

赤外線サーモグラフィ法はコンクリート構造物の浮き・剥離を検出するのに有効な手法であるが、調査品質を確保するには高価な冷却型高性能カメラを使用し、熱反射の影響が少ない夜間に調査を実施する必要があった。本レポートでは、低感度のためこれまで使用できなかった非冷却汎用型赤外線カメラの感度改善手法と、熱反射の影響除去手法について検討し、昼間の調査に使用できる偏光赤外線カメラシステムを提案する。

## 赤外線調査の効率化に向けた 偏光熱画像取得技術の開発

山下 民岐子\*  
川西 弘一\*\*

### はじめに

西日本高速道路(株)四国支社管内では、コンクリート構造物の第三者被害想定範囲における変状のスクリーニングに赤外線調査支援システムを導入している。この調査支援システムは国土交通省やNEXCO3社による委員会にて検出精度100%（見逃しなし）という検証結果<sup>(1),(2)</sup>を得ており、打音検査を省略できる点検支援技術として普及段階にある。しかし、現行の調査支援システムの課題として、使用する高性能赤外線カメラが高価でシステムの導入コストが高いこと、調査が夜間に限定されるため体制構築に苦慮していることが挙げられる。

本報告は、安価な非冷却汎用型赤外線カメラの感度改善手法と、夜間での調査を余儀なくされていた原因である調査箇所周辺の熱反射の影響除去手法について検討し、昼間の調査に使用できる赤外線カメラシステムを提案するものである。

\* 西日本高速道路エンジニアリング四国(株)技術本部技術部統計分析課 課長代理  
\*\* 西日本高速道路エンジニアリング四国(株)技術本部技術部技術開発課 課長代理

### 1. 赤外線調査支援システムの課題

#### (1) 高価な冷却型赤外線カメラ

赤外線サーモグラフィ法（以下「赤外線法」という）では、コンクリート内部の変状に起因して発生する表面の温度差により変状を検出する。橋梁の場合、表面に発生する温度差は0.1℃程度とわずかであり、外壁診断などに用いられる非冷却汎用カメラでは、感度が低くノイズも多いため、変状を検出できない。そこで、調査支援システムでは高価な冷却型高性能カメラを採用している。

このカメラは、センサにインジウムアンチモン<sup>(3)</sup> (InSb)を材料とする光起電力素子を用いており、クーラーで-200℃程度まで冷却することで、電気的なノイズを除

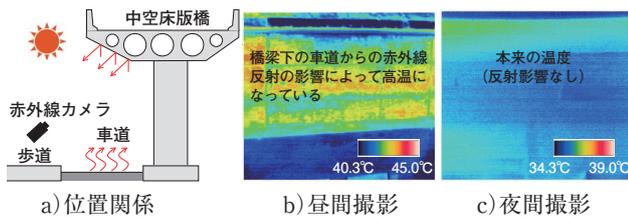
表一 赤外線カメラ

項目	冷却型高性能カメラ	非冷却汎用カメラ
検出波長	3～5 μm	8～14 μm
サイズ	216 mm×109 mm×102 mm	52 mm×49 mm×38 mm
重量	2.30kg	0.12kg
最小温度分解能	0.025℃	0.040℃
価格	約1000万円	約130万円
写真		

去して赤外線を検出する。光が当たると半導体間に発生する電子の移動を電流として検出することで、直接赤外線を検出するため高性能であるが、検出素子や冷却構造が複雑なため躯体が大きく重く、高価となっている（表一1）。

## (2) 調査箇所周辺の熱環境の影響

図一1に非冷却汎用カメラで撮影した際の熱反射事例を示す。橋梁下の並行道路の舗装が太陽光で暖められ、放出する赤外線が橋梁張出部に反射する場合（図一1 a）、昼間撮影では、熱反射により構造物本来の温度よりも高温で測定されており、温度ムラが多く変状を検出できない（図一1 b）。同一箇所の夜間撮影では、舗装温度低下により熱反射がなくなり、構造物本来の温度が検出できている（図一1 c）。このように昼間の赤外線法では、熱反射を如何にして除去するかが大きな課題であった。



