

# 論文 パッシブブロックイン赤外線サーモグラフィ法の開発とこれによる内部欠陥検出精度の向上

佐藤 大輔<sup>\*1</sup>・阪上 隆英<sup>\*2</sup>・込山 貴仁<sup>\*3</sup>・久保 司郎<sup>\*4</sup>

**要旨**：赤外線サーモグラフィ法は、コンクリートの表層剥離やタイルの浮きなどを検出するための、有効な手法であるとされている。しかしながら、日射や気温の変化に伴い発現する温度変動を利用するパッシブ法における測定では、対象物の立地条件や測定時の気象条件によっては、検出可能な表面温度差が得られず、欠陥の検出が困難となる場合がある。本研究では、パッシブ法での表面温度変動を連続で記録し、これをロックイン解析することにより、温度分布画像から表面温度変動を示す分布画像を生成し、剥離欠陥を精度良く同定する手法を提案する。

**キーワード**：赤外線サーモグラフィ，ロックイン，パッシブ法，剥離，浮き

## 1. はじめに

コンクリート片や外壁タイルの剥落事故により、コンクリート構造物への赤外線サーモグラフィの適用に対して関心が集まっている。赤外線サーモグラフィ法は、(1)非接触により遠隔から測定可能なため足場が不要、(2)一度に広範囲を測定でき高効率、(3)欠陥に関する情報である位置・大きさが視覚的に取得できる、(4)レンズなどの選択により様々な構造物に適用できる、などの特徴を有していることから、調査面積の大きなコンクリート構造物の検査に有用であるとされている。しかしながら、赤外線サーモグラフィ法は、適用上の制限事項も多く、適切な測定条件が整わないと測定者による画像判読が困難になるという問題点がある<sup>1)</sup>。

筆者ら<sup>2)</sup>は、赤外線サーモグラフィ法による剥離欠陥の診断精度を低下させる原因の一つである背景放射などのノイズや汚れ、さらには補修跡による影響を、剥離欠陥による温度変化と判別して同定する、パッシブロックイン赤外線サーモグラフィ法を提案した。この手法は、日射

変動に伴う離散的な温度変動に対して任意の周期を定め、この周期に関するフーリエ級数展開したときの正弦および余弦の係数の分布画像を作成し、得られた分布画像のコントラスト変化から剥離欠陥の同定するものである。

しかしながら、この処理においては、自然発生的に生じる日射による加熱条件の変化に伴う温度変動を利用しているため、対象となる構造物の立地条件、気象条件、調査条件によっては十分な日射が得られないことや、日射を受けている間に撮影できない場合も考えられる。このため、加熱冷却過程の温度分布変動データを処理する、フーリエ級数展開によるパッシブロックイン赤外線サーモグラフィ法の適用は難しい場合がある。

そこで、本研究では、通常の熱画像だけでは検出できない剥離欠陥を検出することを目的として、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法を、時系列の赤外線データに対して適用することにより、得られるロックイン解析値の分布画像をもとに、剥離欠陥の同定を行った。

\*1 (株)コンステック 技術本部 工修 (正会員)

\*2 大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻助教授 工博 (正会員)

\*3 (株)コンステック 技術本部 工博 (正会員)

\*4 大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻教授 工博

## 2. 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の適用

ロックイン赤外線サーモグラフィ法は、赤外線サーモグラフィ装置の計測分解能と同程度の微小な温度変動を検出する手法であり、ある周波数の温度変動に同期する信号のみを抽出することができる。同期させる温度変動は、外部から参照信号として入力する必要がある。

阪上ら<sup>3)</sup>は、温度変動に関する参照信号を入力することなく、ランダムな温度変動に対してロックイン処理を行うことができる新しい手法として、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法を提案している。この手法では、計測対象の一部の領域から温度変動データを参照信号として引き出し、ロックイン処理を行うため、ランダム温度変動に対応できる。また、外部参照信号を必要としないため、遠隔から非接触に温度変動分布を検出することを可能にしている。

本研究においては、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法をコンクリートの剥離検出に適用した。さらに、日射および気温変動による表面温度変動に対するロックイン処理方法として、ランダム温度変動に対応した、Lesniakら<sup>4)</sup>による、最小二乗近似法を用いたロックイン処理を適用した。

