

# 論文 赤外線サーモグラフィによる RC 建造物の鉄筋腐食性状評価における熱画像処理方法の検討に関する研究

今井 高弓<sup>\*1</sup>・矢野 早織<sup>\*2</sup>・大下 英吉<sup>\*3</sup>・林 詳悟<sup>\*4</sup>

要旨：著者が提案しているコンクリート表面温度性状に基づく RC 建造物における鉄筋腐食の非破壊検査手法の骨子は、腐食生成物の熱的特性に着目したものであり、その存在によりコンクリート表面の温度性状に変状が生じるものである。その際鉄筋を均一に加熱することが重要であるが、鉄筋が格子状に配筋された箇所においては電磁誘導加熱の特性によって鉄筋が非常に高温となり、コンクリート表面の温度上昇量が大きく検査精度に問題があった。本研究では、鉄筋腐食性状をより鮮明に可視化することのできる熱画像処理方法について検討を行い、画像処理を適用することの有用性を示した。

キーワード：非破壊検査，電磁誘導，鉄筋腐食，鉄筋格子，画像処理

## 1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート建造物の早期劣化が社会問題となり、各種劣化性状を簡便かつ高精度な診断を可能とする手法の新たな開発ならびに現存する手法の高機能化が求められている。各種劣化性状の中でも特に、鉄筋の腐食は構造性能や耐久性能を低下させるばかりか、建造物の崩壊にもつながる非常に重要な問題である。

著者らはコンクリート内部に存在する剥離、空洞、鉄筋の腐食といった各種劣化現象を非破壊かつ非接触によって定性的かつ定量的評価を可能とする非破壊検査システムの構築に着手している<sup>1)~3)</sup>。システムの概要は、鉄筋コンクリート建造物内部の鉄筋を電磁誘導法によって強制的に加熱させ、コンクリート表面の温度性状を赤外線サーモグラフィカメラで測定した熱画像を処理し、その温度の値や分布性状からコンクリート内部における上述した各種劣化現象を評価するというものである。この際、熱源となる鉄筋を如何に均一に加熱するかが、本手法による測定精度に通じることとなる。

電磁誘導の特性上、コイル形状によっては加熱むらが生じるため、既往の研究<sup>2)</sup>においてはまず、加熱むらを生じさせず加熱効率も最適となるコイル形状を決定した。そして、一方向に配筋された鉄筋コンクリート建造物において、鉄筋の温度制御に対する有効性が確認された。

しかしながら、電磁誘導加熱による加熱効率は、コイルから磁性体である鉄筋までの距離、すなわちかぶりと鉄筋量に大きく依存するため、主筋と配筋筋あるいはせん断補強筋の結束箇所では結束線の影響も加わり非常に高温となる問題があった。さらに、鉄筋同士で格子が形成されると、渦電流に加えて格子を1周する電流が生じ

(以下、ループ電流と称す)、一様な鉄筋温度の制御が困難となった。それにより、鉄筋上で発生した加熱むらがコンクリート表面に伝播することで、格子部直上における表面温度性状に影響を及ぼし、鉄筋の腐食性状評価の妨げとなるという問題が生じた。<sup>1)</sup>

本研究では、上述した鉄筋の結束箇所における鉄筋に発生する加熱むらによる影響を解消し、鉄筋腐食性状をより鮮明に可視化することのできる熱画像処理方法を適用するとともに、その有用性について検討する。

## 2. 本システムにおける画像処理方法<sup>4)</sup>

従来の本システムにおける熱画像は、画像処理を行っていない元データの状態で解析を行っていたが、電磁誘導の特性によって発生する鉄筋の加熱むらの影響により、鉄筋格子等の建造物において鉄筋の腐食性状評価の精度に問題があった。

林等<sup>4)</sup>は、赤外線サーモグラフィを用いたコンクリート表面の浮き・剥落部の高精度な検出を行う手法として、熱画像に対する画像フィルター処理に関する研究を実施し熱画像に面的な画像フィルター処理を行うことの有用性を示している。本研究においては、鉄筋の加熱むらによる影響を除去することを目的として、林等の手法を鉄筋軸直交方向に対し線的な画像フィルター処理を行う。

