

## 第12回 構造物の診断における光学的全視野計測

講師：岡本 卓慈 \*1・ 羅 黄順 \*2・ 松田 浩 \*3

## 1. 光学的全視野計測の概要

光を用いた計測手法が近年急速に進歩しています。「光学的全視野計測」とは、土木技術者にとって耳慣れない言葉ですが、CCD カメラや赤外線を用いた計測などのように光の性質を利用して対象物の情報を2次元、3次元的に把握する計測手法です。光学的全視野計測は、計測対象物にセンサを取り付けて計測する方法などと比べると、

- ① 遠隔・非接触な計測が可能
- ② 多点の情報を短時間で取得可能
- ③ 計測結果を可視化情報で表示し、2次元、3次元的に把握することが可能

などの特長があります。つまり、安全で安価に高密度の情報が得られ、計測対象物の状態を分布図にして可視化したり、異常箇所的位置がどのあたりなのかを視認しやすい技術として今後発展すると予測されます。国土交通省の「道路構造物の今後の管理・更新のあり方に関する検討委員会の報告（平成15年）」では、維持管理を行う際に、赤外線、超音波、弾性波、レーザ、電磁波、磁気、光ファイバー、カメラなどが期待される診断技術として列挙されました。大半が光学的全視野計測技術で、構造物の表面や内部の情報を遠隔・非接触で効率的に計測し、さらに計測情報を記録、活用する方法として期待されています。

## 2. 光学的全視野計測の種類

光を波長で分類して図-1に示します。この中で人間の目に見える可視光はおよそ400 nm から800 nm の狭い範囲の領域です。光学的全視野計測機器では、可視光はもちろん電波のような長い波長のものから、赤外線、紫外線、X線、さらに短い波長であるガンマ線といった人間の目では捉えられないさまざまな波長の光を使用して計測を行います。現在、建設分野で使用されている主な光学的全視野計測機器を表-1に示します。計測する光は、自然光と一定周波数の光で位相を合わせたレーザ光を使用する場合があります。計測情報は、CCD カメラやフィルム、スキャナ装置などによって照射位置を同定して保存されますから、全視野計測が可能となります。

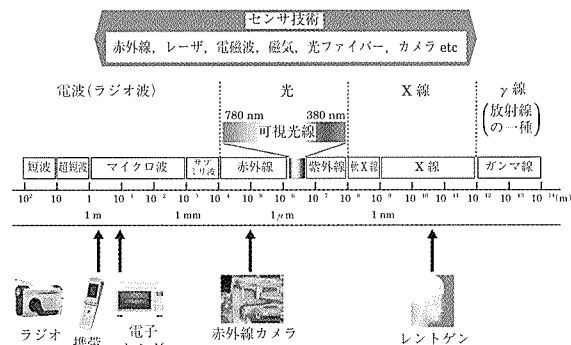


図-1 光の波長分類

表-1 光学的全視野計測法の分類

| 種 類            | 波長分類  | レーザ | スキャニング   | 非接触 |
|----------------|-------|-----|----------|-----|
| 3D スキャナ        | 可視・赤外 | ○   | 駆動装置     | ○   |
| LDV（レーザドプラ速度計） | 可視・赤外 | ○   | 駆動装置     | ○   |
| 光波測距機          | 赤外    | ○   | 駆動装置     | ○   |
| サーモグラフィ（赤外線）   | 赤外    | ×   | CCD      | ○   |
| 棒形スキャナ（ラインセンサ） | 可視    | ×   | 駆動装置     | ○   |
| CCD カメラ        | 可視    | ×   | CCD      | ○   |
| 衛星画像           | 多種    | ×   | CCD      | ○   |
| 電磁波探査          | 電磁波   | ×   | アンテナ     | ○   |
| モアレ            | 可視    | ○   | CCD      | ○   |
| スプレックル干渉       | 可視    | ○   | CCD      | ○   |
| X線撮影           | X線    | ×   | フィルム・カメラ | ○   |

