

論文 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

今井 嵩弓*1・根本 早季*2・大下 英吉*3・林 詳悟*4

要旨: 著者らが提案している RC 構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差異が生じるものである。本手法は鉄筋の加熱方法に電磁誘導法を採用しているが、鉄筋端部や鉄筋格子において加熱むらが発生し、腐食率の測定精度に影響をおよぼす事が確認されている。本研究においては、既往の画像処理手法を定量的な腐食性状評価が可能なモデルへと拡張し、処理の適用による加熱むらの除去および評価精度の向上を示した。

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

著者らは既往の研究において、RC 構造物に存在する剥離空洞および鉄筋腐食を定性的かつ定量的に評価し、それらを非破壊・非接触にて適用可能とする手法を開発した(以下、本システムと称す)^{1)~3)}。本システムの概要は、用いて RC 構造物内部の鉄筋を電磁誘導法によって強制加熱し、鉄筋からコンクリート表面に伝搬した熱を赤外線サーモグラフィで検知するものである。かぶりコンクリートや鉄筋自体に上述の劣化現象が存在する場合、空洞や腐食生成物の熱的特性である断熱効果により、それらが存在しない領域に比べて表面温度に変状が生じるため、熱画像上の温度情報を分析することで劣化の程度を正確に評価することが可能となる。しかしながら、熱源となる鉄筋に与える熱エネルギーが領域によって異なる場合、それ自体によってコンクリート表面温度に差異が発生し、劣化性状評価が困難となることが確認されている。すなわち、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。既往の研究では、主筋と配力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。また、鉄筋同士で格子が形成されると、格子を1周する電流(以下、ループ電流と称す)が生じるため、一様に鉄筋温度の制御できず鉄筋腐食の精度良い定量評価が困難となった。

このような問題に対して、著者らは画像処理を応用することにより加熱むらの軽減を試み、その有用性を確認した¹⁾。しかしながら、画像処理適用時に必要となる画像形式の変換によって温度情報が失われるため、画像処理を適用した後の画像を用いた鉄筋腐食性状の定量的な

評価は困難であった。

本研究では、処理画像に対して定量的な腐食性状評価を可能とする画像処理手法の拡張を行うとともに、適用による鉄筋腐食率同定精度の高精度化について論じる。

2. 画像処理手法と既往の問題点

林ら⁴⁾は赤外線サーモグラフィを用いたコンクリート表面の剥離空洞の高精度な検出を行うことを目的として、熱画像に対する画像処理に関する研究を実施し画像処理技術の有用性を示している。著者らの既往の画像処理手法においては、林らの手法を鉄筋軸直交方向に対して線的に適用することで加熱むらの影響を除去した¹⁾。

本章ではまず、本システムに対する既往の画像処理の適用結果を示すと同時に、その問題点について論じる。

2.1 単一鉄筋試験体

(1) 実験概要

試験体概要は図-1に示すように、鉄筋はD16(SD295)の非腐食鉄筋および腐食鉄筋の2本を用い、純かぶり30mmの位置に200mmの間隔で配筋した。腐食鉄筋は平均腐食率(質量減少率)0.66%であり、大気中への暴露により軸方向全長に渡って比較的均一な腐食状態である。また、配合条件は表-1に示すとおりで、使用材料は早強ポルトランドセメント、砕石、砕砂、水、AE減水剤である。なお、鉄筋加熱に使用した電磁誘導コイルの均一加熱領域は300mmで、同領域の中心と試験体の中心が重なるようにコイルを配置した。

本試験体に対して本システムを適用した結果であるが、図-2は電磁誘導加熱停止から180秒が経過した時点のコンクリート表面の熱画像を示している。非腐食鉄筋および腐食鉄筋上のコンクリート表面温度を比較すると、腐食鉄筋直上では温度が低くなっていることが確認

*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 (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)