ここで、赤外線サーモグラフィにより得られる時系列の離散データを次式のように示すことができる。

$$Y_n = A + Bg_n \quad \dots (1)$$

$Y_n$ : 参照信号をもとに近似できる温度値 (赤外線強度値)

$A$ : 測定対象の表面温度における赤外線放射量

$B$ : 温度変動を表す係数

$n$ : 赤外線画像のフレーム番号

$g_n$ : 自己生成された参照信号の離散値 (画像内の9ピクセルの温度値の平均値とした)

実際に赤外線サーモグラフィで測定された赤外線強度  $y_n$  が式(1)に示す  $Y_n$  として近似できている

ものとする、 $Y_n$  と  $y_n$  の差の二乗和を求めたとき、以下のように示すことができる。

$$\Delta^2 = \sum_{n=1}^N (y_n - Y_n)^2 \quad \dots (2)$$

ここで、 $\Delta^2$  が最小になるような  $A$  と  $B$  を決定することによって赤外線サーモグラフィの測定値  $y_n$  の近似式が求まる。

このとき、 $B$  は  $Y_n$  の温度変動を表す係数であり、表面温度変動の参照信号に対する相対的な比を表しており、次式で表すことができる。

$$B = \frac{\left[ \begin{array}{cc} N & \sum y_n \\ \sum g_n & \sum y_n g_n \end{array} \right]}{\left[ \begin{array}{cc} N & \sum g_n \\ \sum g_n & \sum (g_n)^2 \end{array} \right]} = \frac{N \sum y_n g_n - \sum y_n \sum g_n}{N \sum (g_n)^2 - (\sum g_n)^2} \quad \dots (3)$$

$N$ : 全フレーム数

この計算を、赤外線サーモグラフィで得られる全ピクセルの温度の変動データに対して行うことにより、変動データから自己生成された参照信号と最も相関の高い赤外線強度変動値を抽出することができる。ここで  $B$  は  $y_n$  の温度変動を表す係数であり、表面温度変動と参照信号の振幅の比を算出したものである。よって、各ピクセルで得られた  $B$  の分布画像を作成することで、剥離欠陥による相対温度変動分布画像を生成することができる。

## 3. 実験概要

本研究では、コンクリート表層の剥離を模擬した人工欠陥および補修材の剥離を模擬した人工欠陥を作成し、ロックイン処理することでこれらの人工欠陥の検出を行った。

### 3.1 使用機材

パッシブロックイン法を適用するためには、赤外線カメラにより時系列の熱画像データを取得することが必要となる。本研究では、30秒に1フレームの割合で赤外線画像を取得し、データをパーソナルコンピュータに保存した。

測定にはマイクロボロメータセンサを搭載した赤外線サーモグラフィ装置を使用した。使用機材の仕様を表-1に示す。

表-1 赤外線サーモグラフィ装置の仕様

最小検知温度差	0.08°C
測定波長	8-14μm
視野角	水平：29°，垂直：22°
使用センサ	非冷却マイクロボロメータ
瞬時視野角	1.58mrad
表示画素数	320×240