## 3. 光学的全視野計測技術の紹介

## 3.1 CCD カメラ

CCD カメラは、コンクリート構造物の点検、調査で目視観察を行う際に、もっともポピュラーに使用されています。画像は、CCD カメラの撮像素子に記録されるデジタル情報によって構成されるので、コンクリートのひび割れを始め、劣化の状況を映像として記録するだけでなく、図-2にその例を示すように、専用の処理ソフトを使用して、レンズの収差を補正し、斜めから撮影した画像を正対画像に変換し、隣接する画像を合成するなどの手順によって、ひび割

\*1 Takuji OKAMOTO：（株）計測リサーチコンサルタント 代表取締役社長

\*2 Paul S. SUMITRO：SMART STRUCTURES PRESIDENT

\*3 Hiroshi MATSUDA：長崎大学 工学部 構造工学科 教授

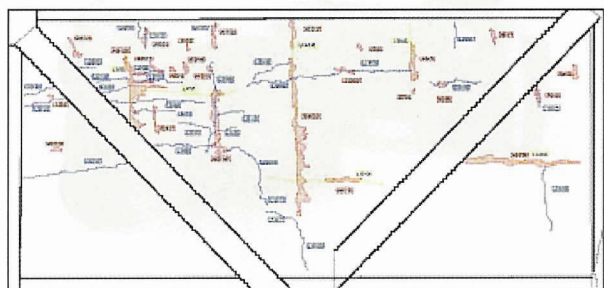
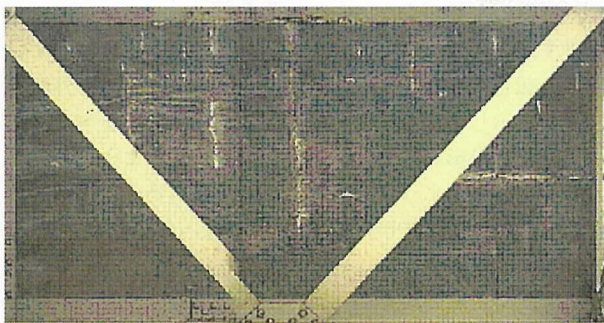


図-2 コンクリート床版の損傷スケッチ

れなどの劣化状況をトレースすることができます。さらに、ひび割れの長さや劣化箇所の面積の計算も行えます。CCDカメラの画素数が $1\,312 \times 1\,312$ 画素の場合でも、2.5 m角以下の画像においてデジタル分解能は2 mmですがコンピュータモニタ上では0.2 mmのひび割れを認識することが実験的にも検証されています<sup>1)</sup>。

撮影した画像やトレースしたコンクリート表面の劣化状況は、電子ファイル化して、以後の点検、調査結果と比較したり、補修、補強の設計に活用することも容易になります。

### 3.2 3D レーザスキャナ

図-3に3Dレーザスキャナで計測した橋梁の画像を示します。一見、デジタルカメラで撮影したように見える画像ですが、画像の一点一点は、3次元の座標情報をもっています。3Dレーザスキャナは、装置から照射するレーザ光を用いて計測対象点までの距離を測距し、同時に照射角度

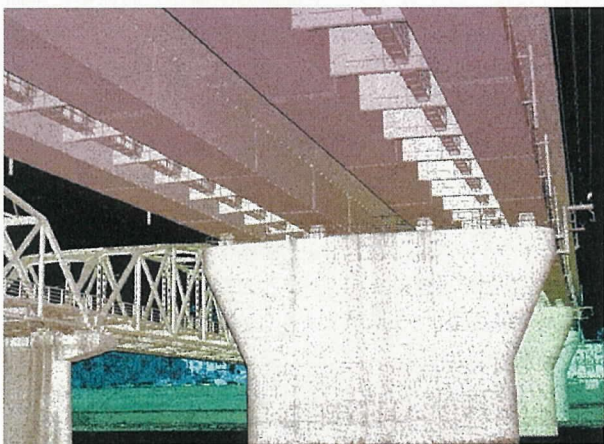


図-3 3Dレーザスキャナで撮影した点群データ

(水平、垂直)を制御しながら計測対象点の3次元の位置情報を取得します。図-4に示すように、この動作を1秒間に数千回から1万回以上繰り返しながら、構造物をスキャニングして計測箇所の3次元デジタル座標情報を短時間で得ることができます。構造物の全体を一度に照射できない場合は、計測位置を移動させながら計測範囲をラップさせて計測を行い、既知点を重ね合わせて対象物全体の計測画像を作成します<sup>2)</sup>。

