

# 論文 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

中村 士郎\*1・阪上 隆英\*2・久保 司郎\*3

**要旨**：コンクリート表面近傍のはく離欠陥などを定量的に検出可能な非破壊検査法であるロックイン赤外線サーモグラフィ法の改良に関する検討を行った。赤外線画像の時系列データ処理に用いる参照信号の周期を任意に変化させることにより、1回の加熱-冷却過程の計測データから検出欠陥の深さ情報が抽出でき、短時間で欠陥の定量化が行える可能性を示した。

**キーワード**：ロックイン赤外線サーモグラフィ法、欠陥深さ、検査速度、非破壊検査

## 1. はじめに

近年コンクリート構造物の維持管理の重要性は一層増加し、叩き点検に代わる効率的かつ高精度な非破壊検査手法の開発が活発に行われている。中でも赤外線サーモグラフィによる非破壊検査手法は、非破壊かつ非接触で鉄筋かぶり程度(5cm程度)の深さまでの浮き、はく離を検出可能なため、はく落危険箇所を抽出するための効率的な検査方法として注目を集めている。従来日射環境下などで行われてきたパッシブ法<sup>1)</sup>に加えて、対象物を強制的に加熱、冷却するアクティブ法<sup>2)</sup>による検査事例も増加している。

これらの赤外線法に共通する問題点として、赤外線画像から浮き、はく離の存在を検出することは可能な手法であるものの、そのはく離深さは不明であり、はく落危険度などを診断するためには、他の検査手法との併用が必要である点が挙げられる。筆者らは、ロックイン赤外線サーモグラフィ法と呼ぶ非定常温度場の解析手法により、欠陥の検出とともに欠陥深さを定量化する方法を検討している<sup>3)</sup>。この手法では、加熱時間を2, 3水準変化させて強制加熱を行い、その後の冷却過程の表面温度変化をそれぞれ時系列で解析することにより、検出された欠陥の深さを定量化できることを確認している。した

がって、1検査面当りの検査時間が従来のアクティブ法に比べて2, 3倍必要となり、検査効率の面で問題があった。

本論文では赤外線画像の時系列データの処理方法を見直し、1回の強制加熱-冷却データから欠陥深さを推定する手法に関する検討を行った。

## 2. 赤外線データの処理方法の効率化に関する検討

### 2.1 ロックイン法のデータ処理

検討を行っているロックイン計測による非破壊検査手法は、元々金属材料などの分野で開発された手法<sup>4)</sup>である。金属を対象とした場合には、熱伝導率がコンクリートに比べて極めて大きいいため、数秒周期の加熱-冷却を何サイクルも繰返し計測することが可能である。このため周期的な表面温度変動を同周期の正弦波と相関処理することにより、微小な温度変化を強調し、計測の高精度化を図ることができる。一方、コンクリートを対象にした場合、熱伝導率が小さいため、内部まで熱を伝えるには少なくとも分単位での加熱が必要となり、加熱-冷却を繰返して計測を行うことは、検査効率から現実的ではない。また、コンクリートを加熱するには大型の加熱装置が必要となり、加熱中の赤外線画像の撮影

\*1 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 工修 (正会員)

\*2 大阪大学大学院 工学研究科機械システム工学専攻 助教授 工博 (正会員)

\*3 大阪大学大学院 工学研究科機械システム工学専攻 教授 工博

では加熱装置の反射や送風の影響を避けるのが困難である。したがって、図-1に示すように、1回の加熱-冷却サイクル中の冷却過程の計測で得られた温度変化曲線に式(1), (2), (3)に示す処理を行って正弦波に対する位相差を算出していた。これまでの検討で位相分布画像において健全部と欠陥部間の位相差には欠陥の深さ情報が含まれ、測定周期を変化させた場合に欠陥部に生じる位相差は図-2に示すように変化することが明らかになっている<sup>3)</sup>。図-2に示した位相差の大きさは、コンクリートの品質や加熱強度などの要因により変化するため、欠陥深さを精度良く推定するためには加熱時間を変化させた場合の位相差の増減に着目することが必要である。したがって、1検査面に対して加熱時間を変化させ2, 3回の計測が必要となる。

$$\Delta V_{\sin} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N V(i) \cdot \sin\left(\frac{2\pi i}{N}\right) \quad (1)$$

$$\Delta V_{\cos} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N V(i) \cdot \cos\left(\frac{2\pi i}{N}\right) \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta V_{\sin}}{\Delta V_{\cos}}\right) \quad (3)$$

