

# 論文 拡張型熱画像処理システムによる鉄筋腐食評価手法の高度化

今井 嵩弓\*1・大下 英吉\*2・林 詳悟\*3・福岡 養祐\*4

**要旨:** 著者らが開発した RC 構造物における鉄筋腐食評価手法は電磁誘導法により内部の鉄筋を強制加熱し、鉄筋からコンクリート表面に伝搬する熱を赤外線サーモグラフィで検知するものである。鉄筋腐食が生じている場合、断熱効果を有する腐食生成物の影響によりコンクリート表面温度が低下するため、熱画像から腐食性状を評価することが可能となる。本研究では、既往の研究において開発した熱画像処理システムを拡張し、デジタル画像処理分野において広く用いられているパターンマッチング法に基づき加熱範囲を検出することで、鉄筋加熱時の加熱むらを除去し、鉄筋腐食率評価における評価精度の向上を図る。

**キーワード:** 非破壊検査, 鉄筋腐食, 電磁誘導, 赤外線サーモグラフィ, 画像処理

## 1. はじめに

RC 構造物の鉄筋腐食は構造性能や耐久性を低下させる重大な劣化要因であり、現在は電気化学的特性値による鉄筋腐食量の推定手法が数多く提案されている。中でも分極抵抗法は腐食量の定量評価が可能とされているが、分極電流はコンクリートを介して測定されるため一様な分極挙動とならず、正確に腐食量を評価可能とはいえない。また、同手法ははつり作業を伴うため、既設構造物における鉄筋の腐食量を評価可能とする非破壊検査手法の開発が急務である。

このような背景から、著者らは電磁誘導によって鉄筋を非接触で加熱し、鉄筋からコンクリート表面へと拡散する熱をサーモグラフィによって計測することで、鉄筋周囲に存在する腐食生成物の定量的評価手法を開発した(以下、本手法と称す)<sup>1)~3)</sup>。腐食生成物は断熱効果を有しているため、鉄筋腐食が生じた際の温度上昇量が健全時の温度上昇量と比べて低下する。既往の研究<sup>2)</sup>で提案した腐食率算定式は非腐食鉄筋 1 本のみが配筋された状態における解析値に対する実測値の低下量から腐食量を評価するものであり、それにより腐食量の絶対評価が可能としている。このとき、実測値に腐食生成物以外の影響により温度差が生じた場合は腐食量の推定値と真値に誤差が生じるため、熱源となる鉄筋を均一に加熱することが、本手法による腐食量の推定精度に通じることとなる。

しかしながら、コイル形状の最適化により電磁誘導コイルの中心近傍の一定領域を均一に加熱することは可能であったが、加熱範囲の端部における温度制御は困難であり、高温および低温の加熱むらが生じた。

また、実構造物においては主筋と配筋が格子状に配筋されたものが多く、そのような構造に対して本手法を

適用した場合、必然的に鉄筋 1 本と比べて鉄筋量がおおくなるため、交差部の発熱量は他の領域に比べて大きくなる。加えて、交差部における結束線は体積が非常に小さい磁性体であることから、電磁誘導適用時の電流密度が大きくなる。その結果、高温となった交差部および結束線から多量の熱がコンクリート表面に拡散するため、鉄筋が均一に加熱されていることが前提の本手法において、腐食率推定精度を低下させることとなる。

これらの問題に対し、既往の研究<sup>3)</sup>においては熱画像に改良型画像処理を適用することで加熱むらの除去を試みた。しかしながら、2 章で後述するが、コイルの均一加熱領域外における低温の加熱むらは鉄筋腐食の影響による温度低下との判別が困難であり、加熱むらの除去は高温加熱むらの方に留まるものであった。また、鉄筋格子については、交差部で生じた加熱むらが近傍領域のコンクリート表面温度に及ぼす影響を評価することが困難であったため、加熱むらの完全な除去はなされなかった。

本研究では、デジタル画像処理分野において広く用いられているパターンマッチング法を熱画像処理システムに応用し、コイル端部の特定の位置において発生する加熱むらを除去し可能なシステムへと拡張する。併せて、高温領域とその近傍領域の加熱むらをより精度よく除去し、鉄筋腐食性状評価の精度向上を図る。