本章では、本システムを用いて撮影した熱画像に対し画像フィルター処理を行うことで加熱むらによる影響を軽減するための画像フィルター処理方法のアルゴリズムについて論じる。

### 2.1 熱画像上の加熱むらの除去

鉄筋の加熱むらがコンクリート表面の熱画像に及ぼす

\*1 中央大学 理工学部土木工学科 (学生会員)

\*2 中央大学 理工学部土木工学科 (学生会員)

\*3 中央大学 理工学部都市環境学科教授 工博 (正会員)

\*4 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 技術部 (正会員)

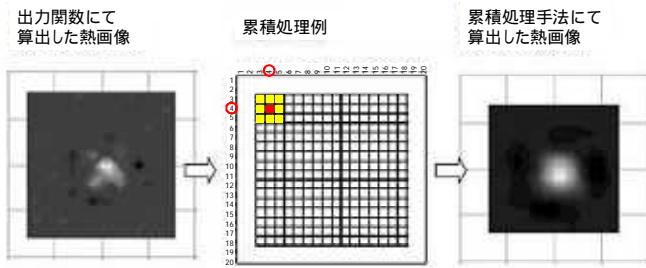


図 - 1 ピクセル間の補間手法（累積処理の利用）

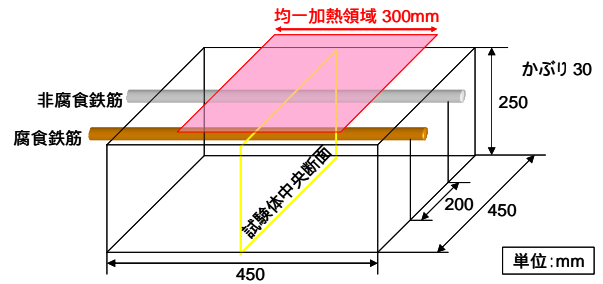


図 - 2 試験体の形状寸法

影響を除去するために、温度分布の移動平均を求めて、対象ピクセルの温度を引算することとした（以下、強調指標）。この指標を用いると、コンクリート表面に及ぼす鉄筋の加熱むらの影響を軽減することが可能となる。強調指標を画像上で行と式(1)で表現できる。

$$g(i, j) = \sum_{j=n}^{N-n} \sum_{i=n}^{M-n} [f(i, j) - \mu(i, j)] \quad (1)$$

ここで、

入力画像： $f(i, j)$

出力画像： $g(i, j)$

$$\mu(i, j) = \frac{1}{(2n+1)^2} \sum_{l=-n}^n \sum_{k=-n}^n f(i+k, j+l)$$

$n$  = 撮影距離によって変更する。

## 2.2 検出素子間のばらつき軽減方法

### (1) 出力関数を用いた温度変化部の強調

赤外線サーモグラフィカメラの検出素子間の測定誤差や測定対象物のばらつきがある場合、温度変化を捉えにくくなる。すなわち、ばらつきが大きくなると温度変化の抽出が困難となるため、出力関数を用いてばらつきを除去することとした。なお、この関数にはロジスティック関数が適している。

### (2) ピクセル間の補間方法

赤外線サーモグラフィカメラの画素数が少ないとピクセル間を補間することが必要となる。このため、ある範囲の累積値を 1 画素情報に置き換える手法を採用した（図 - 1）。この手法は温度分布情報から、図中の網掛けの 3×3 画素部分の温度差を累積し、この範囲の中心画素である画素番号(4,4)の温度情報として温度分布図を再作製したものである。この処理を行うと、熱画像におけるコンクリート表面の温度性状のばらつきを軽減することが可能となる。

## 3. 画像処理の適用によるコンクリート表面温度性状の可視化

前章では熱画像に対して適用する画像フィルター処理のアルゴリズムについて論じた。本章では、既往の研究において得られた熱画像に対して、前章で論じた画像フ

表 - 1 実験条件

試験体名称	K30-C 0.66
加熱時間(秒)	320
コイル負荷電力(kW)	2.0
鉄筋温度上昇量( )	14.7
平均腐食率(%)	0.66
外気温( )	23.7