V(i):i番目の赤外線強度

N:取得画像数

$\Delta V_{\sin}$ ,  $\Delta V_{\cos}$ :正弦波, 余弦波と同期する赤外線強度信号の成分の変動振幅

$\theta$ :参照信号(正弦波)に対する位相  
(以後、位相と称する。)

## 2.2 データ処理方法の改良

### (1) 検討方法

これまでの処理方法では、1回の加熱-冷却サイクルからただ1つの計測値(画像)しか得られず、赤外線時系列データに含まれる内部欠陥の情報を効率的に抽出できていない可能性が高い。例えば図-2では、深さ20mmの欠陥が測定周期10~30分の測定で正の位相差により検出されるのに対して、周期を40分とすると位相差がほぼ消失して検出できなくなる。そこで、検査対象物に対して与えた熱波動が検出したい欠陥まで到達してさえいれば、計測データにはその

影響が必ず含まれていると考え、1つの時系列データに対して異なる周期の参照信号を用いた式(1), (2), (3)の処理を行う手法について検討を行った。この手法は、図-1の参照信号の周期のみを変化させ、健全部と欠陥部の位相差をそれぞれ算出することに相当し、加熱直後からその影響が現れる相対的に浅い欠陥の情報、冷却過程の後半に主に影響が現れる深い欠陥の情報などを効率的に抽出できることを期待したものである。

### (2) 測定方法

図-3に示す模擬的ななく離欠陥を含む試験

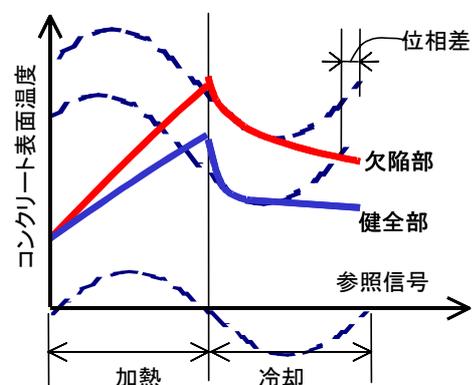


図-1 ロックイン処理

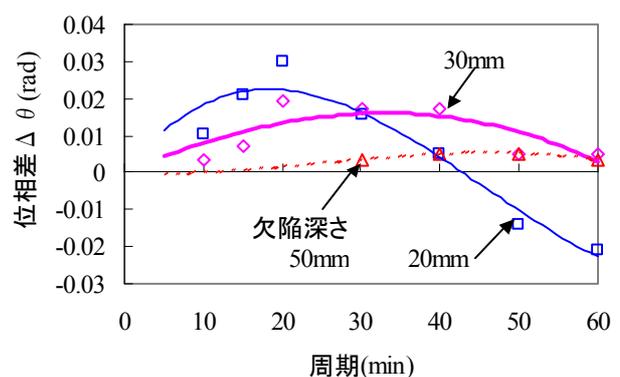


図-2 測定周期と欠陥部位位相差の関係<sup>1)</sup>

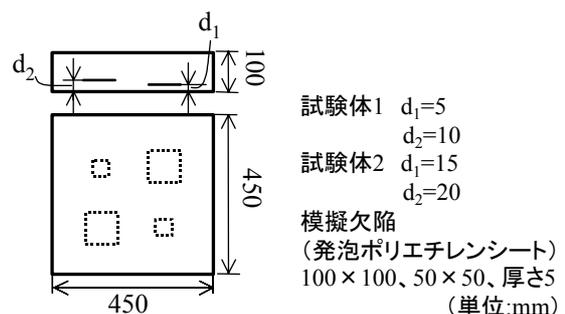


図-3 模擬欠陥試験体(小型)