### 3.2 測定環境

実験日時：平成18年11月8日

9時00分～19時00分

天候：晴天

最高気温：18.1°C 最低気温：8.0°C

場所：大阪市大正区

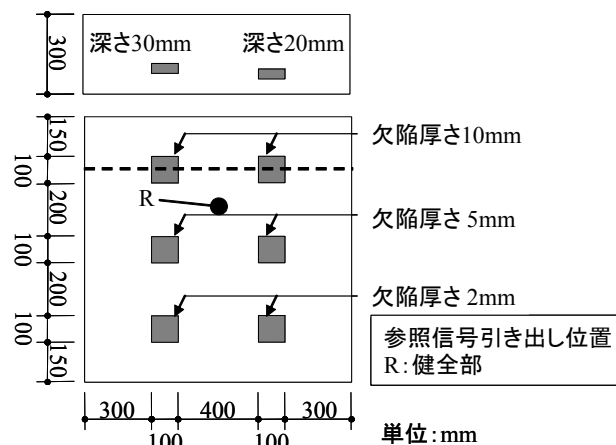
### 3.3 試験体概要

コンクリート表層の剥離を模擬した欠陥を有する試験体(A)と補修材の剥離を模擬した試験体(B)の概要を図-1に示す。

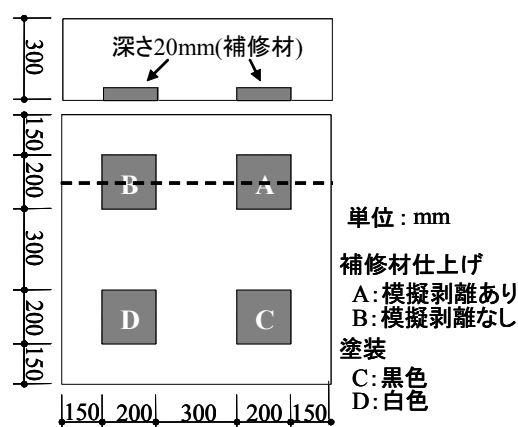
試験体(A)では、人工剥離欠陥として、欠陥厚さ2,5,10mmの正方形発泡ポリエチレン板を埋設した。欠陥深さは、20mmおよび30mmの2種類とした。試験体(B)では、補修材が表面温度に及ぼす影響を検討するため、既存コンクリートを表面から深さ20mmハツリとり、補修材を施工した。このとき、補修材による仕上げと駆体の界面に発泡ポリエチレンを埋め込んだ箇所（以下補修剥離と呼ぶ）と補修材のみで仕上げた箇所（以下補修仕上げと呼ぶ）の2種類を作成し

た。また、表面の色の違いによる日射吸収率の変化が表面温度に及ぼす影響を検討するため、健全部位の表面を黒色と白色で塗装した領域を設けた。

試験体側面からの熱の回り込みを防ぐために、側面には断熱材を貼り付けた。赤外線カメラおよび試験体の位置関係を図-2に示す。



(a) 試験体 (A)



(b) 試験体 (B)

図-1 試験体概要

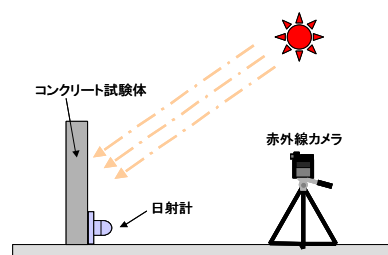


図-2 実験状況

## 4. 実験結果

### 4.1 熱画像による計測結果

測定された熱画像から得られた試験体表面温度（健全部、剥離欠陥部）、日射量および外気温を図-3に示す。

日射量は11時頃まで上昇し、それ以降、低下している。特に14時24分から15時08分まで試験体前方にある建物の日陰に入るため、日射はほとんど得られていない。外気温は14時頃まで緩やかに上昇するが、建物の影の移動による変動があり、その後日射量の低下とともに低下している。試験体の表面温度については、日射量とほぼ同じ変動を示している。

各試験体の健全部との温度差を示すラインプロファイルを図-4に示す。ラインプロファイ

ル引き出し位置を図-1中に破線で示した。日射量がピークに達する11時頃、健全部と欠陥部の温度差は最も大きくなるため、試験体(A)および(B)、いずれの試験体においても欠陥の同定は可能である。17時頃の温度差では、日没および気温低下による冷却により、欠陥部は健全部より低温になる。これらの場合のように被測定物が、加熱および冷却作用を受け、欠陥部に赤外線サーモグラフィの温度分解能以上の十分な温度差が得られたとき、欠陥の同定は容易に可能である。しかしながら、15時頃は、健全部と欠陥部の温度が逆転する時間帯にあたり、温度差プロファイルでは11時や17時の場合のように欠陥部を同定できるような温度差は認められない。