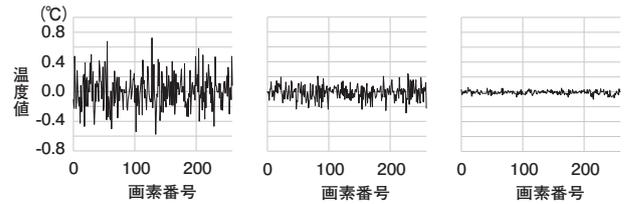
図一1 熱反射の事例

## 2. 課題解決手法の検討

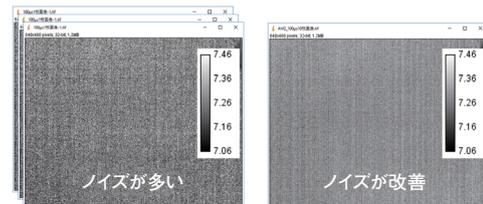
### (1) 非冷却汎用カメラの精度改善

本検討では、メーカーが提供する評価用ソフトウェアで、露光時間などを自由に変更して評価できる非冷却汎用カメラを使用した。図一2に均一温度物体の計測プロファイルを示す。熱画像の検証領域に該当する画素番号を横軸、温度値を縦軸に示している。

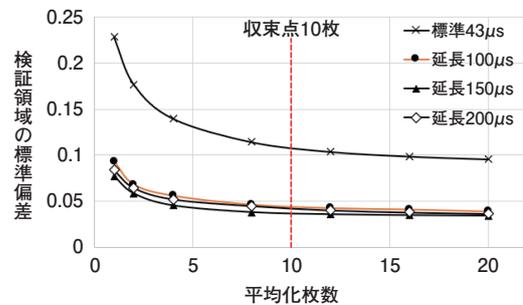
非冷却汎用カメラの標準露光時間による温度の計測結果は、冷却型高性能カメラと比較してバラツキが非常に大きい。評価用ソフトを用いて露光時間を延長すると改善するが、冷却型高性能カメラと同程度まで改善することはできない。そこで、画像を複数枚撮影し、露光時間ごとに複数枚画像の同一画素を平均値に置き換えた平均化画像を作成して精度改善を図った（図一3）。図一4は平均化枚数ごとに検証領域の標準偏差



図一2 同一箇所での温度比較



図一3 平均化画像イメージ



図一4 平均化による精度改善

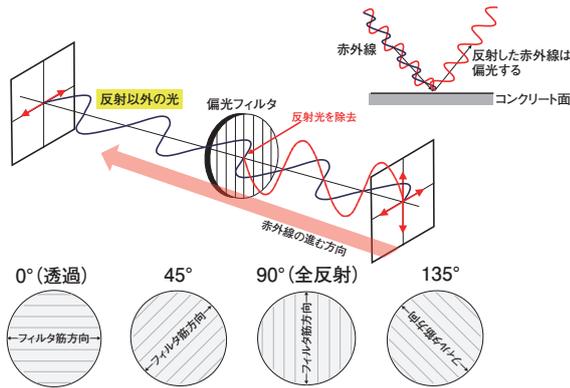
を比較した結果である。平均化枚数が増えると標準偏差が小さくなるが、約10枚で収束し、それ以上は精度改善効果が小さい。また、露光時間の違いによる領域の標準偏差は100～200μsの間で大差がなく、100μsの10枚平均化により、高性能カメラと同等程度の熱画像を得られることを確認した。

### (2) 偏光フィルタによる熱反射除去

筆者らは、可視光における水面反射の除去に用いられる偏光フィルタを、熱反射の除去に応用することを



写真一1 水面反射の除去例

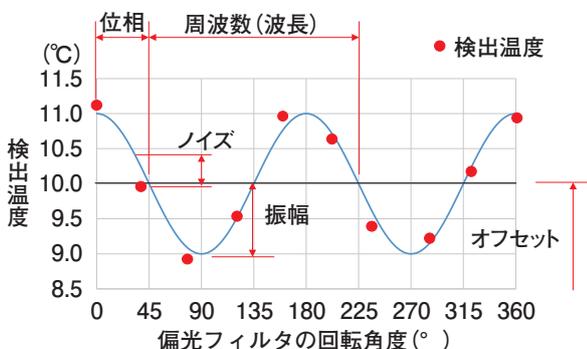


図一五 偏光フィルタの効果

検討した。写真一1は可視光における水面の反射を、偏光フィルタにより除去した事例である。フィルタなし(写真一1a)では水面に空が反射して水中が見えないが、フィルタあり(写真一1b)では反射除去により水中の魚を確認できる。

