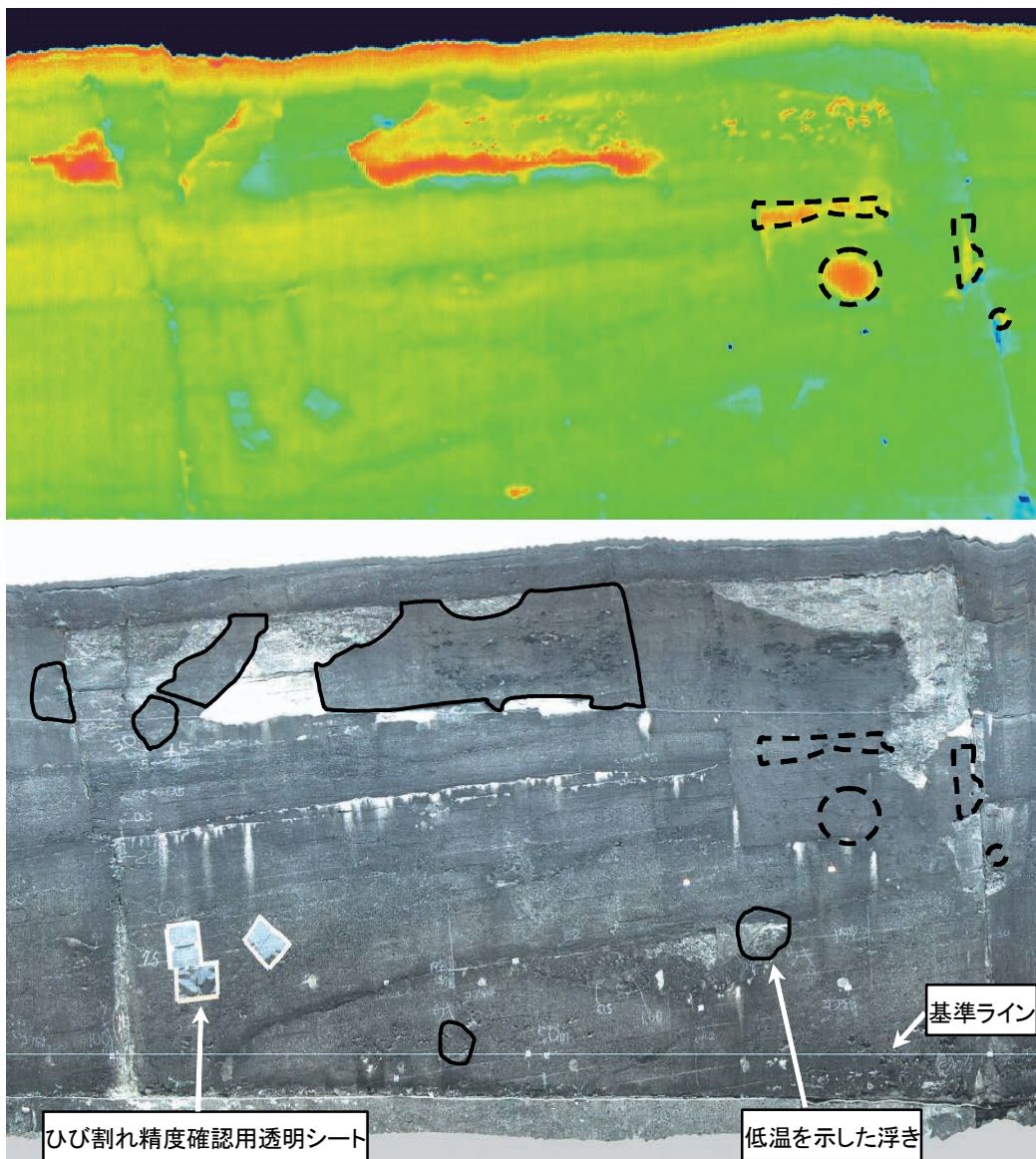


図-5 赤外線ラインスキャン画像および打音検査結果  
（上；赤外線ラインスキャン画像、下；CCD ラインカメラ画像＋打音検査による浮きの部分）

### (3) 赤外線ラインスキャンの精度

赤外線ラインスキャン画像と、打音検査により確認した浮きの部分との対応を図-5 に示す。測定は、日照により浮きの部分が高温になる午前から午後にかけて実施した。CCD ラインスキャン画像中に実線で囲んだ部分は、事前の打音検査で浮きを確認していた箇所である。破線で囲んだ部分は、事前の打音検査では把握しきれていなかったものの、赤外線ラインスキャンの結果で浮きがあると推測される箇所を示している。

