

論文 パッシブ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

佐藤 大輔^{*1}・阪上 隆英^{*2}・込山 貴仁^{*3}・久保 司郎^{*4}

要旨：コンクリートに生じる表層剥離，欠陥などを検出する方法として赤外線サーモグラフィ法は有用であるとされているが，汚れ，補修跡や背景雑音など様々なノイズの影響を受け欠陥の判別が困難な場合がある。本研究では，日照や気温変動による被測定物の表面温度変動データの特徴波形をロックイン解析により求め，これをもとに温度分布情報をノイズの少ない画像データに変換し，欠陥検出および欠陥以外の外乱との判別を行う手法を提案する。

キーワード：非破壊評価，ロックイン赤外線サーモグラフィ，欠陥検出，浮き，剥離

1. はじめに

近年コンクリート構造物の老朽化等による事故が頻発し，構造物の調査・診断の必要性が高まっている。コンクリート片や建物のタイルやモルタルなどの外壁仕上げ材の剥離は，剥落すると通行人などを巻き込み，重大な第三者被害を起こす可能性があり早急な対策を必要とする重要な点検項目である。事故を未然に防ぐために，効率よくかつ安全に検査する手法として，赤外線サーモグラフィ法への期待は高くなっている。しかしながら，基礎研究の不足から欠陥寸法や深さに関する定量的な評価方法がなく，診断精度にバラツキが多いという欠点がある。

背景放射などのノイズや汚れ，補修跡による擬似温度変化などは，赤外線サーモグラフィ法による欠陥診断精度を低下させる原因の一つである。

例えば，高架橋や建物などで鉄筋腐食などに起因するコンクリートの剥離を補修する場合，補修箇所には材質の異なる補修用モルタルなどが埋められる。このような補修箇所は，補修用モルタルの熱物性値の違い，あるいは表面の放射率の違いにより，赤外線サーモグラフィに

よる温度分布画像には，擬似的な温度差が生じ，熱画像のみから判断するとあたかも剥離欠陥が存在するかのようになってしまうため，診断は困難を極める。また，その補修部位が躯体との界面で剥離している場合には，コンクリートの剥離部位と同様に，剥離部の断熱性による温度差が発現する。赤外線サーモグラフィ法を適用し，欠陥評価を行う場合，これらの原因の異なる温度上昇を区別できず，欠陥を誤判定してしまう可能性が高いといえる。このような場合には，赤外線サーモグラフィ法に加えハンマーによる打撃法など複数の検査手法を用いることで，欠陥評価の精度は向上するが，赤外線サーモグラフィ法の高効率かつ安全という利点が損なわれてしまう。

そこで，本研究では，赤外線サーモグラフィ法によりコンクリートの表層剥離による温度変化および補修跡に発生する温度変化の特徴を定量的に評価することを目的として，パッシブ条件下においてコンクリート構造物に発生する温度変動に対しロックイン処理を行い，剥離欠陥の検出および判定を試みた。

*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. ロックイン赤外線サーモグラフィ法

ロックイン赤外線サーモグラフィ法は、これまで主に材料の熱弾性応力計測に用いられてきた¹⁾。中村ら²⁾は、この手法をコンクリート構造物の欠陥同定のための、アクティブ加熱赤外線サーモグラフィ法における温度変動解析に応用した。すなわち、アクティブ加熱によりコンクリート表面に温度変動を与えたときの、加熱冷却過程の温度分布変動をその変動周期に関する正弦波参照信号を用いてロックイン処理し、参照信号に同期して変動する温度変動成分のみを抽出することにより、加熱むら等のノイズ成分を取り除くとともに、温度変動の特徴解析から欠陥深さを同定する、ロックイン赤外線サーモグラフィ法が提案されている。また、阪上ら³⁾は本手法を金属板の減肉検出に適用し、良好な結果を示している。図-1および図-2は、いずれも人工的に減肉部を設けた金属板の熱画像であるが、処理前の熱画像に比べてロックイン処理後の熱画像では、減肉部の認識が容易であることが確認できる。