ィルター処理を適用するとともに、その有用性について検討する。

### 3.1 鉄筋が全面腐食した試験体

本節では、全面に渡って鉄筋が腐食した RC 部材に本システムを適用して得られた熱画像に対して、画像処理を行うことで、より鮮明な鉄筋腐食性状の可視化が可能であるかを検討する。

#### (1) 実験概要

実験概要を図 - 2 に示す。かぶり 30mm の試験体を対象として、本システムを適用し、コンクリート表面の温度性状を確認した。

鉄筋は D16(SD295)であり、かぶり 30mm の位置に 200mm の間隔で 2 本配筋し、一方は軸方向全長に渡って比較的均一な腐食を生じた腐食鉄筋で、もう一方は非腐食鉄筋である。鉄筋の腐食方法に関しては、電食によって腐食させると腐食ひび割れが発生し、ひび割れの持つ断熱効果によって、コンクリート表面温度性状に影響を及ぼす。そのため、鉄筋を大気中に暴露することによって腐食させ、所定の位置に設置した後にコンクリートを打設することにより作製し、腐食ひび割れの無い状態で腐食生成物の加熱特性を確認した。

実験パラメータは表 - 1 に示すとおりで試験体名称は かぶり 腐食率の順とし、K30-C0.66 と表記することとする。表中の平均腐食率とは、対象鉄筋を 10%濃度のクエン酸アンモニウム水溶液に 24 時間浸漬させ腐食生成物を除去した後の質量を、事前に測定した鉄筋質量で除した値である。

#### (2) 熱画像フィルター処理の適用

図 - 3 に K30-C0.66 試験体の加熱停止 180 秒後のコンクリート表面の熱画像を示す。図中の白枠は試験体上面

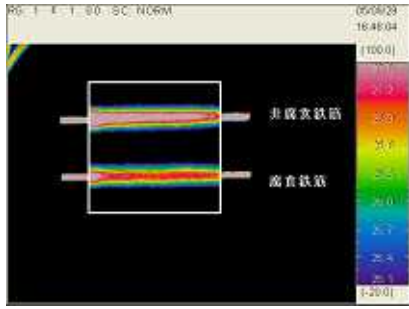


図 - 3 コンクリート表面の熱画像  
(K30-C0.66 試験体 加熱停止 180 秒後)

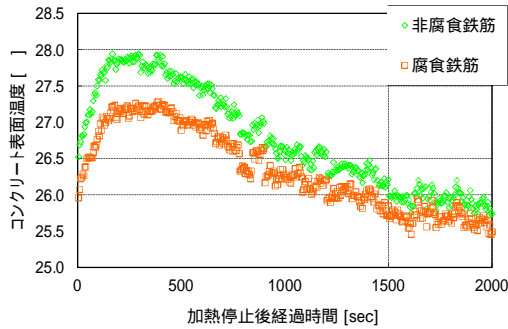


図 - 4 コンクリート表面の温度履歴  
(K30-C0.66 試験体)

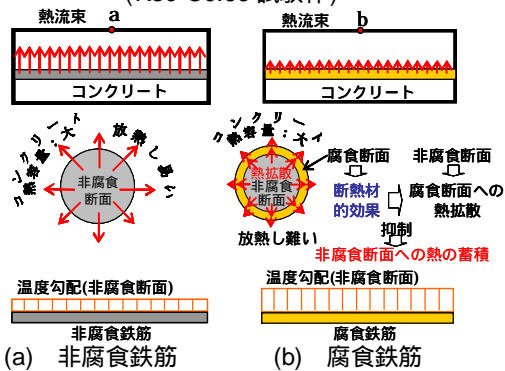


図 - 5 腐食の有無によるコンクリート表面温度性状

であり、その領域外の高温部分は、露出させた鉄筋である。腐食鉄筋および非腐食鉄筋直上のコンクリート表面温度を相対的に比較すると、腐食鉄筋直上では温度が低くなっていることが確認できる。

