

## 報告

## 車載式赤外線調査による床版変状把握技術の精度向上に向けた取り組み

松井俊吾\*, 岡崎風時\*\*, 仲田憲正\*\*\*

\*西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社 構造技術部 (〒567-0032 大阪府茨木市西駅前町 5-4 7F)

\*\* 西日本高速道路株式会社 技術環境部 技術統括課 (〒530-0003 大阪府大阪市北区堂島 1-6-20 堂島アバンザ 18F)

\*\*\*NEXCO イノベーションズ株式会社 (〒532-0002 大阪府大阪市淀川区東三国 5-5-28)

西日本高速道路グループでは、舗装面から車載式で橋梁床版上面の変状を把握する手法として、赤外線サーモグラフィーを活用した調査技術を開発し、適用を検討している。本調査技術は、過去の検証の結果、画像端部や自車のタイヤ熱による精度低下が確認されている。そのため、調査技術の精度向上および技術確立を目指し、R2～R5年にかけて調査技術の改良を行っている。本稿では、これまでの取り組みと今後の方針について報告する。

キーワード：赤外線サーモグラフィー、橋梁床版、車載式

## 1. はじめに

橋梁床版上面の変状は、橋梁の健全性だけでなく、ポットホール等の発生により道路の使用性能に影響を与える。この変状は、舗装が敷設されているため、上面からは視認できず、床版上面側の健全性の確認は非常に難しい。また、補修は、舗装改良工事で実施されるが、補修前に数量把握ができないため、舗装切削後に打音点検等で把握することとなる。特に、工事に時間制約のある高速道路や重交通路線では、舗装切削後に補修数量を把握しては、材料の手配や作業人工等の確保を早急に対応しなければならず、工程調整が困難となる。

このような課題を解決するため、西日本高速道路グループでは、舗装上面から橋梁床版上面の変状を把握する手法として、車載式赤外線サーモグラフィーによる調査技術(以下、車載式赤外線調査)を平成28年度に開発し、適用について検討してきている。車載式赤外線調査の精度は、これまで80%程度の検出精度が確認されていたが、R1年度に実施した検証において調査時の環境条件によっては精度低下が生じることが確認された。そのため、車載式赤外線調査の精度向上および調査技術の確立を目指し、R2年度より車載式赤外線調査の精度向上に向けた取り組みを実施してきている。本項では、車載式赤外線調査技術の概要とR3年度までの取り組みの結果について報告する。

## 2. 車載式赤外線調査技術の概要

車載式赤外線調査は、写真-1に示すような計測車両



写真-1 調査車両外観

表-1 調査の計測条件

車載式赤外線調査 環境条件	
・	天候が雨天でないこと
・	調査(撮影)対象部位が湿潤状態でないこと
・	舗装表面最高温度が40℃以上であること
・	気温日較差が7℃以上であること
・	湿度50%以下が望ましい

車載式赤外線調査 測定時間条件		
表層種別	舗装最高温度	計測時間
高機能	40℃	日没後9時間後～日の出
	50℃	日没後7時間後～日の出
	60℃	日没後7時間後～日の出
密粒	40℃	日没後8時間後～日の出
	50℃	日没後5時間後～日の出
	60℃	日没後5時間後～日の出

の後部に車線全幅(約3.5m)が撮影できるように赤外線サーモグラフィーを設置し、高速走行(80km/h)により赤外線画像を取得して計測を行う。撮影された画像はあおりや収差等を補正した後につなぎ合わせて展開図を作成し、温度変状部から床版変状を推定し、調査結果とする。また、赤外線サーモグラフィーを活用した調査のため、調査の実施に当たっては、表-1に示したような計測条件を満たす必要がある(計測条件により夜間調査)。なお、この計測条件は、過去の検証の熱解析の結果から、変状部に0.2℃以上の温度差が発生する条件となっている。

## 2. 1 車載式赤外線調査技術の概要

開発した車載式赤外線調査技術の特徴を以下に示す。(特許第 6659929 号)

### 【車載式赤外線調査技術の特徴】

(1) 非接触速度計を利用した撮影および展開図作成

フレームレートを一定にした撮影では、撮影時の走行速度が一定ではないため、フレーム間距離が異なり、正確な展開図を作成することが難しい。そこで、本技術では、非接触速度計の信号を利用し、フレーム間距離が一定になるように撮影をおこなっている。具体的には、図-2 に示すように 10mm で 1 パルスの非接触速度計を赤外線サーモグラフィに同期させ、100mm 進む毎に撮影するように設定している。これによりフレーム間距離が一定となり、図-3 に示すような走行速度の影響を受けない正確な展開図の作成が可能となった。なお、路面撮影用のラインセンサカメラとも連動しており、赤外線画像と同時に路面画像の撮影も実施することができる。