図一5のとおり、表面から放出される赤外線はあらゆる方向に振動しているが、熱反射は振動方向が反射面と平行な1方向に揃う偏光が発生する。赤外域の偏光フィルタには細かな金属ワイヤの筋が配置されており、筋の向きを熱反射の振動方向と平行にすれば、熱反射だけを選択的に除去できる。

図一5のような、縦方向振幅に限定した反射除去であれば、偏光フィルタの角度を手動で調整することで除去が可能であるが、実際にはコンクリート表面は平滑な1面ではなく、さまざまな方向の熱反射がある。多方向からの熱反射を除去するには、偏光フィルタを回転しながら熱画像を連続撮影する必要がある。偏光の強度は偏光フィルタの回転角度によって変化する特性<sup>(4)</sup>があり、撮影された熱画像の検出温度は図一6のよう



検出温度:  $Y_n = A \sin(\delta + \theta \times n) + B$   
 $\delta$ : 位相差  $n$ : 周波数  $A$ : 振幅  $B$ : オフセット

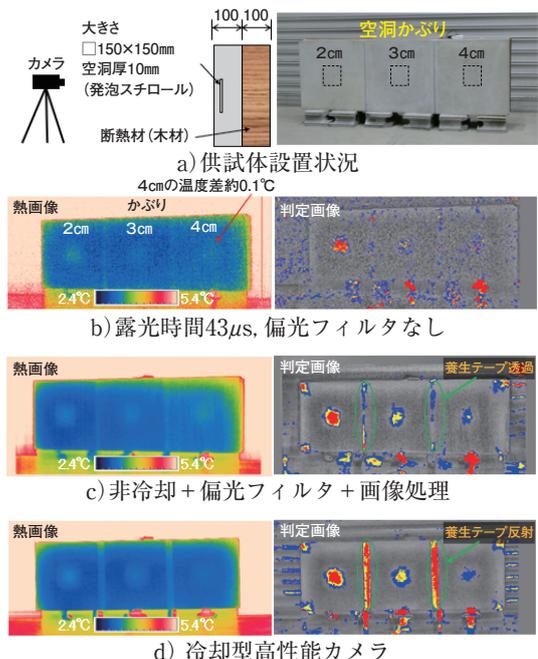
図一六 偏光の特性

に正弦波に近似する。この原理を利用して波形における最も小さい温度、すなわち図一6のオフセットから振幅を差分した温度を、画素ごとに検出することであらゆる方向の熱反射が除去できることを確認した。また、この手法は複数枚による平均化処理と同じ効果が得られノイズ除去にも有効であった。

### 3. 冷却型高性能カメラとの性能比較

図一7に従来の冷却型高性能カメラと、開発した非冷却汎用カメラで2~4cm奥に疑似変状を設けたコンクリート供試体を撮影した結果を示す。図中左側は熱画像、右側は変状部を強調処理して3段階に自動判定した判定画像である。非冷却カメラの標準露光時間(図一7b)では、ノイズが多く、熱画像で、かぶり2cmの変状は確認できない。また判定画像では、ノイズが多く変状判別を行うことができなかった。非冷却カメラに前述の画像処理を行うと(図一7c)、ノイズが大幅に低減され、判定画像では、冷却型高性能カメラ(図一7d)と同等の結果となった。また、検出波長特性から、冷却型高性能カメラでは養生テープが反射として映り込んでいるが、非冷却カメラでは、透過して背後のコンクリート温度を検出できる。

このように、偏光フィルタによる熱反射除去と画像処理を行えば、非冷却汎用型の安価なカメラであって



図一七 画像による比較結果

も、冷却型高性能カメラとほぼ同等か、それ以上の検出性能を確保できることが確認できた。

#### 4. 実橋での従来手法との比較検証

昼間・夜間それぞれのケースで偏光フィルタなし、偏光フィルタありの違いを検証した。検証には2台の冷却型高性能カメラを用いた。偏光フィルタなしカメラと偏光フィルタありカメラでRC橋50径間の同時撮影を実施した。撮影条件は、昼間・夜間ともに、健全部と疑似変状部の温度差が0.2℃以上発生する時間帯とした。本検証で撮影した代表熱画像を図-8に示す。壁高欄の昼撮影画像で、偏光フィルタなし(図-8a)では、空からの熱反射(天空反射)が見られるが、偏光フィルタあり(図-8b)では、熱反射を除去できている状況が確認された。