体を強制加熱-冷却した際の赤外線時系列データを用いて、上述したデータ処理方法に関する基本的な検討を行った。試験体に対して、灯油焚きの放射式直火形ヒータ（熱出力 38.8kW）を 2m の位置に配置し、加熱時間を 5 分とした。この加熱条件では、コンクリート表面温度の上昇は 8°C 程度である。

赤外線データの収集は、マイクロボロメータを搭載した非冷却型の赤外線サーモグラフィ（検出波長 8~13 $\mu$ m, NETD 値 0.1°C, 画素数 320 $\times$ 240）により、加熱終了後の 20 分間実施した。赤外線画像の収集間隔は 1.7 秒とし、1 回の計測当たり約 700 枚である。

### (3) 処理方法

赤外線画像中の 100 $\times$ 100mm の欠陥部を横切る 300mm, 60 ピクセル分のラインに着目し、各画素の時系列データに対して、式(1), (2), (3)に示すデータ処理を行った。ただし、N は取得した全画像数ではなく、5, 10, 15 分間に収集した画像数とし、それぞれの期間内の時系列データ

のみを処理することにした。N は参照信号の周期と比例関係にあるから、結局、1 つの時系列データに対して参照信号の周期を変化させた 3 組の処理結果が得られた。

### 2.3 検討結果及び考察

加熱時間を 5 分、参照信号の周期を 5, 10, 15 分とした場合の位相のラインプロファイルを図-4及び図-5に示す。欠陥の深さが 5mm の場合、欠陥部と周辺健全部の位相差は周期 5 分で最も大きく、周期が長いほど位相差が減少した。一方、欠陥の深さが 20mm の場合には、周期 5 分で 5mm の欠陥とは逆向きの位相差が生じ、周期 10, 15 分では位相差が反転した。参照信号の周期の変化に伴う欠陥部の位相差の変化が欠陥の深さによって異なることから、位相差には欠陥の深さ情報が含まれると考えられる。これは、図-6及び図-7に示す赤外線強度の時間変化曲線の一例から明らかなように、冷却過程での温度変化曲線の比較において、健全部との曲線の形状の違いが顕著になる時間帯が欠陥の深さに

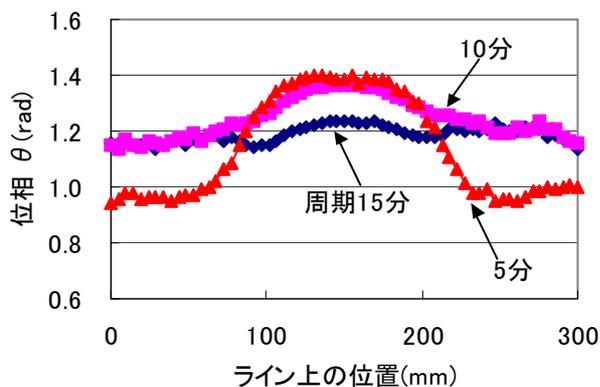


図-4 位相のラインプロファイル(欠陥深さ5mm)

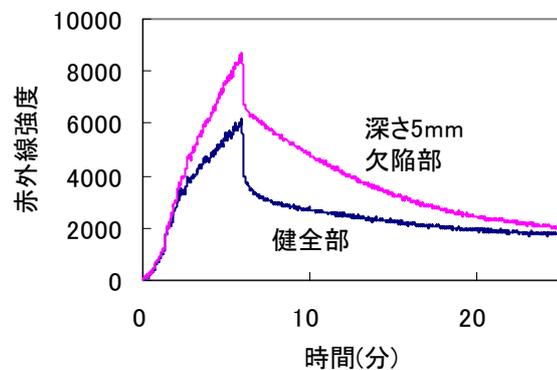


図-6 赤外線強度(温度)の変化曲線(試験体1)