(2) 画像補正

車載式赤外線調査の撮影は、車線全幅員を撮影できるように広角レンズを使用して撮影を実施している。広角レンズの歪を除去するために画像補正を行っているが、可視画像用のチャート板による補正では撮影画像がぼやけてしまい、正確に交点を指定できず、正確な補正が難しい。そのため、本技術では、赤外線用チャート板(黒:断熱塗料, 白:アルミテープ)を作成し、画像補正を実施している。これにより、図-4 に示すように赤外線画像でもチャート板の交点が明確になり、正確な画像補正を実施することができる。

(3) パーシャルスキャン

車載式赤外線調査は、図-5 に示すように撮影領域をフルスケールの撮像範囲(H:640pix×V:512pix)から、撮影用に調整した撮像範囲(H:640pix×V:150pix)でパーシャルスキャンにより撮影を行っている。これにより、処理するデータ量が小さくなり、フレームレートが向上(最大 325fps)し、高速走行での撮影(最大 100km/h)が可能となった。また、画像のあおり補正(赤外線サーモグラフィを 45°で取り付けられているため)を実施する際、図-6 に示すようにフルサイズと比較して変形量が小さいため画像の解像度の低下を少なくできる。

(4) スタッキングによる画像の高精細化

赤外線画像は可視画像と比較して画像の特徴が乏しく、変状箇所の特定が難しい。そこで、スタッキング(画像の重ね合わせ)により、情報量を増やし、画像のノイズを除去することで赤外線画像の画質改善を行っている。スタッキングは、画像 1 枚の進行方向の長さが約 1,000mm であり、100mm 毎に撮影しているため、10 枚の画像を重ね合わせている。スタッキングによってノイズが除去(プロファイルの凹凸部)され、温度変化部が視認しやすくなっており、赤外線画像の画質を改善されていることが確認できる(表-2 の比較表参照)。

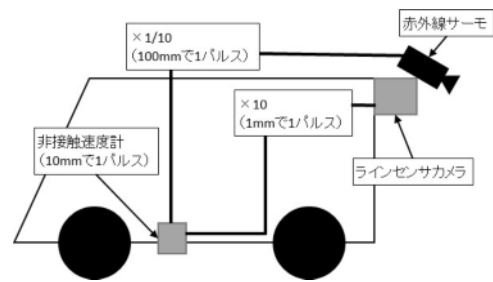


図-2 非接触速度計との同期システム概念図

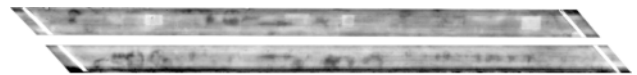


図-3 車載式赤外線調査の展開図

	可視画像用	赤外線画像用
可視画像		
赤外線画像		

図-4 チャート板撮影画像

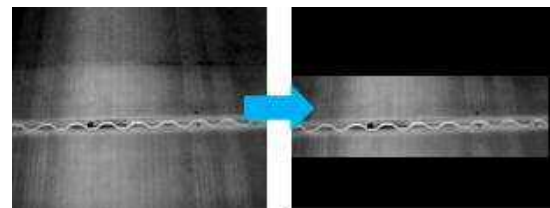


図-5 パーシャルスキャンによる撮影画像



図-6 あおり補正の変形量の差

表-2 スタッキング処理の効果

	静止画試験		動画画試験	
	スタッキングなし	スタッキングあり	スタッキングなし	スタッキングあり
赤外線画像				
プロファイル				

## 2. 2 車載式赤外線調査の精度

これまでに実施してきた車載式赤外線調査における検出精度の精度検証結果一覧を表-3、精度検証における赤外線の開像画像の例を図-7に示す。

車載式赤外線調査による検出精度は、床版の打音調査で確認した変状面積を正解とし、車載式赤外線調査で抽出された変状面積を比較して検出率を算出している。

H27年度およびH29年度における検出精度は80%以上確保できていたが、R1年度の精度検証において、過年度と比較して50%程度と低い検出率が確認された。

検出率が低下した原因を確認するために、打音調査と赤外線調査の結果の画像を目視で比較すると、タイヤ位置や画像端部（車線の端部）の検出率に低い傾向が確認された。そのため、画像位置を中央部、タイヤ位置、端部に分類し、画像位置別の検出率を確認した。その結果、中央部においては、検出精度を80%程度確保できているものの、タイヤ位置および端部では、検出率が低下していることが確認された（表-4参照）。

## 3. 精度向上に向けた取り組み

前述したように部分的な精度低下が確認されたため、R2年度より以下に示すような車載式赤外線調査の精度向上に向けた取り組みを実施している。これまでに取り組んだ内容および結果について以下に示す。