## 2. 既往の研究における本手法の問題点

鉄筋の軸方向に均一な加熱が本手法の前提条件であるが、鉄筋の配筋状態や加熱領域端部においては加熱むらが発生し、腐食率推定精度を低下させることとなる。

本章ではまず、本手法適用時に加熱むらが生じた適用例を示すとともに、加熱むらの解消を目的とした既往の

\*1 中央大学 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

\*2 中央大学 理工学部都市環境学科教授 工博 (正会員)

\*3 西日本高速道路エンジニアリング四国 (株) 技術部 (正会員)

\*4 第一高周波工業 (株) 技術部

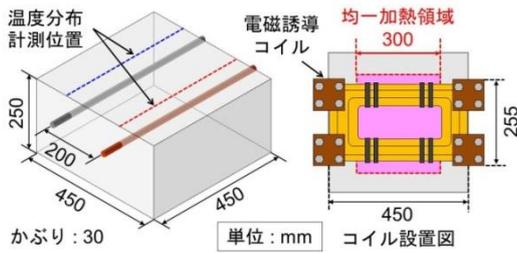


図-1 複鉄筋試験体の実験概要

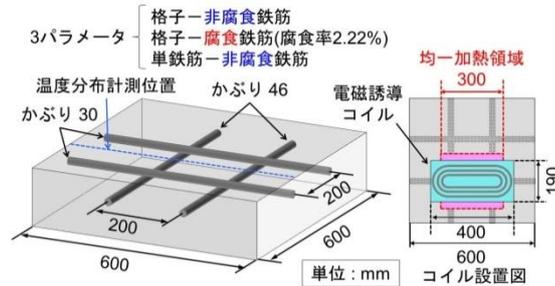


図-4 格子筋試験体の実験概要

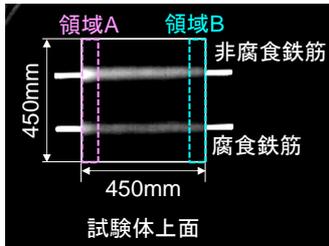
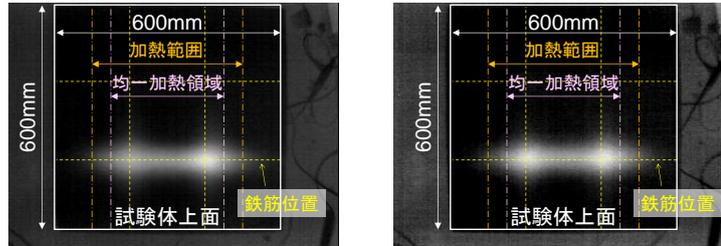


図-2 複鉄筋試験体の熱画像



(a) 非腐食格子試験体

(b) 腐食格子試験体

図-5 格子試験体の熱画像

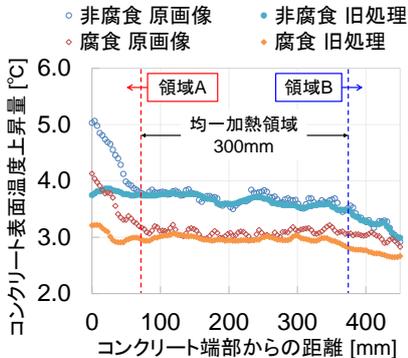
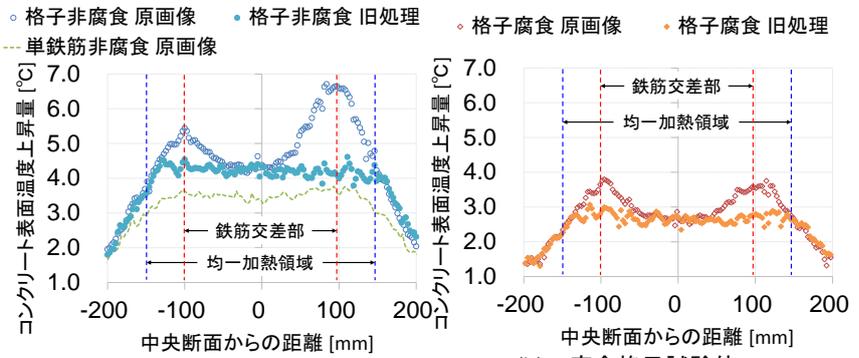