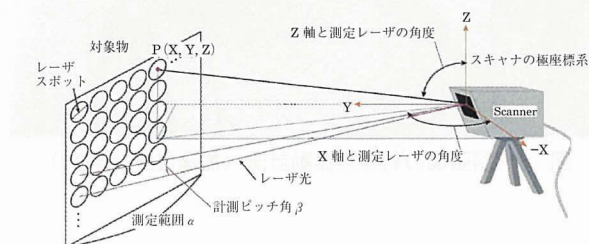


図-4 3Dレーザスキャナの撮影原理の例

計測対象物の点群データを取得すれば、任意の2点間距離や面積、体積などを計算したり、任意の断面図や任意の方向からの立体画像、アニメーション画像の作成も可能です。さらに、点群データを処理してCADデータに変換し、FEM解析用のメッシュデータを作成することによって、図-5にその例を示すように複雑な形状をしたコンクリート構造物の静的・動的な応答解析も行われています<sup>3)</sup>。

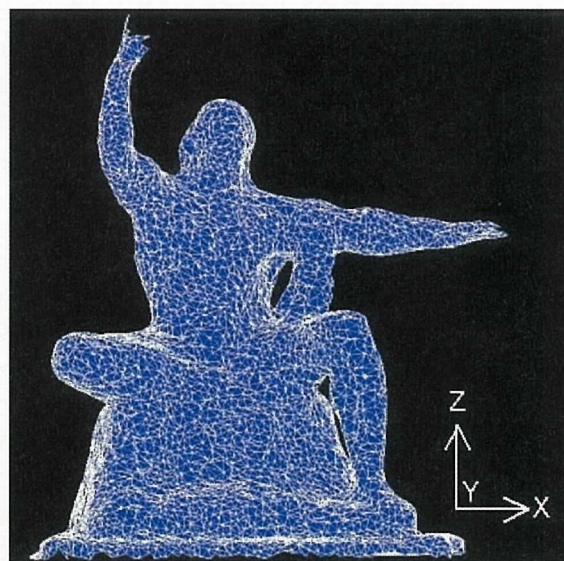


図-5 コンクリート構造物の動的応答解析例

### 3.3 レーザドップラ速度計 (以下, LDV)

LDVは、計測対象物にレーザ光を照射し、反射光のドップラ周波数シフトを利用してレーザビームの軸方向に生じる計測対象物の速度成分を測定する装置です。構造物やその部材の振動発生状況を遠隔・非接触で計測できます。図-6は、斜張橋の斜材の振動を加速度計とLDVで計測した状況です。両装置の計測結果を周波数分析し、図-7に比較して示しますが、加速度計とLDVから得られる卓越周