図 - 4 は図 - 2 に示した試験体中央断面における鉄筋直上のコンクリート表面の温度履歴を示したものである。いずれの試験体においても、腐食鉄筋直上のコンクリート表面温度は、非腐食鉄筋直上のものと比べ温度が低なっていることがわかり、その差異は最大で 0.5~0.9 ほど低くなっている。このような鉄筋腐食の有無による一般的な傾向は、図 - 5 に示すように、腐食生成物の有する断熱材の効果によって鉄筋の非腐食断面からコンクリートへの熱の拡散が遮断されるため、それによりコンクリート表面の温度上昇量が低くなるためである。

しかし、図 - 3 の熱画像における各鉄筋単体の温度性状に着目すると、いずれの鉄筋も左側において高温、右

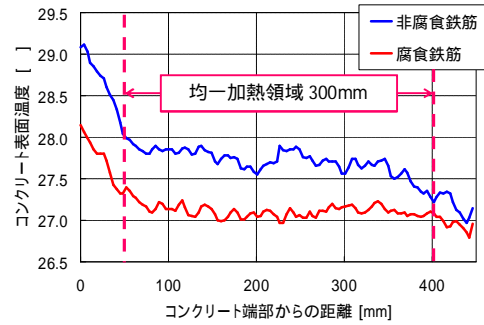


図 - 6 コンクリート表面温度が最大となる時点での温度分布 (K30-C0.66 試験体)

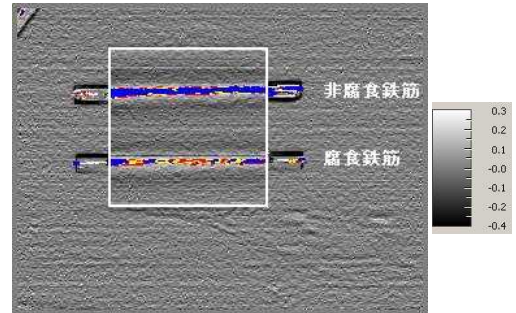


図 - 7 画像処理後のコンクリート表面の熱画像  
(K30-C0.66 試験体 加熱停止 180 秒後)

側において低温となっている。また、図 - 6 に示す加熱停止後のコンクリート表面温度が最大となる時点での、非腐食鉄筋および腐食鉄筋直上の温度分布では、電磁誘導コイルの均一加熱領域外において温度差が生じていることがわかる。これらの温度性状から、コイルによる加熱むらが生じていることが確認でき、このような加熱むらも本システムの測定精度に影響を及ぼすことが考えられる。

次に、電磁誘導コイルの加熱むらによる影響を軽減しより鮮明に鉄筋の腐食性状評価を行うために、撮影した熱画像に対し鉄筋軸方向に線的なフィルター画像処理を適用する。図 - 7 は図 - 3 の熱画像に画像処理を適用した画像である。画像処理はコンクリート表面温度差の大きい鉄筋直上部に着目して、線的な温度差抽出を行っている。また、判定画像では健全な状態にある鉄筋を青で表示し、鉄筋の腐食率の進行度合いに伴って、黄と赤で表示している。図 - 3 の処理前の熱画像と図 - 7 の処理後の熱画像を比較すると、鉄筋の腐食領域がより鮮明に可視化され、非腐食鉄筋と腐食鉄筋の差異がより明確になっていることがわかる。図 - 3 の熱画像の各鉄筋の両端部では左右で加熱むらにより温度差が確認されたことに対し、図 - 7 の処理後の熱画像においてはほぼ軸方向に一樣な状態となっており、加熱むらの影響はほぼ除去されている。また、矢野等の研究<sup>3)</sup>において解析によって得られた健全鉄筋上の表面温度を閾値に設定することで、鉄筋の状態が未知の場合に対しても画像処理は適用