図-3 複鉄筋試験体の温度分布



(a) 非腐食格子試験体

(b) 腐食格子試験体

図-6 格子試験体の温度分布

画像処理システムにおける問題点について論じる。

## 2.1 電磁誘導コイルによる問題点<sup>1)</sup>

### (1) 加熱領域端部における加熱むら

図-1は複鉄筋試験体の形状寸法および電磁誘導コイルを設置した際の上面図である。使用鉄筋はD16異形鉄筋(SD295A)であり、非腐食鉄筋および大気中に暴露することで腐食させた質量減少率0.66%の腐食鉄筋をかぶり30mmの位置に200mm間隔で配筋した。また、電磁誘導コイルの均一加熱領域は300mmであり、コイル中央と試験体中央が重なるように設置した。

この試験体に対して本手法を適用し、加熱停止から180秒が経過した際の熱画像を図-2に示す。同図から、上段の非腐食鉄筋に比べて下段の腐食鉄筋の表面温度が低いことがわかる(明るいほど高温)。

しかしながら、均一加熱領域外の領域A、Bに着目すると、各鉄筋共に領域Aにおいては高温、領域Bにおいては低温の加熱むらが生じている。このような加熱領域端部で生じる加熱むらは電磁誘導コイルの形状によって決定されるものであり、同領域においては本来の温度上昇することとなる。また、実務においては1回の計測でよ

昇量との間に差異が生じるため、腐食率測定精度が低下り広い範囲を評価することが望ましいため、加熱むらを除去し評価可能範囲を拡張する必要がある。

### (2) 既往の画像処理システム適用結果<sup>2)</sup>

図-3は図-2に対して既往の改良型画像処理<sup>2)</sup>を適用する前後の各鉄筋軸直上における温度分布を示したものである。まず、領域Aに着目すると、原画像では高温になっていることに対し、処理後の画像では各鉄筋共に均一加熱領域とほぼ同等の温度になっている。

しかしながら、領域Bにおいては原画像・処理画像共に均一加熱領域に比べて表面温度が低く、低温加熱むらが除去されていないことが確認できる。これは、改良型画像処理においては加熱むら除去方法を差分処理のみとしているためであり、高温加熱むらは除去可能であるものの低温加熱むらには対応できないという問題がある。

また、仮に増分処理を適用するとしても腐食によって生じた温度差と加熱むらとの判別が困難であるため、これらを正確に判別し、低温加熱むらのみを除去可能とする画像処理システムが必要である。

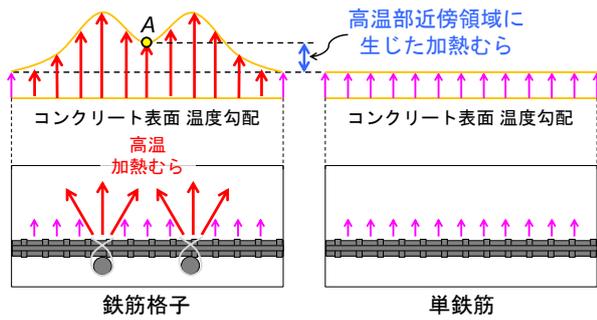


図-7 高温部近傍領域の温度勾配

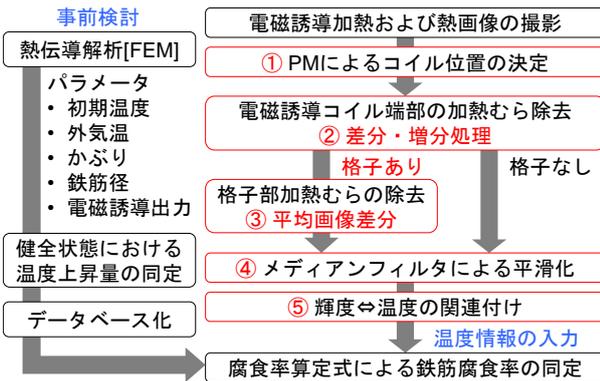


図-8 画像処理適用時のフローチャート

## 2.2 鉄筋の配筋状態による問題点

### (1) 鉄筋格子における加熱むら

鉄筋格子試験体の概要とコイル設置図を図-4に示す。鉄筋は4本共にD16異形鉄筋(SD295A)を用い、本実験の測定対象である横筋のかぶりを30mm、縦筋のかぶりを46mmとし、双方を結束線で固定した。また、試験体のパラメータは非腐食鉄筋を横筋とした非腐食格子試験体、実測の質量減少率が2.21%の腐食鉄筋を横筋とした腐食格子試験体および横筋1本のみを配筋した単鉄筋試験体の計3パラメータとした。