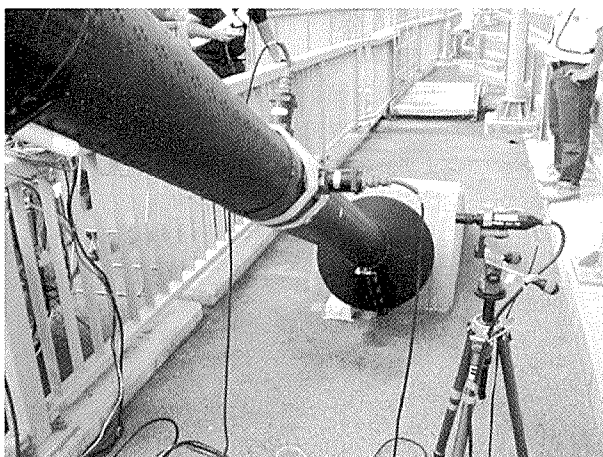


図-6 斜張橋の斜材の振動計測（加速度計とLDV）

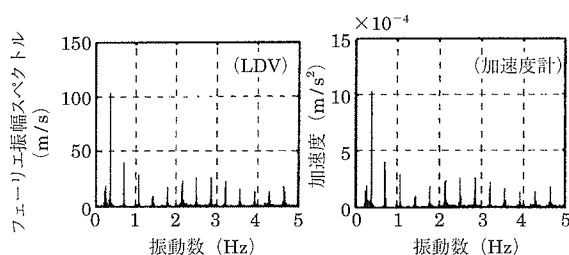


図-7 LDV と加速度計の周波数分析結果の比較

波数はよく一致しています。LDV を自動追尾型トータルステーションに搭載し、吊橋の主要箇所の変位を計測するとともに、複数のケーブルの位置を自動的に探索して、約 80 m 先にあるハンガーロープの固有振動数を遠隔・非接触で計測できることが実験的に検証されています<sup>4)</sup>。この方法を応用すれば、多数の計測点の変位と振動速度を 1 台のシステムで長期間モニタリングすることができます。

### 3.4 サーモグラフィ

計測対象物から放出される赤外線を計測して、対象物の表面温度分布を把握する装置がサーモグラフィです。健全なコンクリートの場合、表面温度の変化はコンクリート内部に伝達されるために緩やかに変化します。一方、コンクリートに浮きや内部に欠陥が存在すると、その部分で熱の伝達が阻害されるために、健全部に比べてコンクリート表面の温度変化は大きくなります。最近のサーモグラフィの温度分解能は 0.1℃ 以下で、コンクリートの温度分布に温度分解能以上の温度差が生じれば、原理的には欠陥箇所の検知が可能です。しかし、実際には計測対象物の色むらや形状、日射の条件などによって、コンクリート表面の温度分布は把握できても、欠陥箇所の有無は診断者の知識、経験によるところが大きいため注意が必要です。コンクリート表面に温度差を生じさせるには、熱源が必要ですが多くは日射、あるいは外気温の変化を用います。日射があたり温度変化の小さい場所ではヒーターなどの人工熱源を使用する場合があります。日射などの影響で健全部と欠陥部に温度差が出るのは常時ではありませんから、複数回撮影し明瞭な差が生じるのを確認するなどの工夫が必要です<sup>5)</sup>。ま

た、日射の影響が少ない床版裏面などでは、夜間に温度が降下する際のほうが、健全部と欠陥部との差が現れやすいという報告もあります<sup>6)</sup>。最近のサーモグラフィの外観を図-8に示しますが、コンパクト化が進んでいます。さらに、赤外線撮影と同時に、実像撮影も行えるようになっており、図-9のように、赤外線画像が構造物のどの位置に相当するかの認識やその表現が容易になっています。