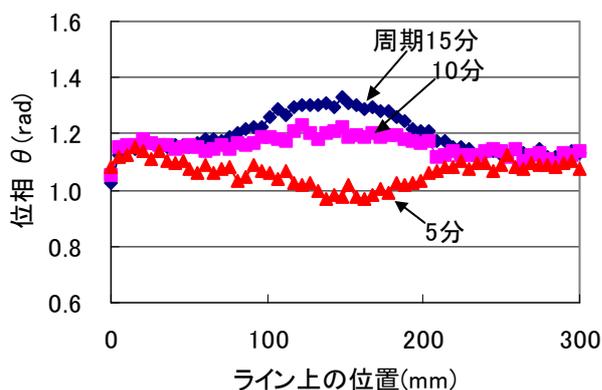


図-5 位相のラインプロファイル(欠陥深さ20mm)

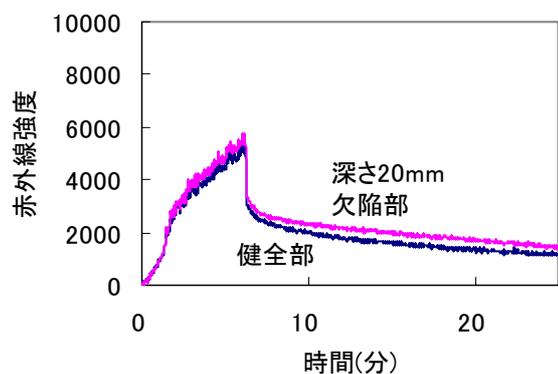


図-7 赤外線強度(温度)の変化曲線(試験体2)

よって異なるためだと考えられる。深さ 5mm と浅い欠陥では早期に健全部の温度降下曲線との差が現れるのに対して、深さ 20mm と相対的に深い欠陥では浅い欠陥に比べてその差は小さいものの長期間持続する。本論文で算出した位相は、このような温度変化曲線の形状の特徴を適切に抽出したものであると考えられる。なお、**図-6**及び**図-7**の縦軸の赤外線強度は、エネルギーの次元を持つと考えられるPCに取込まれた信号値であり、Stefan-Boltzmann の法則を用いて温度に変換可能である。

### 3. 改良したデータ処理の検証

前章で1回の加熱-冷却により収集された赤外線データから欠陥の深さ情報が得られると判断されたため、欠陥深さを推定するための基礎データを収集すべく、模擬的なはく離欠陥を含む試験体を用いた実験を実施した。

#### 3.1 実験概要

**図-3**に示した小型の試験体に加えて、**図-8**に示すより深い欠陥を含む大型試験体を用いた。また、検査効率を向上するため、試験体とヒータの距離を 0.5m とし、加熱時間を 2 分に短縮した。ヒータ距離を小さくしたため加熱強度が増大し、表面温度上昇量は前章での実験よりかなり大きく 25°C 程度である。2 分程度の加熱時間では、加熱強度を増加させても欠陥のある 50mm の地点まで加熱中に熱波動は到達しない。しかし、既報<sup>5)</sup>で報告したように、表面温度を大きく上昇させれば加熱終了後も内部への熱伝導

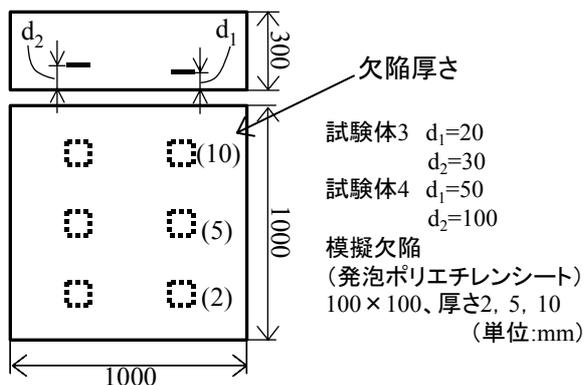


図-8 模擬欠陥試験体(大型)