しかしながら、コンクリート構造物の多くは屋外環境にあり、その面積も大きいため、熱源を用いたアクティブ加熱を実施することは困難であることが多いと考えられる。そこで、本研究では構造物に自然発生的に生じる日射による加熱条件の変化に伴い発現する温度変動を利用する、パッシブロックイン赤外線サーモグラフィ法（以下：パッシブロックイン法）を提案する。

3. パッシブロックイン赤外線サーモグラフィ法

3.1 使用機材

パッシブロックイン法による赤外線検査を実施するためには、赤外線カメラにより時系列の赤外線データを取得することが必要となる。本研究では、72 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。

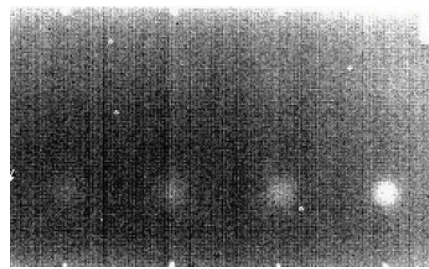


図-1 減肉部検出熱画像

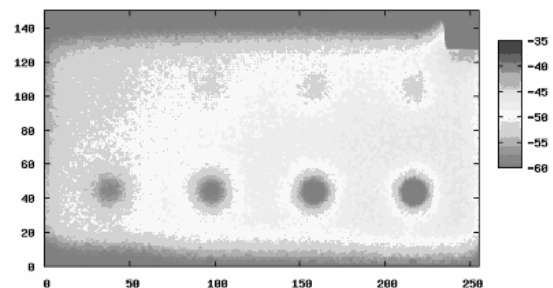


図-2 減肉部検出ロックイン処理画像

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℃
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 ロックイン処理

本研究におけるロックイン処理は、赤外線カメラの時系列データから得られる離散的な温度変化に対して、フーリエ級数展開を用いることにより行った。すなわち、離散的な温度変動データをフーリエ級数展開して求めたフーリエ級数係数に着目し、その 1 次の係数の値をもとにコンクリートの内部空隙および表層剥離を同定する手法を提案する。具体的手法を以下に示す。

フーリエ級数展開を用いることによって、時間 t に依存する複雑な形状の離散的な温度変化を、周波数の倍数を変数とする $\sin$ 関数および $\cos$ 関数により次のように表すことができる。

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi n}{T} t + b_n \sin \frac{2\pi n}{T} t \right) \quad \dots (1)$$

a_0 : 平均温度

T : 周期

n : フーリエ級数係数の次数($n=1,2,3,\dots$)

$f(t)$: 時間 t に依存する温度変化

ここで、フーリエ級数係数 a_n および b_n は次式によって求められる。

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \frac{2\pi n}{T} t dt \quad \dots (2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin \frac{2\pi n}{T} t dt \quad \dots (3)$$

欠陥により変化した時系列温度変動曲線の特徴を、フーリエ係数すなわち $\cos$ 関数および $\sin$ 関数に対する係数 a_n および b_n を用いて定量化できる可能性がある。ここに、既往の研究³⁾によれば、離散的温度変化に対して、フーリエ級数係数 a_n および b_n の分布を求める場合、 n の値が小さいときほど a_n および b_n とともに欠陥部と健全部との差が大きくなり、欠陥の検出に対して良好な結果を得ている。よって、本研究においても $n=1$ の基本周波数成分のみを検討の対象とした。また、本実験ではフーリエ処理を行う1周期 T (区間 $[-\pi, \pi]$) を、日射を受け表面温度が上昇を開始する時から、日射が遮られ表面温度が低下し終わるまでの間とした。

4. 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、パッシブブロックイン法によりこれらの人工欠陥の検出を行った。