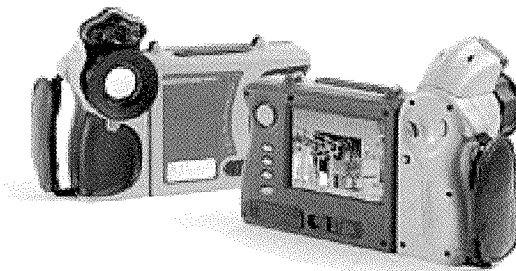


図-8 サーモグラフィの外観

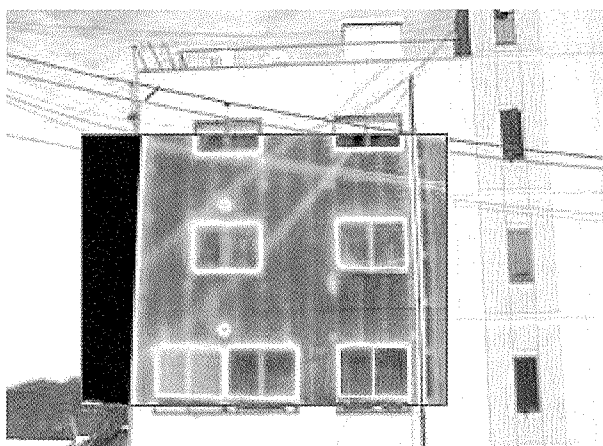


図-9 実像と合成したサーモグラフィ画像

### 3.5 棒形スキャナ

コンクリートのコアを採取して強度や中性化深さ、塩分含有量などを調べるのが一般に行われますが、コア採取を行うには、コアカッターや電源の準備などの作業に手間がかかるとともに、構造物への影響を配慮すると、多数のコアの採取は困難です。また、深い箇所まで削孔すると内部の鉄筋を切断するおそれもあります。このような問題を解決する方法として、直径 24 mm の孔を穿孔してコンクリート内部の状況を直接カメラで観察する、いわゆる微破壊調査があります。カメラを挿入して観察する際、カメラの方向やレンズのひずみなどで正射画像が得にくく、内部の状況を定量的に把握しづらいなどの問題が伴います。棒形スキャナは、図-10に示すように、装置に沿ってラインセンサを内蔵したもので、孔内に挿入し、装置を回転して内部の画像を記録するものです（図-11）。装置の回転と同時にエンコーダで回転角度を検出しながらラインデータを合成することによって、内部の正射画像を撮影、記録しま

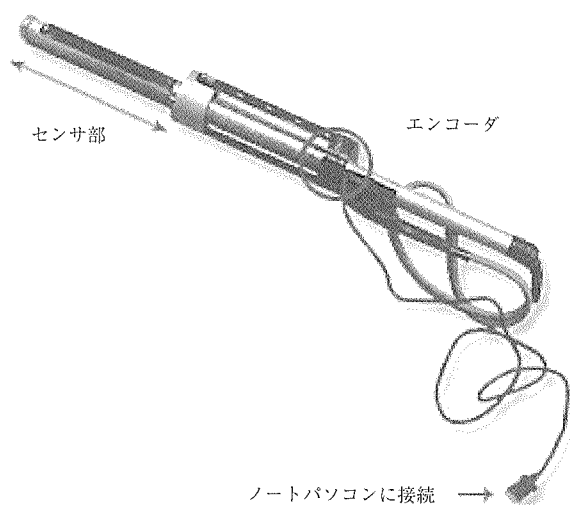


図 - 10 棒形スキャナの外觀

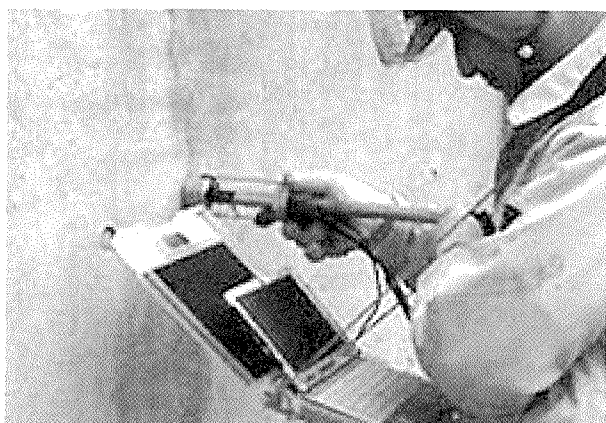


図 - 11 棒形スキャナによる撮影状況

す<sup>7)</sup>。図 - 12 に示すように、採取したコンクリートコアでは把握しにくい孔内のひび割れの幅や、鉄筋、骨材の状況が精密に確認できます。コンクリート表面に開口幅が既知のスリットを設けて、棒形スキャナで撮影した結果、図 - 13 に示すように棒形スキャナによる測定値は実測値とよく一致しています<sup>8)</sup>。