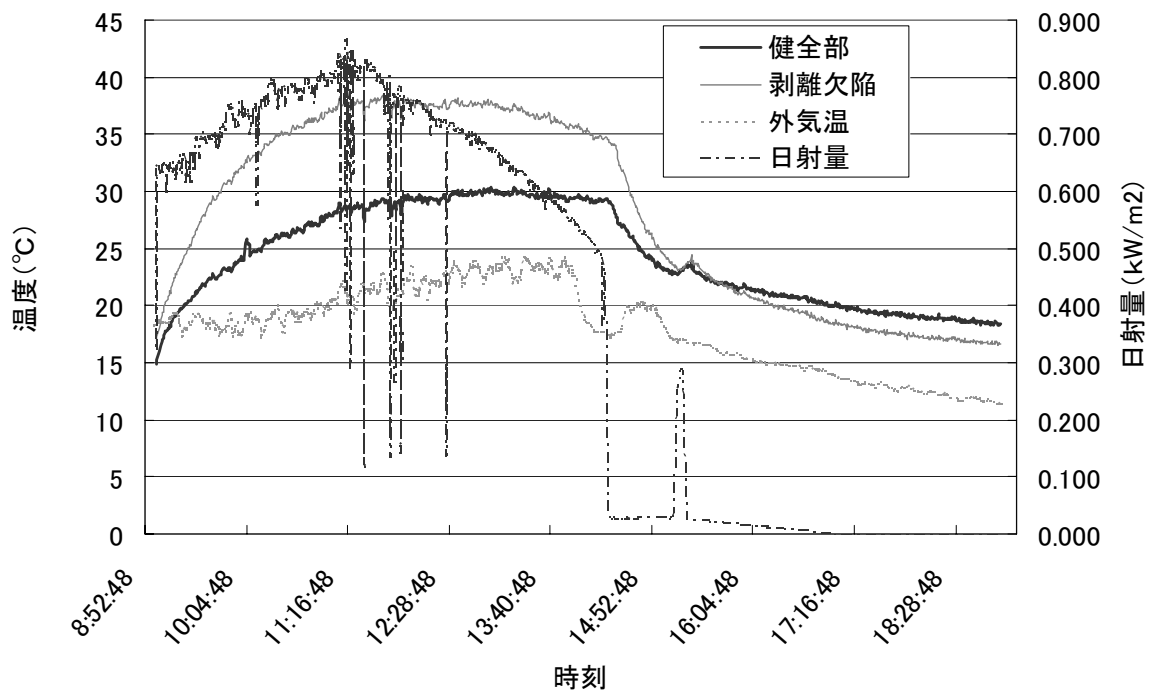


図-3 コンクリートの表面温度変動，日射量と外気温

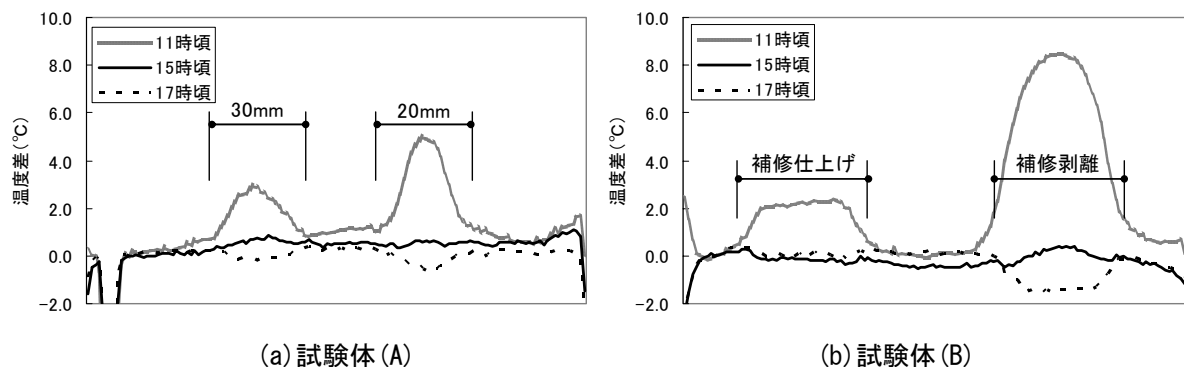


図-4 温度差ラインプロファイル

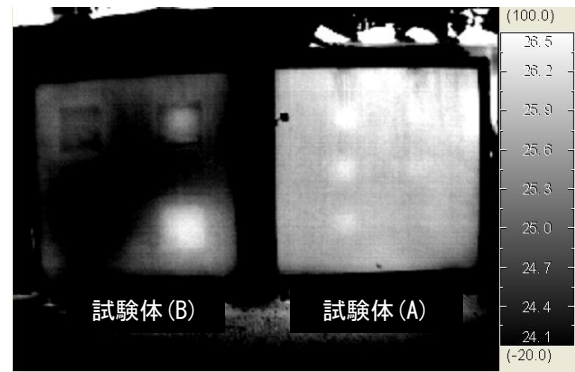
#### 4.2 自己相関ロックイン処理による結果

時系列の熱画像データに対して自己相関ロックイン処理を適用し、剥離欠陥の同定を試みた。自己相関ロックイン処理には、日射の無くなる14時20分～15時08分のデータの中から、健全部と欠陥部が明確に判断できなくなる14時55分～15時08分の連続する28データをを用いた。14時55分および15時08分に得られた熱画像を図-5に、また同時間の温度変動を示すグラフを図-6に示す。

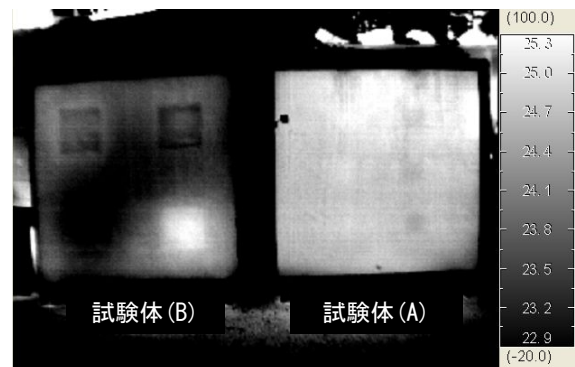
14時55分の熱画像では、試験体(A)の深さ20mmに埋設した欠陥による温度差がなくなり、健全部とほぼ同じ温度となっている。