4.1 測定環境

実験日時：平成17年11月15日

9時00分～15時00分

天 候：晴れ時々曇り

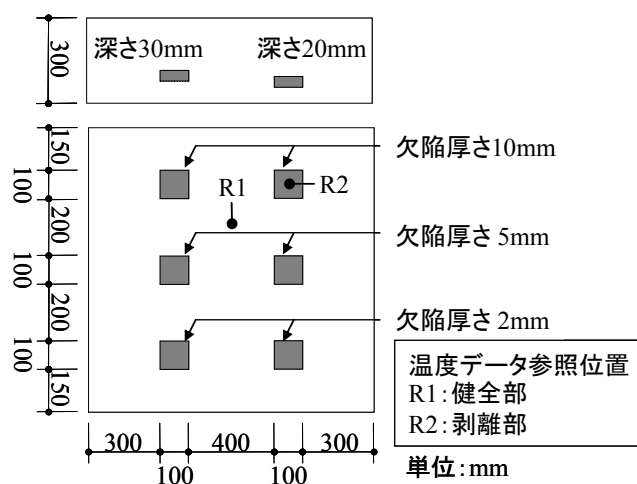
最高気温：16.9℃ 最低気温：10.7℃

場 所：大阪市大正区

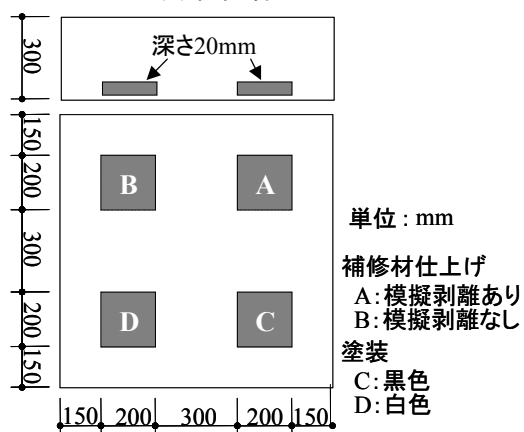
4.2 供試体概要

コンクリート表層の剥離を模擬した欠陥を有する供試体(No.1)と補修材の剥離を模擬した供試体(No.2)の概要を図-3に示す。

No.1 供試体では、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。No.2 供試体では、補修材による表面温度変化を検討するため、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）と補修材のみで仕上げた箇所（以下：補修仕上げ）の2種類を作成した。また、表面の色違いによる放射率変化による擬似温度変化の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。



(a) 供試体 No. 1



(b) 供試体 No. 2

図-3 供試体概要

供試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、測定面には赤外線サーモグラフィ測定時の反射の影響を抑制するためにセメントペーストを薄く塗布した。

屋外日射環境での測定においては、No.1 および No.2 の供試体を遮蔽物のないヤードに南向きに設置し、日射の得られる 9 時から 15 時まで温度変動データの取得を行った。また、測定開始前には、供試体の表面を断熱材で覆うことで、測定開始時の表面温度を均一にした。さらに、日射計を供試体の表面に設置することにより日射時間および強度の計測を行った。

赤外線カメラおよび供試体の位置関係を図-4 に示す。

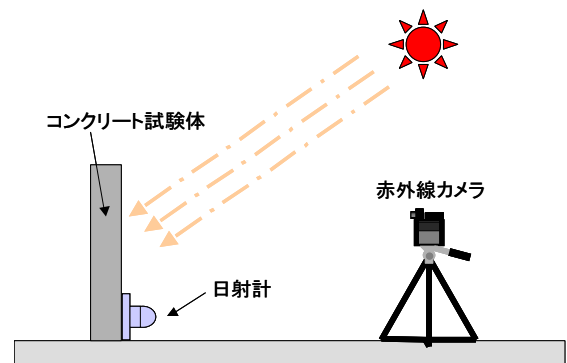


図-4 実験状況

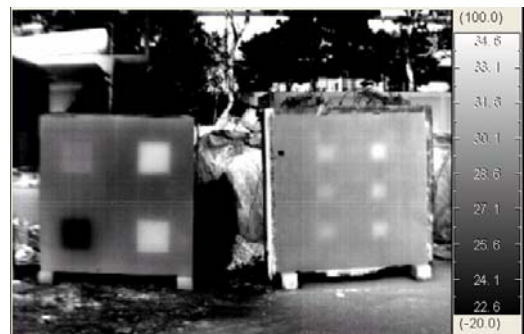


図-5 13時21分赤外線温度分布画像

5.実験結果

5.1 赤外線サーモグラフィによる表面温度計測結果⁴⁾

図-5 に健全部と欠陥部の表面温度差が最大となる赤外線熱画像を示す。この熱画像は 13 時 21 分に撮影されたものであり、No.1 供試体では剥離部が健全部よりも高温となっている。また、No.2 供試体では補修剥離部および補修仕上げ部、塗装黒色の箇所の表面温度が健全部よりも高温となっている。一方、白色部は、放射率がコンクリート表面よりも小さいため、見掛けの温度は