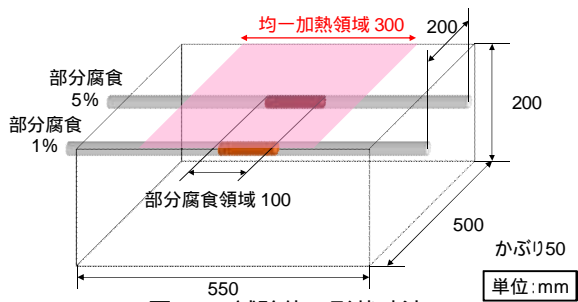
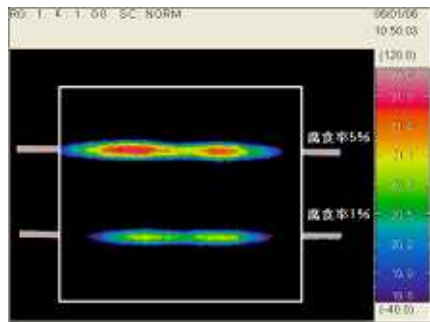
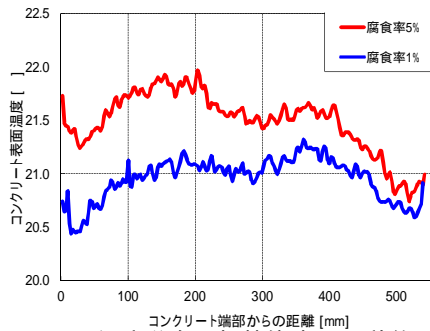


図 - 8 試験体の形状寸法



(a) 熱画像 (加熱停止 180 秒後)



(b) 温度分布 (加熱停止 180 秒後)

図 - 9 かぶり 50mm 試験体の温度性状

できると考えられる。これらのことから、熱画像に画像処理を適用することは有用性があると言える。

### 3.2 鉄筋が部分的に腐食した試験体

前節では、全面に渡って鉄筋が腐食した鉄筋直上のコンクリート表面の熱画像に対して熱画像処理を適用し、より鮮明に可視化した。本節では、鉄筋が部分的に腐食した場合におけるコンクリート表面の熱画像に対して熱画像処理を適用した結果について検討を行う。

#### (1) 実験概要

試験体の形状寸法は図 - 8 に示すとおりで、550×500×200mm で、かぶり 50mm の位置に 200mm の間隔で 2本の鉄筋を配筋する。2本の鉄筋は D16(SD295)で、それぞれ中心領域 100mm が 1%、5%となるように部分的に腐食させている。試験体の作製方法は 3.1 節と同様で、鉄筋を腐食させない領域はエポキシでコーティングした状態で鉄筋を大気中に暴露した。

#### (3) 熱画像フィルター処理の適用

図 - 9(a)は試験体の加熱停止 180 秒後の熱画像で、上段の鉄筋の腐食率は 5%、下段の鉄筋は 1%である。この

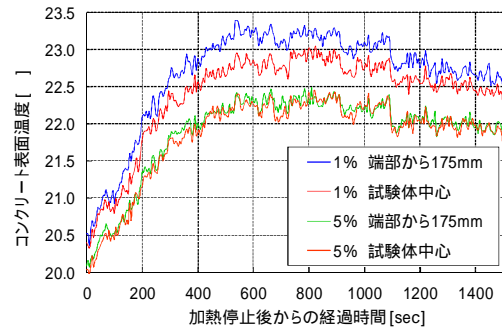
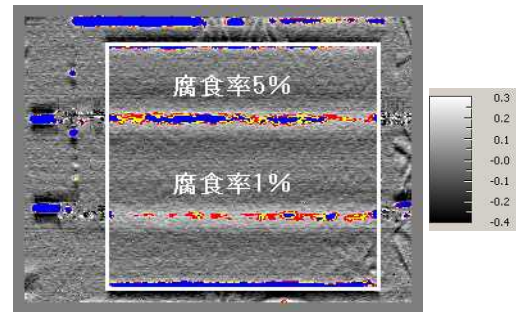
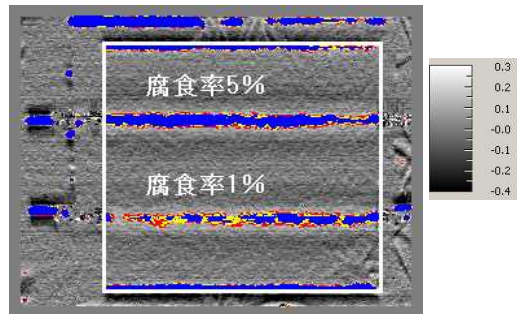