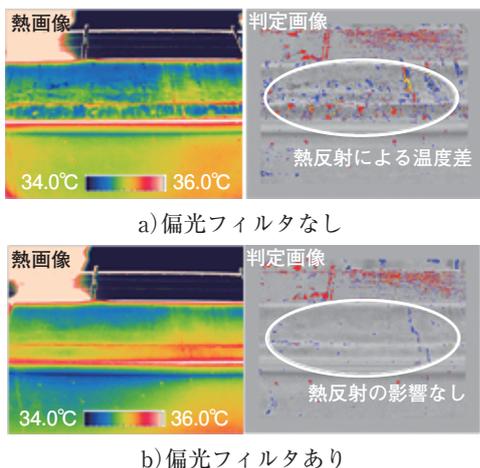


図-8 熱反射除去例(壁高欄 昼撮影)

#### 5. 本技術の実用化に向けた取組み

最後に、本検討技術を採用した偏光フィルタビルトイン赤外線カメラ(以下「開発カメラ」という)の開発について報告する。この開発カメラは、非冷却汎用カメラを採用しており冷却型高性能カメラよりも躯体が小さく軽く安価なため、点検コストの縮減に寄与できる。前述のとおり簡単に昼間熱画像が取得できるため、可視画像を同時かつ同画角で撮影できる仕様とした。

従来の赤外線調査では、可視画像と熱画像を別々に撮影していたが、開発カメラでは、1回の撮影で同時取得が可能となる。これにより、点検作業のさらなる効率化が期待できる。開発カメラの外観図を図-9に

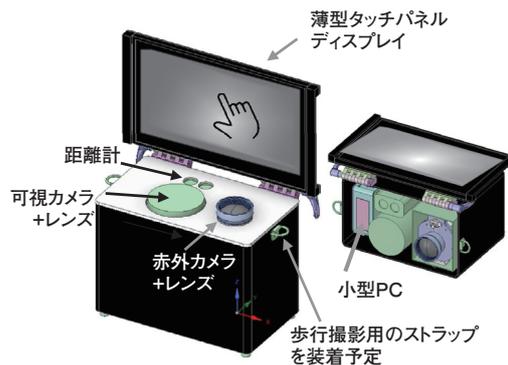


図-9 歩行撮影システム

示す。撮影ユニット内には、偏光フィルタ内蔵赤外線カメラ、可視カメラ、小型PC、距離計がコンパクトに収納されており、薄型タッチパネルディスプレイを一体化させることで、小型で操作しやすい構成とした。

この開発カメラの重量は、バッテリーを除くと5.0kg程度となる。従来システムと同様に、歩行程度の撮影速度で調査できる。また、立入困難箇所における点検支援システムとして、UAV(無人航空機)搭載タイプについても開発を進めている。

#### おわりに

本検討により、非冷却汎用型赤外線カメラで、冷却型高性能赤外線カメラと同等程度の感度を確保しながら、熱反射を除去する手法を確立した。今後、本手法による新システムを導入するため、調査方法の確立とマニュアル化を進めている。これにより、赤外線調査支援システムの調査精度の向上と、昼間を含めた調査が可能となり、点検コストの縮減等に貢献できると考えている。

#### 参考文献

- [1] 「次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会橋梁維持管理部会」における「コンクリート構造物のうき・剥離を検出可能な非破壊検査技術の評価」. [https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/sosei\\_constplan\\_tk\\_000028.html](https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/sosei_constplan_tk_000028.html), (閲覧 2023-10-10).
- [2] 西日本高速道路. 点検の高度化に向けた検討委員会報告書. 2020. pp.56.
- [3] 林詳悟, 橋本和明, 明石行雄. 赤外線サーモグラフィ法における検出精度向上のための検討. コンクリート工学年次論文集, Vol.34, pp.1696-1701, 2012.
- [4] 中村嘉朗, 富永昌治. 物体の偏光特性の解析と応用. 信学技報. Vol.105, no.674, PRMU2005-294, pp.227-232, 2006.