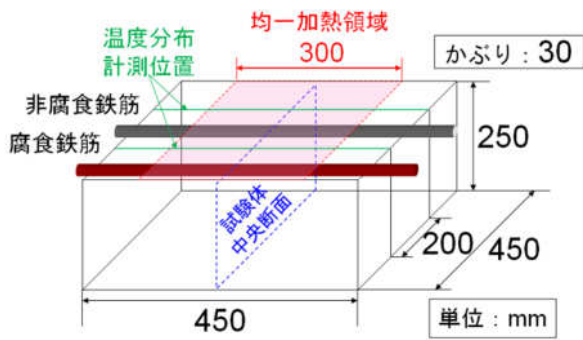


図-1 単一鉄筋試験体の概要

表-1 配合条件

W/C	粗骨材最大寸法	スランプ	空気量
%	mm	cm	%
60	20	10	5

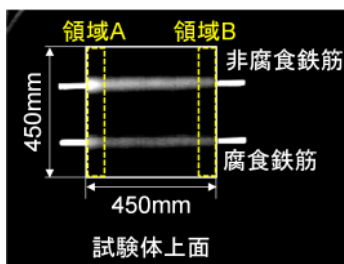


図-2 単一鉄筋試験体の熱画像（加熱停止 180 秒後）

できる(明るいほど高温)。

図-3 は各鉄筋軸直上におけるコンクリート表面の温度分布を示したものである。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コンクリートに比べて低くなっており、その差異は最大で0.5~0.9℃ほどである。このような鉄筋腐食のコンクリート表面温度に及ぼす要因は、腐食生成物の有する断熱効果によるものであり、鉄筋の非腐食断面からコンクリート表面への熱の拡散が抑制され、コンクリート表面の温度上昇量が低くなることによるものである。

しかしながら、本来は鉄筋軸方向に様な温度分布となることが本システムの前条件であるが、各鉄筋の領域Aに着目するといずれの鉄筋も非常に高温となっていることがわかる。図-2 においても同様の傾向が確認でき、コイルによる加熱むらが生じている。前述したように本システムは、腐食生成物がコンクリート表面温度に及ぼす影響を定量的に評価することで腐食率を同定する手法であるが、このような加熱むらの存在は腐食率測定精度の低下に通ずることとなる。

(2) 熱画像処理の適用

既往の研究では、前述の加熱むらの影響を除去するために、熱画像に対して画像処理手法を適用した¹⁾。図-4 は図-2 に画像処理手法を適用した後の熱画像である。画像処理手法の適用に際しては、非腐食鉄筋における中心軸上の温度との相対比較により、非腐食状態にある位

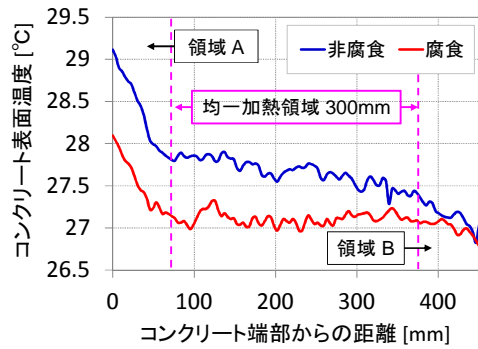


図-3 コンクリート表面温度分布

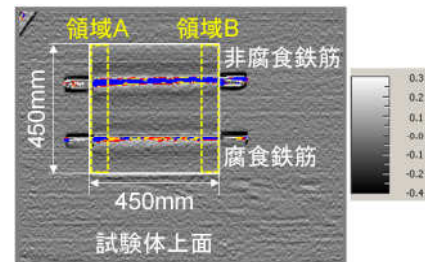


図-4 画像処理適用後の熱画像

置を青、腐食状態にある位置を腐食進行度合いに伴い赤、黄で出力している。

まず、図-4 の熱画像における非腐食鉄筋に着目すると、図-2 の領域 A において確認された加熱むらが除去され、表面温度性状が鉄筋軸方向に対して一様に非腐食と判定されていることが確認できる。

一方、腐食鉄筋に着目すると、領域 A において非腐食と判定されており、本来の腐食状態と異なった結果で出力されている。このことはすなわち、図-2 で確認された加熱むらが除去されておらず、判定に誤りが生じていることとなる。また、鉄筋の腐食状態は画像処理の適用により青、黄および赤の3段階に色分けされているため、定性的な評価は可能であるが、1章でも述べたとおり本システムは非破壊検査による腐食性状の定量的評価を目的とした手法であるため、処理後の画像であっても腐食性状の定量的評価が可能な手法へと拡張する必要がある。

加えて、前述したとおり既往の画像処理手法による腐食判定は画面上側の鉄筋が非腐食であることを前提とした相対比較によるものであり、本来の非破壊検査で求められる絶対的評価ではないことが本手法の問題点である。

2.2 鉄筋格子試験体

(1) 実験概要

本節では鉄筋が格子状に配筋された試験体について論じる。鉄筋が格子状に配筋された試験体の概要を図-5 に示す。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純かぶり²⁾が 30mm、格子間隔が 200×300mm になるように配筋した。配合条件および使用材料は前節の単一鉄筋試験体と同様であり、加熱には均一加熱領域 700mm の大型コイルを使用した。