図 - 10 かぶり 50mm 試験体の温度履歴



(a) 画像上側の鉄筋に着目して補正



(b) 画像下側の鉄筋に着目して補正

図 - 11 画像処理後のかぶり 50mm 試験体の熱画像

熱画像から、鉄筋腐食の有無は軸方向における温度の相対的な比較により評価可能であるが、非腐食領域と腐食領域のコンクリート表面温度の相対的な温度差が小さく、温度が低い領域も実際の腐食領域よりも狭くなっている。

図 - 9(b)は加熱停止 180 秒後における試験体の鉄筋直上部分の温度分布である。この図においても、腐食領域と非腐食領域のコンクリート表面温度差は、いずれの腐食率においても小さく、腐食の影響が確認し難くなっている。図 - 10 に示す試験体の中央部における鉄筋直上部分のコンクリート表面の温度履歴においても同様の傾向が確認できる。

これは、非腐食領域および腐食領域に存在する非腐食鉄筋断面において鉄筋軸方向に急激な温度勾配が生じ、腐食領域上のコンクリートに非腐食領域からの熱が拡散する。そこから腐食領域上のコンクリートへの熱の回り込みが生じたことによって、腐食領域上のコンクリートが加熱され、コンクリートの表面温度が高くなり、表面温度の低い領域が小さくなった。また、既往の研究から

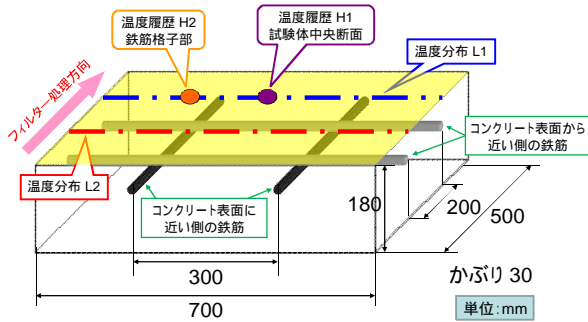


図 - 12 実験概要

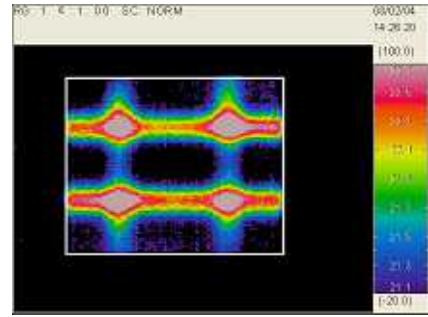
かぶり大きいほどその影響は大きくなることが確認されている。

図 - 11(a)および(b)は、図 - 9(a)の熱画像に 3.1 節と同様の画像フィルター処理を適用した熱画像である。図 - 11(a)は判定画像を出力する際の閾値を、画像上における上側の鉄筋の非腐食領域が青で出力されるように閾値を設定し、図 - 11(b)は画像上における下側の鉄筋にも同様の処理を適用した判定画像である。同図(a)および(b)の鉄筋中心部と両端部において、赤および黄に着色され、鉄筋が腐食していると判定されている。なお、端部において鉄筋が腐食と判定された原因は、その領域は電磁誘導コイルの均一加熱領域外であるため、均一加熱領域内の非腐食鉄筋上のコンクリート表面よりも温度上昇量が低くなったわけである。