図-5(a), (b)の非腐食格子試験体および腐食格子試験体の熱画像から確認できるとおり、横筋と縦筋が交差する2点においてコンクリート表面温度が非常に高くなっている。これは交差部における鉄筋量が多く、かつ結束線が非常に高温になるためである。

本手法において、鉄筋交差部の腐食性状評価は困難であり、腐食率評価の推定精度を低下させる要因になる。

### (2) 既往の画像処理システム適用結果

図-6(a)は非腐食格子試験体および単鉄筋試験体、図-6(b)は腐食格子試験体の横筋直上における画像処理前後の温度分布である。同図から、画像処理の適用によりほぼ様な加熱状態となり、加熱むらが生じなかった場合に得られることが予想される温度分布へと変換されていることがわかる。

ここで、格子の中間(同図0mmの位置)に着目すると、画像処理前後の差がほとんど無いことが確認できる。こ

れは、改良型画像処理システムにおいて高温部の除去に差分処理を用いているが、格子部の中間地点では加熱むらが発生していないことを仮定しており、同位置においては差分処理の適用範囲外となるためである。

しかしながら、図-6(a)における単鉄筋試験体および画像処理後の非腐食格子試験体の温度分布を比較すると、共に非腐食鉄筋を用いているにもかかわらず、約1℃程度の温度差が生じていることが判る。これは、図-7に示すように鉄筋交差部で生じた熱が放射状に拡散し、高温部近傍領域においても加熱むらが生じたためであり、格子中央において加熱むらが生じていないことを仮定している改良型画像処理システムでは、このような高温加熱むらを除去できないことを示している。

このような交差部から拡散する熱によって生じる加熱むらの影響は、かぶりや結束線の巻き数、電磁誘導出力によって大きく変動するため影響評価が困難であるため、画像処理によって加熱むらを除去し加熱むらが生じていない状態へと変換することで、鉄筋の腐食量を簡易に評価することが必要不可欠である。また、前節と同様に加熱範囲の両端部においては低温の加熱むらが生じているため、交差部の高温加熱むらと併せてこれらの加熱むらも除去する必要がある。

## 3. 拡張型熱画像処理システムのアルゴリズム

前章においては本手法の問題点ならびにそれらを解消することを目的として開発した既往の画像処理システムの問題点について述べた。本章では、既往の画像処理システムを拡張によりそれらの問題点を解消し、加熱むらが生じていない状態へより精度よく変換可能とする拡張型熱画像処理システムのアルゴリズムについて論じる。

### 3.1 画像処理システム適用の流れ

図-8に拡張型熱画像処理システムを適用する際の本手法のフローチャートを示す。本画像処理システムにおいては撮影した複数の熱画像の内、表面温度が最高となった時点の熱画像を画像処理の対象とする。対象画像に画像処理を適用するにあたって、まずは複合ファイル形式(zip, sit)で保存されている熱画像における温度情報と画像を分割することで、画素中に輝度のみを有する状態に変換した画像を作成し、以下の手順を適用する。

① 電磁誘導コイルの形状によって決定する加熱領域端部における高温・低温加熱むら発生位置の特定を目的として、デジタル画像処理分野において対象の位置検出に用いられるパターンマッチング法を応用し、測定領域に対するコイルの設置位置を検出する。