また、15時08分の熱画像では、深さ20mmの欠陥部は低温になっており、深さ30mmの欠陥部では温度差が殆ど無くなっている。温度変動を示すグラフでは、欠陥部の温度低下が大きく、健全部と欠陥部の温度差が減少していることが分かる。つまり、この区間内では赤外線カメラの熱画像のみを用いた欠陥の同定は、困難であるといえる。

自己相関ロックイン処理により、得られた係数Bの分布画像を図-7に示す。ロックイン処理に用いた参照信号は、図-1に示す試験体の健全部(点R)の周囲9ピクセルの温度値の平均値である。

試験体(A)においては、熱画像と比べると、より鮮明なコントラストが得られており、予め導入した人工欠陥の位置・大きさにほぼ一致している。試験体(B)においては、補修剥離部では明確なコントラスト差が得られている。また、熱画像に見られる補修仕上げ部の輪郭線やコントラストの差は殆ど生じていない。また、色の違いによる影響は、熱画像と比較すると低減されており、欠陥部の判別は十分にできるレベルである。この結果は、本手法が剥離欠陥をそれ以外の要因で生じた温度変化と判別し、欠陥の同定を容易にすることを示すものである。また、ロックイン分布画像では、処理に用いた熱画像に現れた日影による温度ムラも低減されている