### 3. 1 精度向上の取り組み内容

#### (1) 精度低下の実態把握

精度低下が懸念された画像端部およびタイヤ位置における精度低下の実態を把握した。実態把握は、画像端部については、広角レンズを使用しているため、広角レンズによる周辺減光やレンズ歪の影響を確認し、タイヤ位置については、車両後方に赤外線サーモグラフィーを設置しているため、自社のタイヤ摩擦熱の影響について確認を行なった。また、調査時の計測条件の違いから精度低下が生じている可能性も懸念されたため、計測時の調査条件を再度整理した。

#### (2) 車載式赤外線調査の仕様検討

精度低下の実態把握の検証結果より、撮影条件（車線幅 3.5m の撮影）を満たす最適な車載式赤外線調査の仕様（設置角度、使用レンズ、設置高さ等）を検討した。

### 3. 2. 精度向上の取り組み結果

#### (1) 精度低下の実態把握

##### 1) 画像位置における精度実態

端部と中央部の精度実態を確認するために、温度設定により、温度が既知となる供試体（3.5mのシリコンヒーターおよび黒体炉、図-8参照）を撮影し、画像中央部から端部にかけての計測温度と設定温度を比較して画像位置における精度検証を行った。設定温度は、

車載式赤外線調査の計測時の舗装温度となる 20～30℃の範囲で 5℃毎に設定した。計測結果の一部を図-9に示す。検証の結果、どの設定温度（20～30℃）においても画像の中央より約 1,000 mmを超えると設定温度よりも低い温度が確認され、精度低下が生じていることが確認された。使用している広角レンズの周辺減光や撮影角度による赤外線の放射率低下が精度低下の要因と推測され、この精度低下の影響を小さくするために、撮影範囲の縮小（精度低下範囲を使用しない）や複数台での撮影を検討することとなった。

表-3 精度検証結果一覧

実施年度		H27年度	H29年度	R1年度
調査面積(m <sup>2</sup> )		465	831	1,666
変状面積	【A】車載式赤外線調査(m <sup>2</sup> )	156	329	185
	【B】打音調査(m <sup>2</sup> )	149	284	412
検出率(%)※		95%	84%	45%

※検出率は、打音調査による変状面積を正解とし、以下の式により算出した。  
 検出率(%) =  $\frac{|1 - \frac{【A】 - 【B】}{【B】}|}{1} \times 100$

#### H27年度精度検証画像



青線：打音結果、赤塗：赤外線結果

図-7 精度検証画像

表-4 画像位置別の精度検証結果

画像位置		中央部	タイヤ位置	端部
調査面積(m <sup>2</sup> )		714	476	476
変状面積	車載式赤外線調査(m <sup>2</sup> )	149	20	15
	打音調査(m <sup>2</sup> )	196	108	108
検出率(%)※		76%	19%	14%

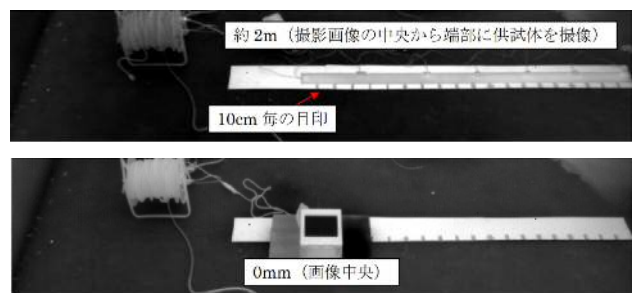


図-8 供試体撮影状況

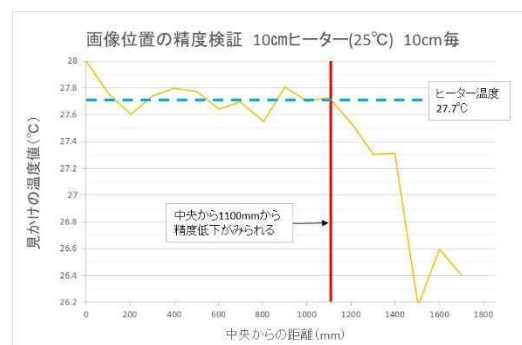


図-9 画像位置における精度実態

## 2) タイヤ位置における精度実態

タイヤ位置の精度実態は、図-10 に示すように路面画像を赤外線サーモグラフィで撮影し、タイヤ摩擦熱の発生状況について確認した。なお、車種毎にタイヤ熱の発生状況が異なったため、車種を分類(普通車, 中型車, 大型車, トレーラー)してタイヤ摩擦熱の発生状況を整理した。

検証の結果を図-11 に示す。その結果、車種が大型になればタイヤ熱の発生確率が高くなり、舗装表面温度が 30°C 以下の場合ではどの車種においても高確率でタイヤ熱が発生することが確認された。調査時における舗装表面温度は、20~30°C であり、後方に赤外線サーモグラフィを取り付けた場合、確実にタイヤ熱による影響が発生していることが確認された。そのため、タイヤ熱影響を受けない前方への赤外線サーモグラフィの設置を検討することとなった。なお、タイヤ摩擦熱は、1~2 秒で消失し、舗装表面温度への影響は瞬間的なものであることも確認され、計測時に車間距離を調整することで影響を抑えることが可能となる。