健全部よりも低温となっている。すなわち、表面温度を支配する因子は、欠陥の存在以外にも、材質の違い、色の違いなど様々なものが存在し、屋外環境下における実構造物の測定時には、これら欠陥の存在以外の理由により発生する表面温度差により、欠陥部の同定が困難となり、誤った診断につながることもある。

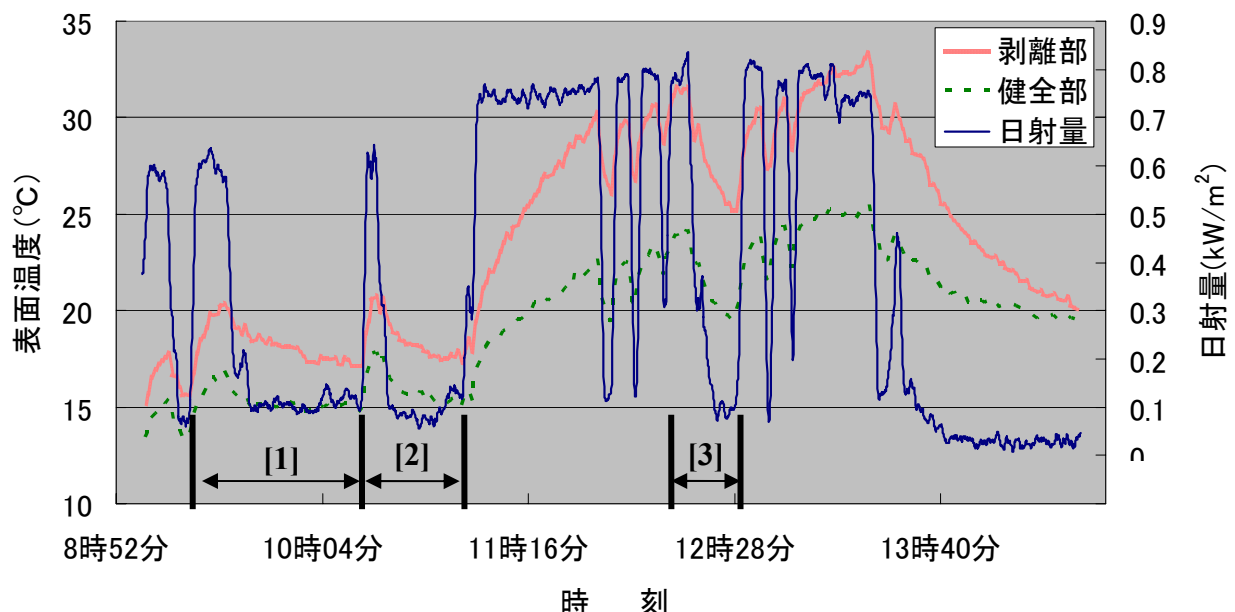


図-6 コンクリート表面の温度変動と日射量の関係

5.2 パッシブブロックイン法による剥離欠陥の検出

日射量とコンクリート表面温度（温度参照位置は図-3 参照）の関係を図-6 に示す。また、時系列赤外線データをフーリエ級数展開することにより求めた基本周波数成分 a_1 および b_1 の分布画像を図-7 ～図-9 に示す。図-7 ～図-9 それぞれ(a)(b)は図-6 に示す区間[1]～[3]の範囲のフーリエ級数係数 a_1 および b_1 の分布画像である。また、図-7 ～図-9 それぞれ (c)にはこれらに対応する区間内の無処理の赤外線熱画像を示す。

フーリエ級数係数 a_1 の分布画像に着目すると、No.1 供試体では、輪郭は鮮明ではないが、剥離部と健全部との間でコントラスト変化が認められ欠陥部の認識が可能である。No.2 供試体では、補修剥離部において、No.1 の剥離部と同様の傾

向によるコントラスト変化が生じており、欠陥部が認識できている。一方、補修仕上げ部および黒色・白色の塗装部では、周辺の健全部とほぼ同じ値を示しており、これらは欠陥による温度変動に起因するものではないことが示された。