② ①で得た加熱むらの位置情報を利用して、高温加熱むらには差分処理、低温加熱むらには増分処理を適用し加熱領域端部の加熱むらを除去することで、加熱むらが

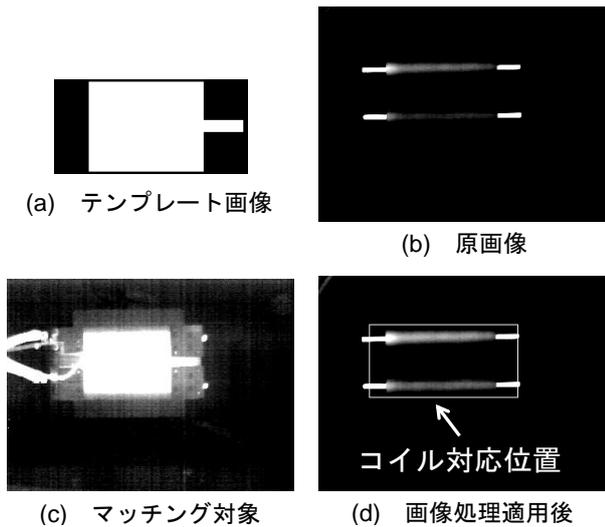


図-9 パターンマッチングにおける画像

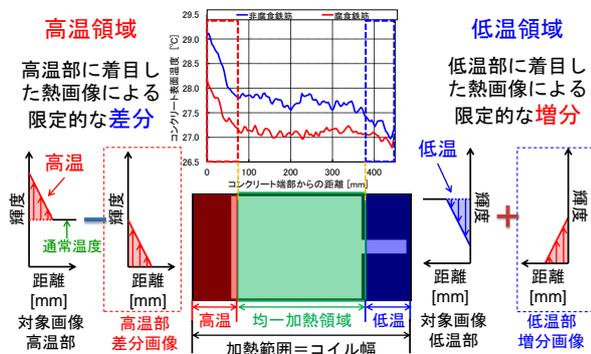


図-10 差分・増分画像の作成方法

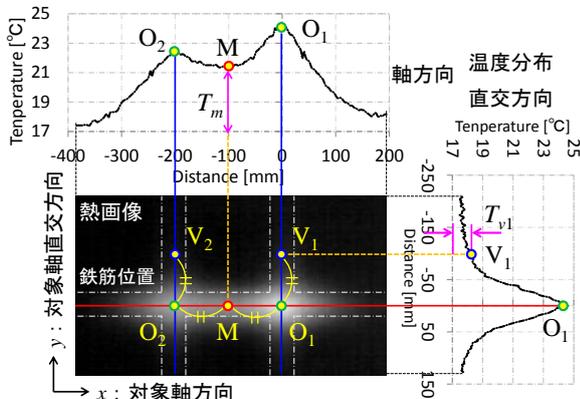


図-11 高温部近傍領域の温度性状

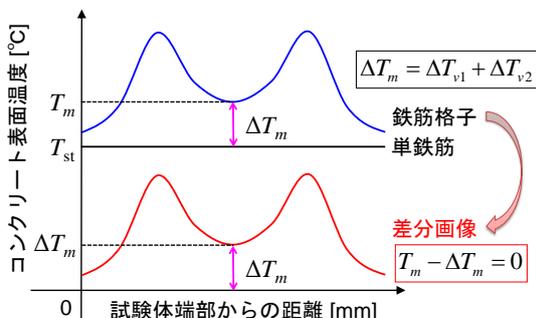


図-12 鉄筋格子における差分画像作成方法

生じていない場合の温度分布を得ることが可能となる。

③ 測定対象が鉄筋格子の場合は格子部直上のみではな

く、近傍領域の加熱むらも含めて除去可能とする処理が望ましい。本研究においては、複数の差分画像によって平均画像を作成し平均差分処理を適用する。

④ 上述の処理を適用した後、環境条件および赤外線検出時に生じた測定誤差によるノイズを除去するためにメディアンフィルタによる画像全体の平滑化処理<sup>3)</sup>を行う。

⑤ 最後に、画像処理の適用のために分割した原画像の温度情報を処理後の画像に関連付けし、画素に対応する温度および輝度を有する熱画像に変換する<sup>3)</sup>。この画像処理適用後の熱画像における温度情報と FEM により解析した非腐食時のコンクリート表面温度を入力データとして、腐食率算定式により断面減少率を推定する。

### 3.2 電磁誘導コイル端部の加熱むら除去

#### (1) パターンマッチング(図-8中の①)

パターンマッチング法(以下、PM法と称す)とは、顔認識や製品の生産ラインにおける品質管理に用いられる手法であり、あらかじめ読込んだテンプレート画像と対象画像における類似点を検知する手法である。同手法を応用して電磁誘導コイルの位置を抽出し、コイル形状によって決定する加熱むらの発生位置および程度を検出する。

具体的手法としてはまず、図-9(a)に示すような加熱停止直前のコイルの熱画像を簡略化した画像をテンプレート画像として採用する。ここで、腐食率評価の対象である原画像(同図(b))の試験体加時の画像(同図(c))をPM法の対象とし、テンプレート画像との類似座標を検出する。このとき、類似度の算定には(1)式を用いる。