赤外線ラインスキャンの結果、一部低温として認識された浮きも存在したが、おおむね浮きの部分で高温を示し、その位置は打音検査で確認された位置と一致した。また、今回得られた赤外線ライン画像と、この壁面を対象として1年前に実施したエリア方式による赤外線画像の結果と比較したところ、検出されている高温部の位置が一致していることが確認できた。以上の結果から、赤外線ラインスキャンシステムは、その性能を発揮できていることが検証された。

### (4) 実証試験の結果

今回開発した CCD ラインカメラ法および赤外線法による同時ライン計測システムの実証試験により、次のことが確認された。

- a) 計測速度を落とすことなく 0.2mm 幅のひび割れを識別するため、最大スキャン速度を 1,000 断面/s に高速化し、分解能を 1mm まで高めた。その結果、躯体に貼り付けた透明シートの撮影画像において、0.2mm 幅の黒線が確認可能な性能を有していることが実証された。また、得られた CCD ラインカメラの画像を拡大した結果、躯体に発生している 0.2mm 幅のひび割れが認識できることを確認した。
- b) CCD ラインカメラおよび赤外線装置を搭載した走行車に加速度センサーを設置し、カメラのぶれを計測するとともに、直線となる基準ラインを計測対象に設置して可視画像を記録した。これらの情報を活用してカメラのぶれ補正と基準ラインの直線化補正を行った結果、得られた CCD ラインカメラの連続壁面画像は、未補正の画像と比較するとぶれが改善された。
- c) 広範囲を非接触で概査できるという、エリア方式による赤外線サーモグラフィの利点をさらに高めるため、走行しながら赤外線画像が撮影できるようにライン計測システム化を行った結果、従来のエリア方式と同等の精度で効率的な赤外線ラインスキャンが可能となった。

## 5. 本システムの洪水吐調査への展開

農林水産省農村振興局で現在作成中の「長期供用ダム機能診断マニュアル（案）」によれば、二次調査の主な作業は、点検記録表への変状の有無の記入、変状箇所の記録（写真、スケッチ）、観測記録などのデータ検証など、現地における変状の有無の確認とその記録となっている<sup>8)</sup>。このうち、ダム洪水吐の点検項目として、クラック、漏水、洪水吐を構成する部材内部の損傷および部材表面の損傷が列記されている。

まず、クラックや漏水に関与する変状として、①表面に線状のクラック（0.2mm 以上）が確認される、②表面に亀甲状のクラックが確認される、③エフロレッセンス、遊離石灰が確認される、④クラック（または水平打継目）から漏水している箇所がある、⑤クラック（または水平打継目）からの漏水が貯水位と連動して増減している、⑥伸縮・収縮目地から漏水（湧水）が認められる、という 6 項目が設定されている。これら 6 項目は、すべて目視調査のみでも確認できる変状であるが、大規模な洪水吐を対象とした場合、0.2mm のクラックを目視だけで取りこぼしなく抽出することは難しい。また、遊離石灰やエフロレッセンス、漏水の程度などについても、「有無」の記載だけでは不十分であり、写真等によりその部位の状態を記録として残していく必要があると考える。

次に、部材内部の損傷として、①部材から鉄筋が露出している箇所がある、②部材表面に錆び汁の発生が確認される、③部材表面が膨張しているが挙げられている。さらに、部材表面の損傷として、①部材の表面が摩耗し、骨材が露出している部分がある、②部材の表面がはく離・はく落している、③側壁部にたわみ（天端継目のズレ、手すりの変形）が生じているが挙げられている。このうち、鉄筋露出、錆び汁、摩耗、はく落については、従来のような目視調査のみでも調査、記録が可能である。一方、部材表面の膨張、はく離の確認については、目視調査だけでは不十分であり、全面にわたる打音検査などが必要となる。

遊離石灰やエフロレッセンスの状態の記録、表面の膨張、はく離の確認に対して、今回実証試験を行った CCD ラインカメラによる連続壁面スキャンでは、0.2mm 程度以上のひび割れの分布に加え、遊離石灰や漏水箇所などの情報を連続的に画像として記録することができる。本システムを適用することにより、現在のところ定性的にしか判定できない項目（遊離石灰や摩耗の程度など）について、デジタル情報として記録に残すことができるため、今後これらのデータを蓄積することによって変状の進行性をモニタリングすることが可能になると考えられる。

また、大規模な洪水吐では、壁上部の打音検査には大がかりな仮設が必要となるなど、調査にかかる費用も大きくなる。このような場合、大規模な仮設を必要としない今回

使用した赤外線ラインスキャンニングなどによる概査によって、浮きなどの変状があると想定される領域を絞り込み、必要な分だけの打音検査を行うという効率的な調査が可能となる。