また、健全部では供試体 No.1 および No.2 でほぼ均一な値となっており、フーリエ係数分布画像では、赤外線熱画像に見られるような温度ムラが低減されていることがわかる。

フーリエ級数係数 b_1 の分布画像では、 a_1 の分布画像で認められたような、剥離部のコントラスト変化は認められない。しかしながら、No.2 供試体に着目すると、健全部と剥離欠陥部の輪郭が鮮明な画像を得ている。つまり、 a_1 の分布画像では不明確な剥離欠陥の範囲を、 b_1 の分布画像を併用することで、より正確に剥離欠陥の

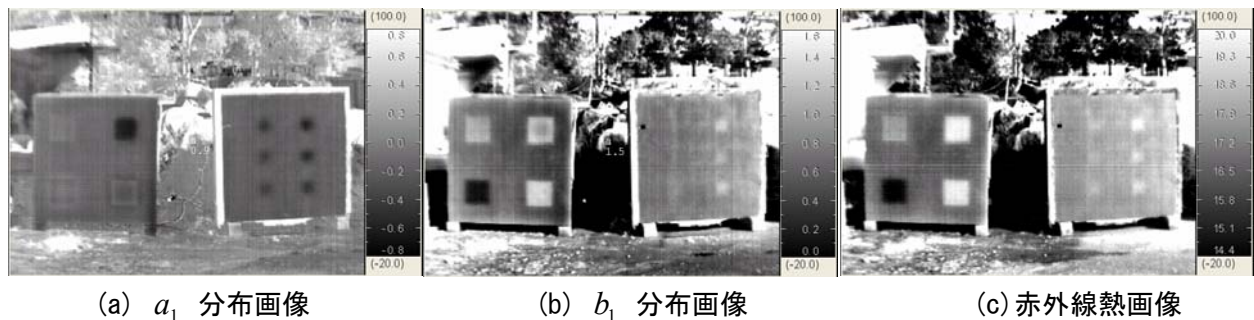


図-7 区間[1]における分布画像および赤外線熱画像

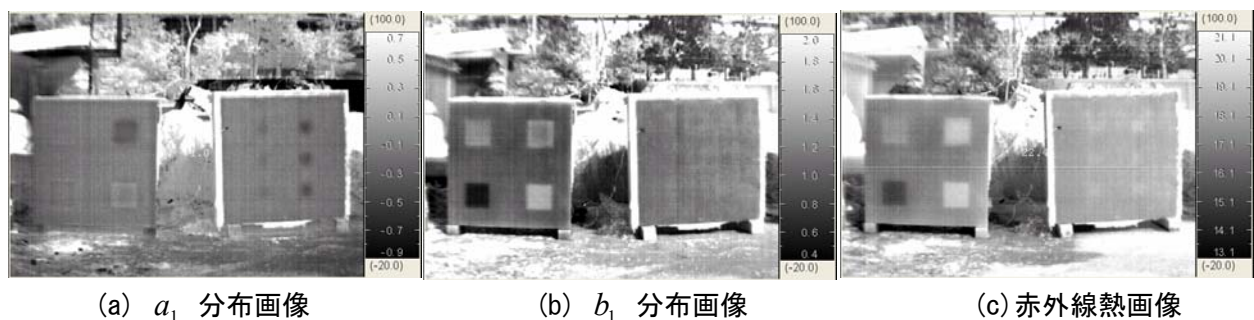


図-8 区間[2]における分布画像および赤外線熱画像

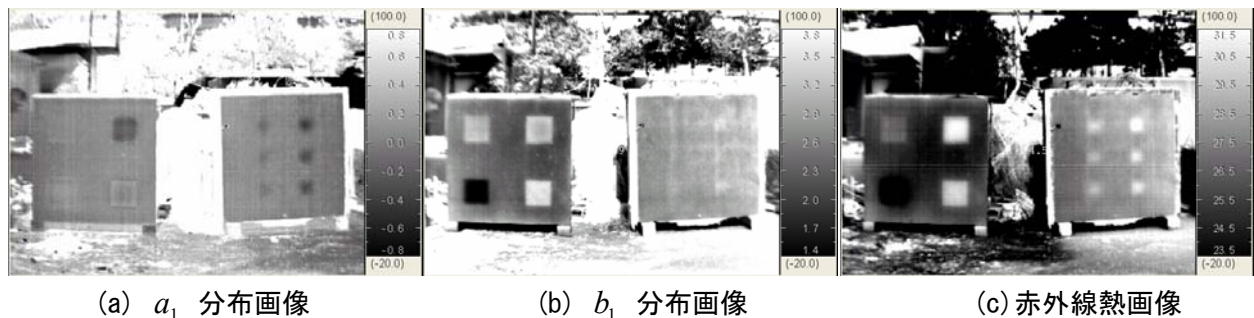


図-9 区間[3]における分布画像および赤外線熱画像

範囲として示すことができる可能性がある。

5.3 パッシブロックイン法と日射量の関係

図6からも明らかなように日射量の上昇とともにコンクリート表面の温度は上昇し、日射量の下降とともにコンクリート表面の温度は降下を始める。日射量はコンクリート表面の温度変動に大きく影響していることが分かる。また、前述のとおり、本解析では、日射を受け表面温度が上昇を開始する時から、日射が遮られ表面温度が降下し終わるまでの間を1周期としている。フーリエ級数係数の $\cos$ 同期成分 a_1 と $\sin$ 同期成分 b_1 は解析に用いた区間における温度変動の特徴を表している。上記のような表面温度変動区間をロックイン処理の1周期とした場合、フーリエ級数係数 a_1 による分布画像が効果的である。

本実験では、ロックイン処理により表面温度分布のノイズ成分などを低減でき、剥離欠陥の判別が可能であることが示された。しかしながら、適切な処理を行うためのデータ量、つまり赤外線画像のサンプリング間隔などは検討しておらず、短い周期に対してはロックイン処理を行っても有効な効果が得られなかった。今後、日射変動が短い周期で起きた場合を想定しサンプリング間隔を検討すること、また、日射変動を参照信号とすることで、大きさおよび深さについて定量的に評価できる可能性があり、より精度の高いコンクリート構造物の検査手法になりえると考えられる。