が継続し、加熱開始から 15 分程度で深さ 50mm 程度まで熱が到達すると考えられる。なお、試験体 4 には深さ 100mm の欠陥も埋設しているが、検出は困難であり検討から除外している。また、用いたヒータの加熱板の寸法が 1 台当り 0.40×0.60m であるため、**図-8**の 1×1m の大型試験体を加熱する場合には、中心部のみが加熱され面内の熱移動が非常に大きくなることが懸念された。そこで、大型試験体を加熱する際は、ヒータ 2 台を縦に並べ、それを検査面に対して 0.50m/min の速度で平行移動しながら 3 分間加熱を行い、実質加熱される時間が 2 分程度となるようにした。赤外線データの測定方法は前章に示したものと同様であり、加熱終了後 20~40 分間測定を実施した。時系列データの処理を前章と同様に行い、参照信号の周期を変化させた場合の各試験体の模擬欠陥を横切るラインの位相分布を算出した。

#### 3.2 実験結果及び考察

データ処理結果の一例として、試験体 3、深さ 30mm、厚さが 2、5、10mm の欠陥部中心を横切る位相ラインプロファイルを**図-9**に示す。前章において示したヒータと試験体の距離を 2m として 5 分間加熱を行った場合と同様に、位相分布曲線の健全部と欠陥部の位相値には差異が見られた。位相値を健全部と欠陥部でそれぞれ平均化し、両者の差を欠陥部の位相差として算出した。参照信号の周期と位相差の関係を模擬欠陥の深さごとに整理したものを**図-10**及び**図-**

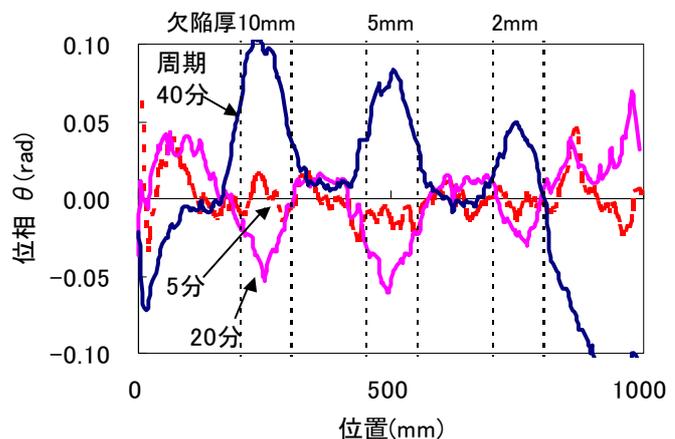


図-9 位相のラインプロファイル(試験体3、欠陥深さ30mm)

11 に示す。いずれの深さの欠陥においても、位相差が正のピークを示す周期が存在し、周期が長くなるに従い減少に転じ、負の位相差が増大する傾向を示した。そして、位相差が正のピークを示す周期は、欠陥の深さが大きいほど長くなった。また、今回の実験で最も浅い深さ 5mm の模擬欠陥においては、位相差が周期 5 分以上で逆に増加する傾向も見られた。図-10 及び図-11 に示した参照信号周期と位相差の関係は、図-2 で示した従来のデータ処理手法におけるものとはほぼ相似の形状となっている。したがって、参照信号の周期を変化させた場合の欠陥部の位相差の変化より、これまでのロックイン法と同様の欠陥深さ推定を行える可能性があることが明らかになった。

### 3.3 位相分布画像による検討

前節まで、改良したデータ処理方法による欠陥の検出および深さの推定の可能性を検討するため、データ処理量を考慮して欠陥を横切るラインプロファイルによる検討を行ってきた。これが有用であると判断されたため、参照信号の周期を変化させた場合の位相分布画像を作成した。試験体 1 の周期 5、10、15 分の位相分布画像を図-12 に示す。位相のコントラストにより欠陥部の形状が明確に検出可能である。位相分布画像から周期を変化させた位相分布画像に対して、図-10 及び図-11 に示した周期と位相差の関係を用いて欠陥の深さが推定でき、欠陥の 3 次元的な形状、配置を推定することが可能であると考えられる。