以上の観点から、開発した CCD および赤外線による同時ライン計測システムは、洪水吐の変状調査技術として有効であるといえる。しかし、劣化の進行速度や点検費用の最適化などを考慮すると、毎年の点検で実施する必要はないと考える。理想的には、①施工が完了し、受け渡しが完了した時点（初期データ）、②施工後 1～5 年経過の間、③5～10 年に 1 度の割合で定期的実施というような適用が実用的である。また、地震などによる突発的な外力が加わった場合には、直後の目視点検調査に加え、復旧工事の前に発生した変状をデジタル情報として記録することによって、再損傷の有無をモニタリングしていくための初期データを得ることができる。

## 6. おわりに

農業用水路の概査を目的として当初開発した CCD ラインカメラによる連続壁面スキャンニングシステムに、新たに赤外線ライン撮影装置を搭載し、可視画像と赤外線画像を同時にデジタル情報として記録できるシステムを構築した。本システムをダム洪水吐の調査手法として適用した結果、効率のかつ高精度での調査が可能であることが検証できた。今後は、赤外線画像のぶれ補正技術を開発してシステム改良するとともに、自動車などの高速移動体に本システムを搭載して、より効率的な計測技術を構築する予定である。

本システムは、広範囲を迅速に調査できる優位性を持つことから、図-6～9 に示す実用イメージのように、様々な長大な構造物への適用が可能である。



図-6 ロードヒーティングの効果の確認（道路）

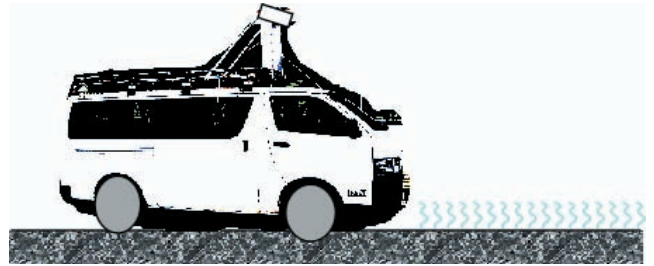


図-7 保水性舗装・排水性舗装・透水性舗装の効果の確認（道路）

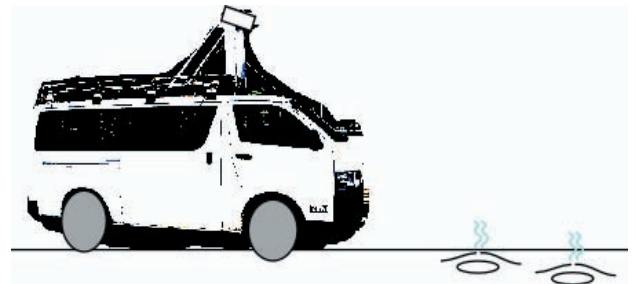


図-8 アスファルト舗装のブリスタリング、ポットホール、舗装背面の滞水箇所の抽出（道路）

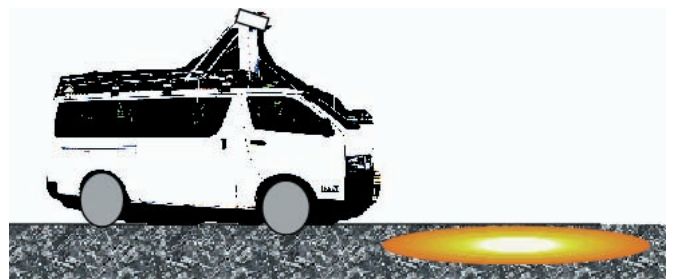


図-9 地下埋設物の発熱による地熱分布の把握

謝辞：本開発は、農林水産省農村振興局設計課の官民連携新技術開発研究「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」により実施したものである。また、現地調査にあたっては、関係者各位の多大なるご協力を頂いた。記してお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 森丈久：農業水利施設へのストックマネジメント導入に向けた取組み、農業土木学会誌、Vol.73、No.11、pp.3-6、2005
- 2) 吉田典明・長束勇・渡嘉敷勝・森充広・石神暁郎・齋藤豊・光保雄：農業用水路調査の新技术と現地適用性検討試験、農業土木学会大会講演要旨集、pp.250-251、2004
- 3) 森充広・増川晋・渡嘉敷勝・石神暁郎・吉田典明・藤原鉄朗：農業用水路維持管理のための機能診断システムの開発、第61回農業土木学会京都支部学会研究発表会講演要旨集、pp.4-5、2004
- 4) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針、2003
- 5) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術03、2003
- 6) 石神暁郎・森充広・渡嘉敷勝・増川晋：農業用水路コンクリートに生じる摩耗現象と促進試験方法に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、pp.805-810、2005
- 7) 森充広・藤原鉄朗・齋藤豊・渡嘉敷勝・増川晋：CCD ラインカメラおよび赤外線サーモグラフィ法による洪水吐コンクリートの変状調査、農業土木学会大会講演要旨集、pp.594-595、2005
- 8) 松田文秀・川中正光・瀬戸太郎：長期供用ダムの機能診断への取組について、材料施工研究部会会報、第43号、pp.61-75、2004