6. まとめ

本研究では、赤外線サーモグラフィ法によりコンクリートの表層剥離、内部欠陥および補修箇所の温度変化を定量的に評価することを目的として、フーリエ級数展開を用いるロックイン手法を赤外線サーモグラフィ法に取り入れ欠陥検出に関する実験的検討を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) パッシブ法における、日射変動に伴う離散的な温度変動から、データ処理区間すなわち周期を任意に定め、この区間でのフーリエ級数係数の分布画像を作成することで、剥離欠陥をそれ以外の擬似温度変化領域から区別して同定することが可能であることが明らかになった。
- (2) 単一の熱画像から健全な補修部と剥離した補修部を判別することは困難であるが、フーリエ級数係数の分布画像では、健全部と剥離部の間に生じる特徴的なコントラスト変化の有無により、両者を判別できることが明らかとなった。
- (3) ロックイン処理によるフーリエ級数係数分布画像においては、表面温度のバラツキによる誤差が緩和される傾向にあり、フーリエ級数展開を用いるロックイン手法は温度ムラが生じた対象物の剥離欠陥を判別するための有効な画像処理法として期待できる。

謝辞：本実験は住友大阪セメントおよび中研コンサルタント屋外実験場にて行ったものであり、本実験に際してご協力を戴いた川嶋恭志氏をはじめ、同社の皆様には深く感謝しここに記します。

参考文献

- 1) 阪上隆英：ディファレンシャルサーモグラフィを用いたNDT技術，メンテナンス，No.202,pp.14-20, 1997.3
- 2) 中村士郎，阪上隆英，久保司郎：改良ロックイン赤外線サーモグラフィ法によるコンクリート構造物の非破壊検査に関する研究，コンクリート工学年次論文報告，Vol.26, No.1, pp.1857-1862, 2004.7
- 3) 阪上隆英，今西大輔，久保司郎：ステップ加熱時の温度変動解析による原肉欠陥検出，第15回設計工学・システム部門講演会講演論文集，pp.488-489, 2005.8
- 4) 込山貴仁，中野米蔵，谷川恭雄：サーモグラフィ法による外壁仕上り材の剥離検知の適用限界に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.484, pp.13-20, 1996.6