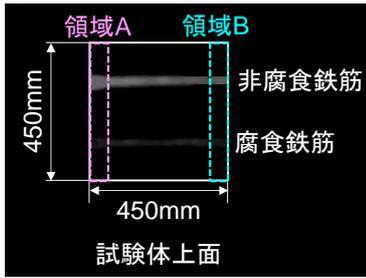
$$SAD = \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} |I(x, y) - T(x, y)| \quad (1)$$

ここで、SADはテンプレートとの類似度、 $x, y$ は画像中の座標、 $I(x, y)$ および $T(x, y)$ はそれぞれ対象画像、テンプレート画像の輝度を表している。拡張型熱画像処理システムにおいては、類似度の閾値を設定し閾値を上回る最大値 $SAD_{max}$ における座標をコイル位置の原点とする。

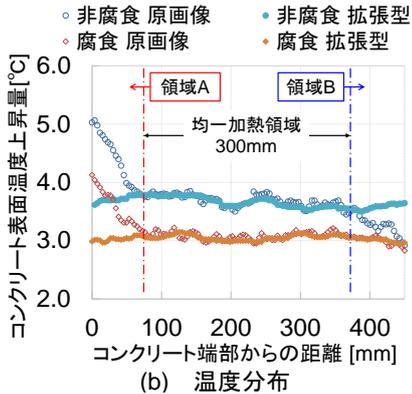
PM法により得られた類似位置の座標を図-9(b)の原画像にフィードバックした結果が図-9(d)である。既往の研究結果から、加熱むら発生位置および程度はコイル形状によって決定され、加えて電磁誘導による加熱範囲はコイル幅とほぼ同一であることがわかっているため、コイルのテンプレート画像に加熱むらが発生する位置を事前に設定することで、加熱むらの影響範囲および程度を自動で検出することが可能となる。

#### (2) 差分・増分処理(図-8中の②)

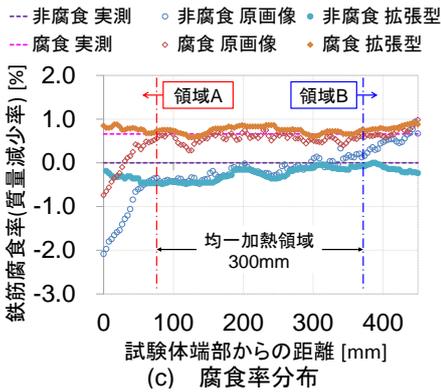
PM法によりコイル位置を検出した後、高温加熱むらに対しては差分処理、低温加熱むらに対しては増分処理を適用する。差分・増分画像の作成方法は図-10に示すとおりで、まず差分画像の場合は均一加熱領域と高温部