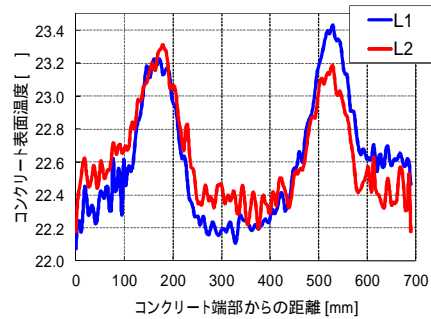
中心領域においては、腐食生成物による断熱効果によりコンクリート表面温度が低くなったことにより、鉄筋が腐食状態にあると判定されている。それにより、均一加熱領域内において、画像処理を適用することで腐食の有無の可視化を明確にすることは可能であると考えられ、鉄筋の状態が未知の場合も 3.1 節と同様に健全鉄筋の表面温度の解析値を用いて閾値を設定することで画像処理を適用することができる。また、既往の研究<sup>2)</sup>において明らかになっている、熱拡散に及ぼすかぶりの影響を考慮すると、かぶりが 50mm よりも小さい試験体では、熱の回り込みによる影響が小さくなるため、本研究で得られた結果よりも鮮明に可視化できる可能性があると考えられる。加えて、コイルを改良することによって均一加熱領域を拡大しコイルの加熱むらを小さくすれば、より効果的に画像処理を行うことが可能であると考えられる。

### 3.3 鉄筋が格子状に配筋された試験体

3.2 節および 3.3 節では、画像処理によって鉄筋腐食の有無を明確にすることが可能であることが示された。しかし、実際の構造物においては、格子状に鉄筋が配筋され、鉄筋同士が結束している箇所が存在する。既往の結果から、他の領域と比べ結束箇所では温度上昇量が非常に高く、腐食性状評価に影響を及ぼすことが確認されている。したがって、本章では鉄筋格子において格子部直



(a) 熱画像



(b) 温度分布

図 - 13 格子部上の表面温度が最高となる時点での温度性状

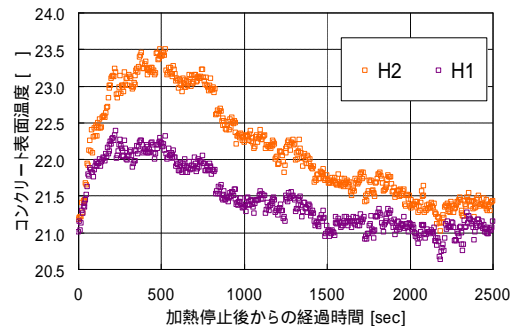


図 - 14 鉄筋中央部および格子部直上の表面温度履歴

上が高温になった熱画像に対し画像処理を行い、画像処理を行うことの有用性について検討する。

#### (1) 実験概要

図 - 12 に試験体の形状寸法と解析条件を示す。格子鉄筋の格子部の影響を検討するために、鉄筋は全て D16(SD295)の健全鉄筋を使用し、コンクリート表面に近い側の鉄筋のかぶりが 30mm、格子間隔が 200×300mm になるように配筋した。

#### (2) 熱画像フィルター処理の応用

鉄筋の格子部直上のコンクリート表面温度が最高となる時点での熱画像と温度分布をそれぞれ、図 - 13(a)および(b)に示す。同図から、格子部直上のコンクリート表面において、温度が非常に高くなり、鉄筋中心部と格子部直上の表面温度差は最大で約 1.2 である。また、図 - 14 に示す鉄筋中央部および格子部直上のコンクリート表面の温度履歴から、長時間が過ぎても鉄筋中央部および格子部直上での温度差が大きいことがわかる。これは

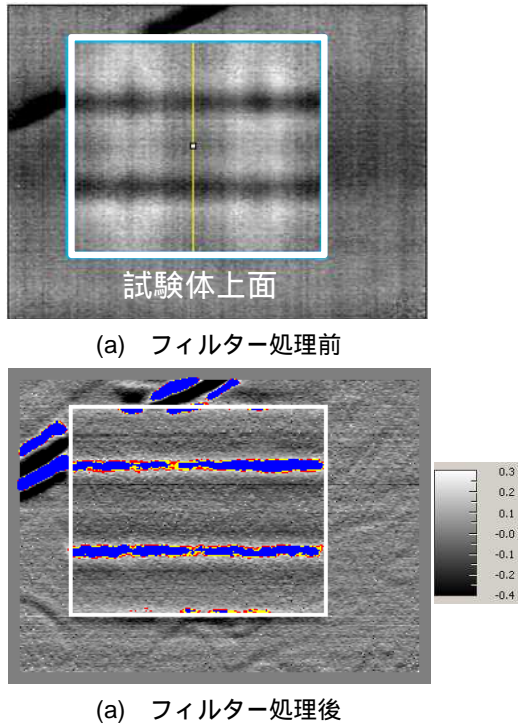


図 - 15 格子試験体の経過時間差分画像

鉄筋格子部における鉄筋量が多く、結束線の影響も加わって、電磁誘導の特性から鉄筋の温度上昇量は大きくなるためである。さらに、鉄筋に発生する渦電流が格子を1周するループ電流が発生するため、接触抵抗の影響により発熱することがわかっている。