本論文では、欠陥の深さを推定可能であると

いう特徴をもつ、ロックイン法の測定効率を改善するため、模擬試験体による実験データを用いてデータ処理方法の検討を行った。現時点で想定される、本手法を用いた検査手順を図-13 に示す。1 つの検査面に対して 1 回の強制加熱-冷却を行い、赤外線画像の時系列データを収集し、その後のデータ処理により欠陥の 3 次元的な配置の把握を行う。この場合、現地での検査時間は従来のアクティブ赤外線サーモグラフィ

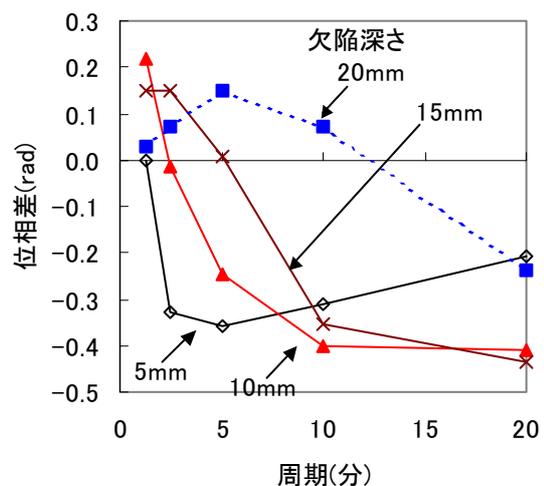


図-10 欠陥部位相差と周期の関係(試験体1, 2)

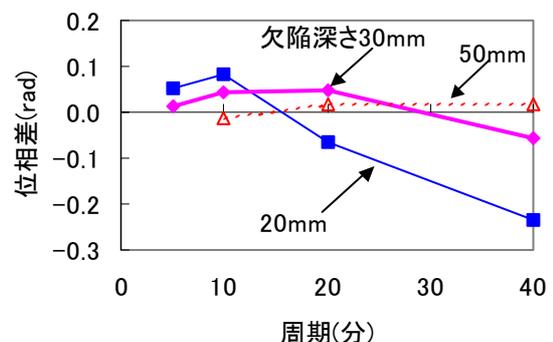


図-11 欠陥部位相差と周期の関係(試験体3, 4)

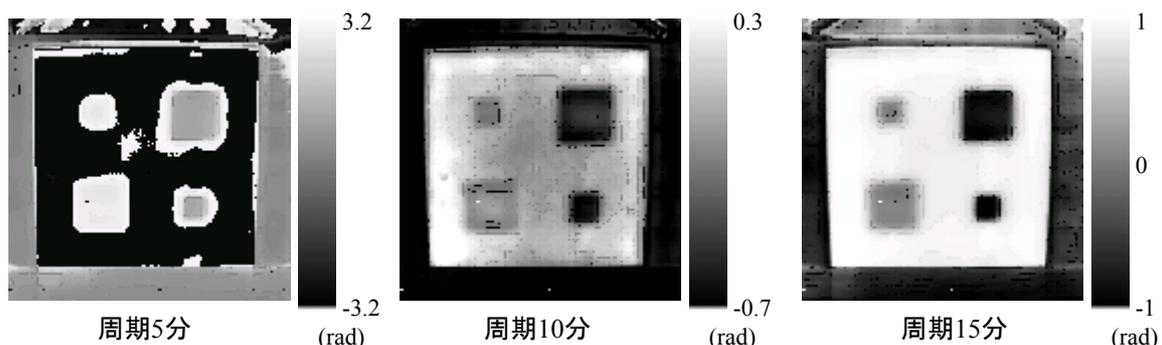


図-12 位相分布画像(試験体1, 左:欠陥深さ10mm, 右:5mm)