(a) 熱画像

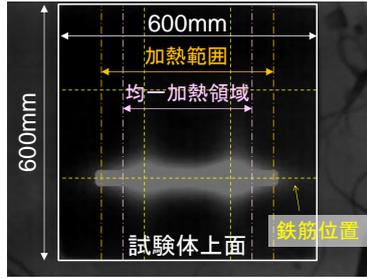


(b) 温度分布

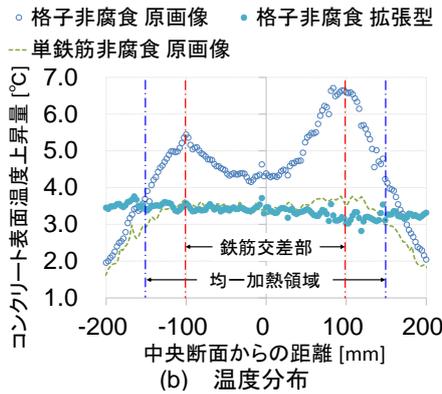


(c) 腐食率分布

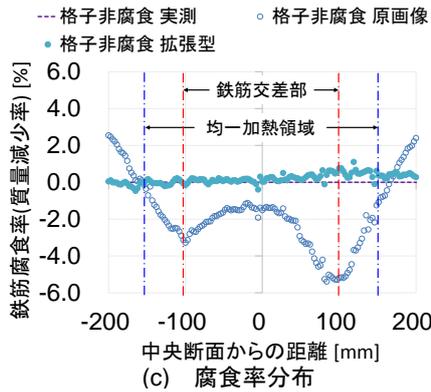
図-13 複鉄筋試験体の温度性状



(a) 熱画像

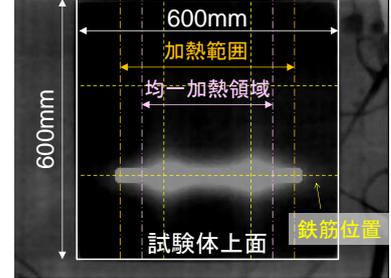


(b) 温度分布

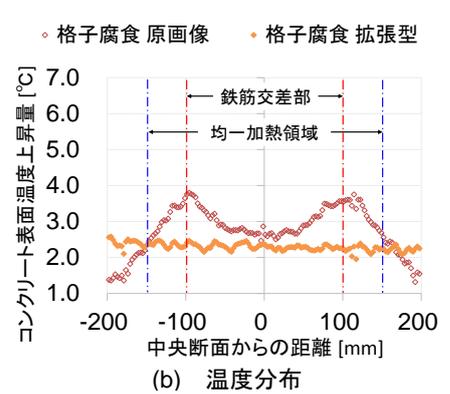


(c) 腐食率分布

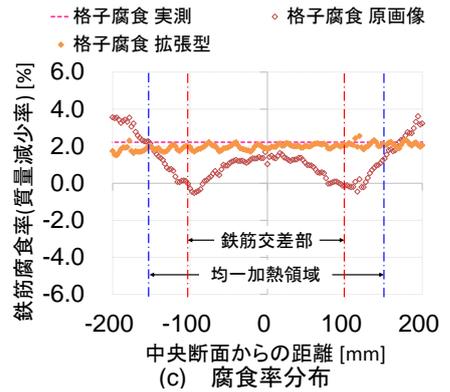
図-14 非腐食格子試験体の温度性状



(a) 熱画像



(b) 温度分布



(c) 腐食率分布

図-15 腐食格子試験体の温度性状

の境界における位置の輝度が0になるように熱画像の温度出力レンジ設定を変更し、その画像を差分画像とする。増分画像については原画像の低温部分における輝度を反転させた上で、差分画像と同様に均一加熱領域との境界の輝度が0になるようにレンジを設定し増分画像とする。

このように作成した差分・増分画像を用いて、加熱領域で発生した各種加熱むらを除く。

### 3.3 鉄筋格子における高温領域の除去(図-8中の③)

鉄筋格子の高温加熱むらの除去に際してはまず、高温加熱むらが近傍領域に及ぼす影響を評価する必要がある。図-11は鉄筋格子試験体の熱画像と温度分布であるが、同図から格子間の中央に位置するM点における表面温度 $T_m$ が交差部の高温領域に伴って温度が上昇していることがわかる。平均画像差分においてはこのM点の温度 $T_m$ を基準点にとって差分画像を作成する。

しかしながら、高温加熱むらによる温度上昇量はかぶり深さ、結束線の巻き数などによって変動するため、 $T_m$

から本来の単鉄筋加熱時の温度上昇量と加熱むらによる影響とを区別することは困難である。そのため、鉄筋交差部 $O_1$ とM点を結ぶ線分 $O_1M$ と同間隔で、直交方向に位置する $V_1$ を設定しその位置における表面温度 $T_{v1}$ を利用する。 $V_1$ 直下の直交方向鉄筋は電磁誘導により加熱されないことから、 $T_{v1}$ から初期温度を差し引いた $\Delta T_{v1}$ は $O_1$ による加熱むらのみの影響である。

M点の表面温度に影響を及ぼす加熱むら $\Delta T_m$ は同様にして求めたもう一方の格子部 $O_2$ によって発生した加熱むら $\Delta T_{o2}$ と $\Delta T_{v1}$ を用いて以下のように表せる。

$${}_{m}\Delta = \Delta T_{v1} + \Delta T_{o2} \quad (2)$$

差分画像の作成方法は図-12に示すとおりで、式(2)を用いて算出した $\Delta T_m$ がM点における温度 $T_m$ と等しくなるように画像全体のレンジを変更し、その画像を差分画像とし、対象画像から差分画像を差し引くことで高温部による影響を除去する。