## 3) 精度検証時の計測条件

図-12 に示すように、過去に実施した精度検証時の環境条件(最高気温, 最低気温, 日較差, 舗装最高温度)を整理した。その結果、検出精度が高かった精度検証では、最高気温, 舗装最高温度が高く, 日較差も 10°C 以上と大きい, 検出精度が低かった精度検証では、計測条件(表-1 参照)を満たすものの, 最高気温が低く, 日較差も計測条件の最低値である 7°C 程度であった。現在の計測条件の下限值で計測を行った場合, 前述した画像端部やタイヤ位置での精度低下が顕著に表れ, 精度低下が生じるものと推測された。そのため, 今後の検証で検出精度を担保できる車載式赤外線調査の計測条件について見直しをおこなうこととなった。

### (2) 車載式赤外線調査の仕様検討

車載式赤外線調査に使用している車両は, R4 年度に更新する予定である。更新にあたり, 精度向上の取り組み成果を活用し, 表-4 に示す仕様により, 新たな車載式赤外線調査システムを作成することとなった。

## 4. おわりに

舗装改良工事において, 事前に床版上面の変状を把握する需要は非常に高いものと考えている。特に時間制約のある工事においては, 十分な補修ができずに再劣化してしまうことも懸念される。本調査技術の検出精度の目標は, 70~80% を目指しており, 本取り組みにより目標の検出精度を達成し, 調査の有用性を確立していきたい。

調査技術の有用性が確認されれば, 舗装工事への適用や橋梁部における工事の優先順位や工事实施の指標, 橋梁の健全性評価等, 調査技術を幅広く活用し, 道路の維持管理に寄与していきたいと考える。

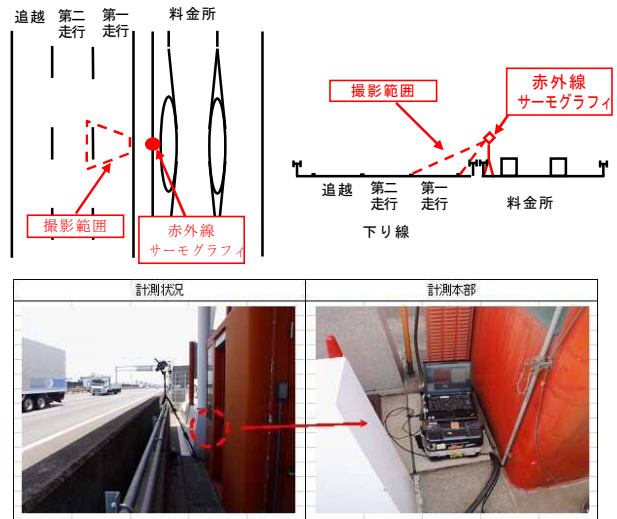


図-10 タイヤ摩擦熱の計測状況

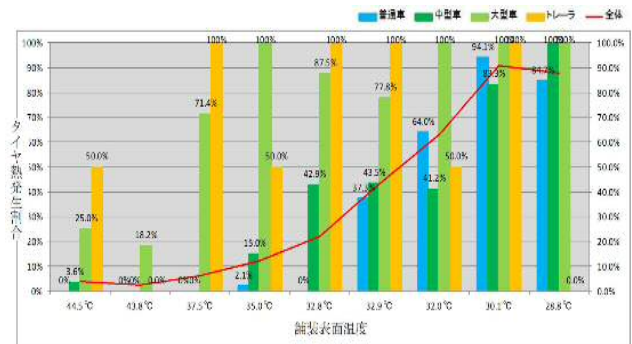


図-11 タイヤ摩擦熱の発生状況

・環境条件(検出精度高)				
撮影日時	最高気温	最低気温	日格差	舗装最高温度
2015/5/19	30.8°C	18.3°C	12.5°C	56°C
2017/9/2	29.0°C	18.7°C	10.3°C	52°C

・環境条件(検出精度低) 【検出率45%】				
撮影日時	最高気温	最低気温	日格差	舗装最高温度
2019/4/23	20.5°C	12.7°C	7.8°C	不明

【低下要因】

- ①最高気温が低い
- ②日格差が小さい(調査条件ギリギリ)
- ③舗装最高温度が40°C未満?

調査条件の再整理

図-12 精度検証時における計測条件

表-4 新たな車載式赤外線調査の仕様

システムの仕様	
設置位置	車両前方
設置高さ	2,500~3,000mm
撮影角度	45~67°
撮影幅員	1,900~2,000mm (2,000mm以上は使用しない)
撮影台数	2台

(2022年7月8日受付)

(2022年9月9日受理)