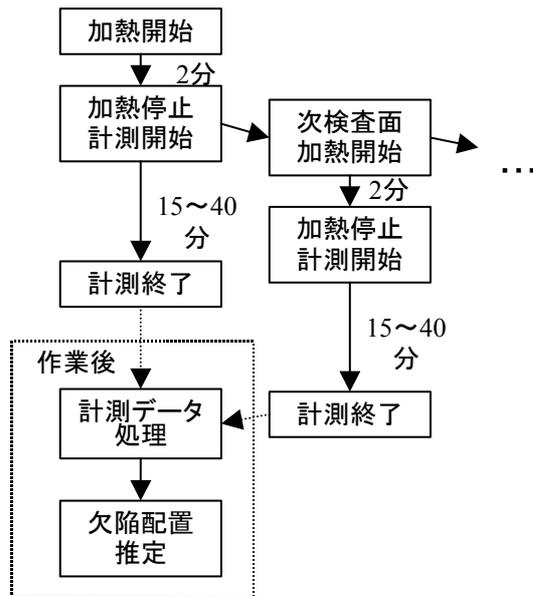


図-13 計測手順  
(検査深さ50mmと仮定)

法による検査と同等程度にすることが可能であり、検査効率は大幅に向上する。強制加熱時間は、ヒータの加熱強度を上げたことにより2分程度にまで短縮されたが、ヒータの種類やその配置方法を改善することにより、もう少し短縮できる可能性もある。しかし、赤外線画像の時系列データの収集時間は、深さ50mmまでの欠陥を検出対象とした場合、強制加熱による熱が深さ50mmの地点まで到達すると考えられる15分以上は最低限必要であると考えられる。

今後の課題として、実構造物の赤外線画像の時系列データを蓄積し、改良した検査方法による欠陥の深さ推定精度を検証する必要がある。また、欠陥の厚さ、寸法の影響や欠陥が斜めに配置されている場合の深さ推定方法については、今後実験や解析により詳しく検討を行う予定である。さらに、実環境において時系列データのサンプリング間隔が測定精度に与える影響を明らかにし、1台の赤外線サーモグラフィで複数の検査面を並列に測定を行うなど、より効率的かつ高品位な検査結果が得られる検査方法を検討する必要がある。

#### 4. まとめ

赤外線サーモグラフィによるコンクリート構

造物の非破壊検査方法であるロックイン赤外線サーモグラフィの検査効率の改善を目的とし、データ処理方法の改良の検討を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 一定時間の強制加熱後の温度降下曲線に対して、参照信号である周期を任意に変化させた正弦波との相関処理を行い、得られた位相値から欠陥の深さ情報が得られることが明らかになった。
- (2) この信号処理における、参照信号の周期に対する健全部-欠陥部間の位相差の変化より、欠陥の深さを推定できると考えられる。
- (3) この手法によれば、従来のロックイン法による欠陥の検出、深さ推定に比べて1検査面に対する検査時間が大幅に短縮され、検査効率の向上が期待できる。

#### 参考文献

- 1) 谷川恭雄, 森博嗣, 安龍男: サーマグラフィによるRC構造物の内部欠陥探査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.349-354, 1988.6
- 2) 柳内睦人, 魚本健人: 熱赤外線計測技術によるコンクリート構造物内空隙・鉄筋の判読に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.442/V-16, pp.91-100, 1992.2
- 3) 山本隆久ほか: ロックイン赤外線サーモグラフィによるコンクリート構造物の非破壊検査, 日本機械学会関西支部第76期定期総会講演会講演論文集, pp.15-16, 2001.3
- 4) 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, メインテナンス, No.202, pp.14-20, 1997.3
- 5) 中村士郎ほか: アクティブ赤外線サーモグラフィ法における加熱方法に関する検討, 土木学会第58回年次学術講演会講演概要集V部門, pp.823-824, 2003.9