ただし、対象画像から作成した差分画像のみで処理を適用すると、差分画像において発生した画素のばらつきを含めて差分することとなる。そのため、拡張型熱画像処理システムにおいては対象画像と前後 10 秒の熱画像を用いて差分画像を複数作成し、それらの平均値をとることで画素のばらつきを除去した平均差分画像を用いて、対象画像に差分処理を適用する。

#### 4. 拡張型熱画像処理による腐食率診断手法の高精度化

3 章では既往の画像処理システムにおける問題点を解消する拡張型熱画像処理システムのアルゴリズムについて論じた。本章においては、2 章で示した各熱画像に拡張型熱画像処理システムを適用し、本手法による腐食性状評価に対する有用性について論じる。

##### 4.1 複鉄筋試験体への適用

拡張型熱画像処理システムを図-2 の複鉄筋試験体の熱画像に対して適用した際の出力結果を図-13(a)に示す。同図から、均一加熱領域外の領域 A、B を含む全ての範囲内においてコンクリート表面温度がほぼ均一になっていることが確認できる。また、同図(b)の画像処理前後の温度分布においても、原画像では高温であった領域 A、低温であった領域 B がそれぞれ均一加熱領域とほぼ同程度の温度になっていることから、腐食状態が鉄筋全長に渡って比較的均一な状態にある各鉄筋の温度性状を明確に表していることがわかる。

図-13(b)の温度分布を入力値として既往の腐食率算定式<sup>2)</sup>に適用した結果が同図(c)に示した質量減少率分布である。拡張型処理を適用したいずれの鉄筋においても、鉄筋全長に渡って実測平均値とほぼ同等の値を示していることから、拡張型熱画像処理システムにより本手法における腐食率評価精度が向上したことを示している。

##### 4.2 格子試験体への適用

前節と同様、2 章の非腐食・腐食格子試験体の熱画像に対して拡張型画像処理を適用した際の結果を図-14(a)および図-15(a)に、それらの温度分布を図-14(b)および図-15(b)に示す。各図から、複鉄筋試験体と同様に加熱範囲内においてコンクリート表面温度がほぼ均一になっていることがわかる。また、既往の画像処理システムでは除去が困難だった交差部近傍の加熱むらについても、均一加熱領域内における非腐食単鉄筋試験体および非腐食格子試験体の温度分布がほぼ同一であることから、高温加熱むらが周囲に及ぼす影響を含めて有効に除去できていることがわかる。

また、格子試験体の質量減少率を算定した結果を図-14(c) および図-15(c)に示す。拡張型熱画像処理の適用後の腐食率算定結果に着目すると、非腐食・腐食のいずれの試験体においても、実測値と非常に近い値で算定さ

れており、格子による加熱むらの影響が除去されたことにより腐食率の算定精度が大きく向上したことを示している。

これらのことから、本提案の拡張型熱画像処理システムにより、均一加熱領域外の加熱量が異なる領域および、格子部の様な高温領域においても本手法による評価が可能であり、かつ高精度に評価されることが示された。

#### 5. まとめ

本研究は腐食診断手法に拡張した画像処理システムを適用することで、さらなる腐食率推定精度の向上を目的としたものである。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 既往の画像処理システムにおいては均一加熱領域外の低温加熱むらおよび鉄筋格子の高温領域が近傍領域に及ぼす影響を除去することは困難であった。
- (2) パターンマッチング法を用いて加熱むらの位置・程度を検出することで、差分・増分処理による加熱むらの除去が可能となった。
- (3) 鉄筋格子の高温加熱むら除去については、対象鉄筋直交方向の温度分布を用いた平均差分処理により加熱むら近傍領域を含めて除去可能となった。
- (4) 本手法の実験結果に対して拡張型熱画像処理システムを適用することで高温・低温加熱むらが除去され、加熱むらが生じていない場合の温度性状に変換することが可能となった。
- (5) 加熱むら除去後の熱画像における温度情報を既往の腐食率算定式に代入することで、精度よく鉄筋腐食量を評価することが可能となった。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 矢寄 早織, 今井 嵩弓, 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, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol.4, pp.411-416, 2012
- 3) 今井 嵩弓, 根本 早季, 大下 英吉, 林 詳悟: 熱画像処理による鉄筋腐食性状評価の高精度化に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第 35 巻, No.1, pp.1705-1710, 2013
- 4) 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