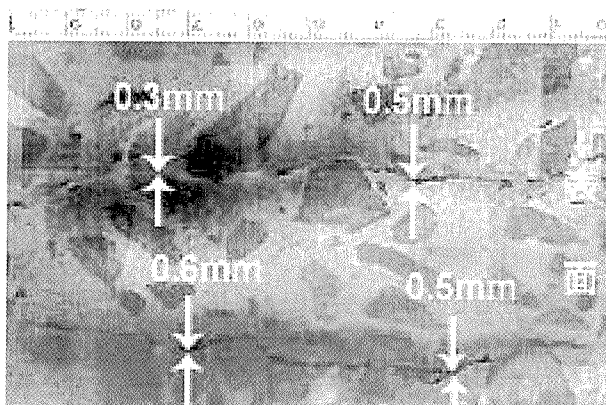


図 - 12 棒形スキャナによる撮影画像

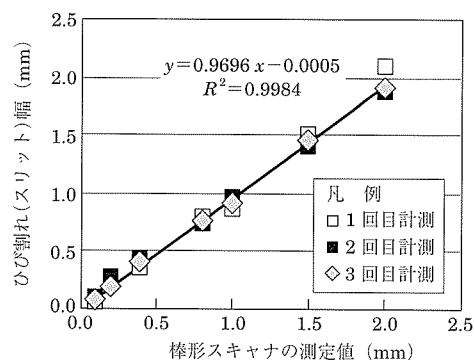


図 - 13 棒形スキャナによる測定値と実測値の比較

#### 4. 光学的全視野計測への期待

電磁波を使用してコンクリート内部の鉄筋探索に使用するレーダ法や X 線を使用してコンクリート内部の状況を調査する X 線透過法なども一般に実用化されている光学的全視野計測ですが、すでに本講座で取り扱っているため<sup>9)</sup> 割愛いたします。

構造物の状態を遠隔・非接触で、かつ 2 次元、3 次元の可視化情報として把握する技術は、省力化、低価格化を実現しながら大いに進歩しています。そして、人間の観察力、センサによる計測などない特徴をもち、条件によってはその欠点をうまく補完する効果をもっています。

構造物の状態を把握し、評価するには、多岐にわたった項目が計測対象となります。「変位を 100 m の距離から 0.1 mm の精度で計測したい」「ひずみを 1 マイクロの分解能で計測したい」という建設分野の要求性能は、他産業における計測と比較しても必ずしも簡単なものではありません。さらに、現場における温度や日射、大気の変化、加えて降雨、落雷などの厳しい自然環境の影響を除去しながら、信頼性の高い情報を得なければなりません。紙面でご紹介した技術は、今のところかぎられた適応範囲に対して有効な光学的全視野計測の手法ともいえますが、光学のセンサ技術やデータ処理ソフトが日進月歩で進む現代こそ、光学的全視野計測の適応範囲の拡大、性能の向上が期待できるのではないのでしょうか。

#### 参考文献

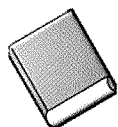
- 1) 小出他：デジタルスチル画像によるコンクリート床版ひび割れ認識の研究，土木学会第 54 回年次学術講演会，pp.454，1999
- 2) ㈱ 計測リサーチコンサルタント，3D レーザ計測の建築リニューアル工事への応用展開，Web レポート No.19，2004.10
- 3) 鶴田 聡，松田 浩，山下 務，出水 享：歴史的構造物の三次元形状計測とその地震応答解析への利用に関する研究，建築土木における歴史的構造物の診断・修復に関するシンポジウム，pp.113-120，2006.6
- 4) 久保田慶太，宮下 剛，Jaime Hernández Jr，藤野陽三，宮本則幸：レーザドップラーとトータルステーションを用いた非接触かつ遠隔的なケーブル計測システムの開発，土木学会第 61 回年次学術講演会，pp.509-510，2006.9
- 5) 魚本健人，加藤佳孝：コンクリート構造物の検査・診断－非破壊検査ガイドブック，pp.156，2003

- 6) 浅利公博, 吉岡良平, 後藤恵之輔, 渡邊浩平: 熱赤外影像法を用いた自然環境化における道路橋変状調査手法の研究, 土木構造・材料論文集, 第21号, pp.35-42, 2005.12
- 7) (株) 計測リサーチコンサルタント, コンクリート構造物の微破壊試験, Web レポート No.37, 2006.4
- 8) 出水 享, 伊藤幸広, 肥田研一: 小径ドリル孔を利用した棒形スキ

ャナによるコンクリート構造物の内部検査, 土木学会第61回年次学術講演会, pp.1107-1108, 2006.9

- 9) 松井義昌: 第8回 鉄筋・かぶり厚さ・埋設物, プレストレストコンクリート, Vol.48 No.2, pp.97-101, 2006.3

【2006年11月20日受付】



新刊図書案内

## National Report

— The Second *fib* Congress 2006 —  
— Naples ITALY (英・和文併記) —  
2006年5月

頒布価格: 会員特価 6 000 円 (送料 500 円)

: 非会員価格 7 200 円 (送料 500 円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会