(a) 14時55分



(b) 15時8分

図-5 ロックイン処理に用いた熱画像

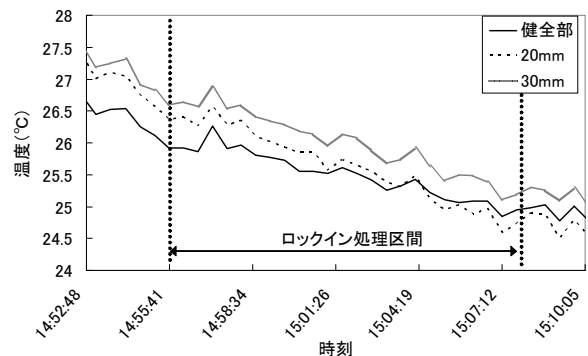


図-6 自己相関ロックイン処理に用いた温度変動データ

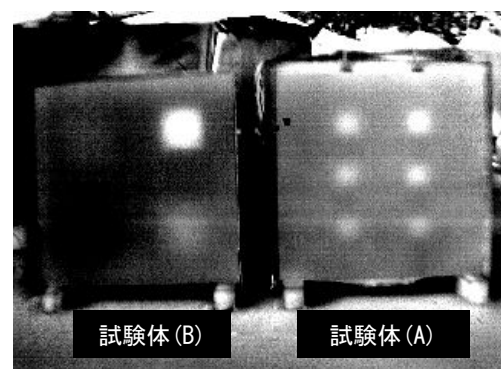


図-7 自己相関ロックイン分布画像

ことが分かる。

## 5. 考察および課題

最小二乗近似法による自己相関ロックイン処理では、測定対象における温度変動波形が相似形でかつ位相のずれがない場合には、温度変動振幅の代表値分布を、参照信号を引き出した部分の値に対する比として算出する。

コンクリートは熱伝導率が低いため、日射が無くなってからも、ある一定時間における欠陥部の温度変動は、健全部の温度変動よりも相対的に大きく、表面温度変動にわずかに違いが生じる。本実験で得られた一部の熱画像のように、健全部と欠陥部の温度差が微小なため、単一の熱画像では判別できない場合でも、自己相関ロックイン処理により、健全部と欠陥部の温度変動の違いを、高精度に検出できたため、欠陥の判別を可能にしたと考えられる。

ロックイン処理を行うには、原理上、カメラを固定し、時系列の熱画像データを取得する必要がある。実構造物への適用に際しては、カメラ固定による拘束時間は、短い方が好ましく、適切な撮影時間を導くため、赤外線カメラのフレームレートを検討することが必要である。さらに、欠陥同定に必用な日射量や外気温変動を明らかにすることで、より精度の高い検査手法として確立できると考えられる。

## 6. まとめ

赤外線サーモグラフィ法による、コンクリート構造物の内部欠陥検出精度の向上を目的として、新たに最小二乗近似法による自己相関ロックイン処理を適用し、以下の知見を得た。

- (1) 日射および気温の変動に伴う表面温度の変動により、健全部と欠陥部の温度差が無くなる場合においても、得られるロックイン分布画像のコントラスト差から欠陥部を同定できることが確認された。
- (2) 自己相関ロックイン処理により得られ

たロックイン分布画像では、表面温度ムラが低減されることが示され、剥離欠陥を判別するための有効な画像処理法となりえる。

- (3) 自己相関ロックイン処理と、熱画像さらに従来提案したフーリエ級数展開によるロックイン処理を組み合わせることで、欠陥部を判別するための補完データとなり、診断精度の向上、時間制約の緩和が期待できる。

謝辞：本実験は、住友大阪セメント・中研コンサルタント屋外実験場にて実施したものであり、本実験に際してご協力を頂いた中村士郎氏をはじめ、同社の皆様に対して、ここに記し心より謝意を表します。なお、本研究費の一部は、(財)機械システム振興協会助成事業によるものである。

## 参考文献

- 1) 込山貴仁, 谷川恭雄: 赤外線映像装置の特性と外界ノイズがサーモグラフィ法の信頼性に及ぼす影響, コンクリート工学論文集, Vol.8, No.1, pp.109-120, 1997.1
- 2) 佐藤大輔, 阪上隆英, 込山貴仁, 久保司郎: パッシブロックイン赤外線サーモグラフィによる欠陥判別法に関する基礎検討, コンクリート工学年次論文報告, Vol.28, No.1, pp.1823-1828, 2006.7
- 3) 阪上隆英, 久保司郎: 非定常温度分布計測による赤外線サーモグラフィ法の動向, 日本実験力学学会講演論文集, No.2, pp.7-11
- 4) Jon R. Lesniak, Brad R. Boyce, Great Howenwater, Thermoelastic Measurement Under Random Loading, Proc. of the SEM Spring Conf. on Experimental and Applied Mechanics and Experimental/Numerical Mechanics in Electronic Packaging III, pp.504-507, JUNE 1998