本節では撮影した熱画像に画像フィルター処理を適用し、特に鉄筋格子部における高温部分の影響を軽減可能かどうかに着目した検討を行った。

熱画像に施す画像フィルター処理の流れとして、前節までの処理のみでは、結束箇所の影響が除去されないため、元画像から示す経過時間差分画像を作製してから、その差分画像に対し画像フィルター処理を行った。

経過時間差分画像の作製方法に際しては、図 - 13(a)の画像を同図の10分後の画像から差し引くことにより、一定時間経過後の温度低下量が出力された熱画像を作製した。それにより画像上の全体的な温度差を小さくすることで、格子部とその他の領域における温度差も小さくなる。それを利用し鉄筋上の加熱むらを軽減させる。

図 - 15(a)の画像は、図 - 13(a)の格子部のコンクリート表面温度が最大となる時点の熱画像を基準値とし、その時点から10分経過後の差分画像を示したものである。同図において高温となった格子部および表面から遠い側の鉄筋の影響が軽減されていることが確認できる。

図 - 15(b)は同図(a)に画像フィルター処理を適用した熱画像である。表面に近い側の鉄筋に着目して処理を適用したことにより、表面から遠い側の鉄筋の影響が無くなっている。また、鉄筋がほぼ一様に健全であると判定

されていることから、画像フィルター処理を適用することで、鉄筋格子の腐食性状評価を行うことができる可能性があると考えられる。

以上のことから、画像フィルター処理を行う方向をかぶり側の鉄筋軸方向に限定することで、鉄筋格子の格子部において高温となる部分の影響を軽減することは可能であると考えられる。このことはすなわち、鉄筋格子における鉄筋腐食性状評価において本画像処理技術が有用であることを示している。

#### 4. まとめ

本研究では、本システムを用いて計測した熱画像に対し、画像フィルター処理を行うことで、鉄筋腐食の有無をより明確に可視化し、その適用性を評価した。以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1) コンクリート中にかぶり厚が30mmで全面に渡って腐食した鉄筋を配筋した場合、画像フィルター処理を行うことで鉄筋の腐食性状をより明確に可視化することが可能である。
- (2) コンクリート中に100mmの部分腐食を有する鉄筋をかぶり厚50mmの位置に配筋した場合、電磁誘導コイルの均一加熱領域内であれば、画像処理の適用により、腐食の有無を評価することは可能である。
- (3) コンクリート中に健全鉄筋を格子状に配筋した場合、コンクリート表面温度が最大になる時点からの経過時間差分画像を作製し、その画像に対して画像フィルター処理を行うことで鉄筋格子部の高温となる箇所を取り除くことが可能である。

#### 参考文献

- 1) 梅原 稔之, 大下 英吉: 電磁誘導加熱を用いた各種非破壊検査における鉄筋加熱むら解消法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1143-1148, 2008
- 2) 大下 英吉, 堀江 宏明, 長坂 慎吾, 谷口 修, 吉川 信二郎: 電磁誘導加熱によるコンクリート表面温度性状に基づいたRC構造物の鉄筋腐食性状に関する非破壊検査手法, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.1, pp.76-92, 2009
- 3) 矢野 早織, 大下 英吉: コンクリートの表面温度性状に基づく鉄筋腐食の簡易診断手法に関する研究, 第39回土木学会関東支部技術研究発表会公演概要集, V-52, 2012
- 4) 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熱画像診断支援システムの提案, 土木学会年次学術講演会講演概要集論 第6部, Vol.65No.7/VI-159, pp.317-318, 2010