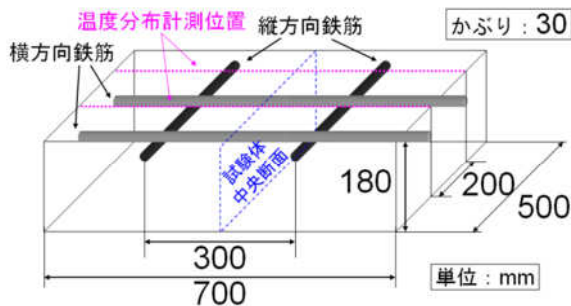


図-5 鉄筋格子試験体の概要

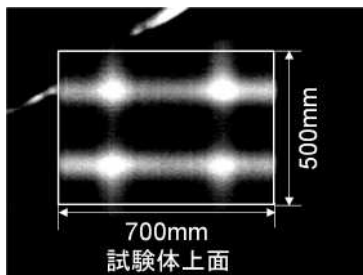


図-6 鉄筋格子試験体の熱画像（表面温度最高時点）

鉄筋格子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-6および図-7に示す。各図から、格子位置におけるコンクリート表面の温度が他の領域に比べて非常に高くなっており、その差は最大で約1.2℃である。この理由は、格子部は2本の鉄筋が交差しており、またそれらを固定する結束線の影響も加わるため、総発熱量は鉄筋1本に比べて非常に大きくなることにある。さらに、格子上の鉄筋網に対して電磁誘導を行うと、電気回路が形成され、それらを1周するループ電流が発生する。そのループ電流は2本の鉄筋が接触する部分の抵抗により発熱することになる。

(2) 熱画像処理の適用

既往の研究においては加熱むらの除去を目的として、画像処理の適用性について検討した¹⁾。画像処理手法には、前節のフィルター処理に加え、対象画像からある程度放熱した時点(10分経過後)における画像を対象画像から差し引く手法(以下、経時差分処理)を用いた。

図-8は図-6に画像処理を適用した熱画像である。なお、本手法では横方向鉄筋に着目した処理を行い、格子部高温領域および縦方向鉄筋の影響を除去している。この際、差分に用いる熱画像の経過時間によっては格子部の加熱むらが除去されず、またその決定方法の多くは経験的なものであり、論理的な手法が確立されていない。特に、実環境においては、かぶりや外気温を始めとする各種要因がコンクリート表面温度の低下速度に影響を及ぼすため、これら要因の影響を考慮した経過時間の設定方法が必要である。

3. 改良型画像処理手法のアルゴリズム

前章では既往の画像処理手法について論じ、本システ

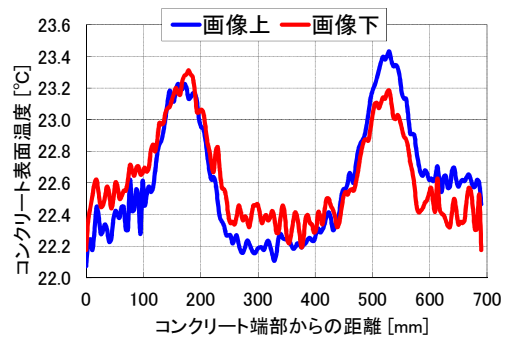


図-7 鉄筋格子試験体の温度分布（表面温度最高時点）

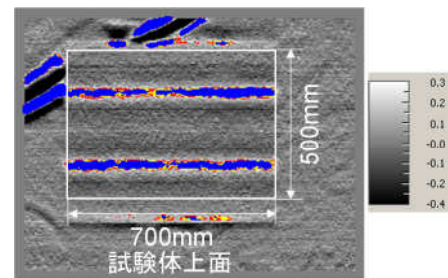


図-8 画像処理適用後

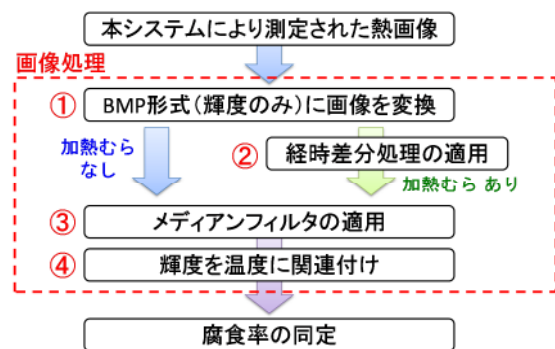


図-9 画像処理の適用フローチャート

ムに対する既往の手法の問題点を明確にした。本章ではそれらの問題点を解消し、かつ本システムによる腐食性状評価の高精度化を可能とする改良型画像処理手法(以下、本提案手法)のアルゴリズムについて論じる。

3.1 改良型画像処理手法の流れ

図-9に本提案手法の適用手順を示す。熱画像に対して画像処理を行うためにはまず、①画像から温度情報を取り除き、画素に格納された値を輝度、すなわちデジタル画像(BMP形式など)に変換する必要がある。

次に、②加熱むらが存在する場合は、2.2節で示したように経時差分処理が有効であり、本提案手法においても同手法を用いることとする。しかしながら、前述したように差分画像の経過時間の選定には問題があるため、論理的な差分画像の設定方法の確立が必要である。

③経時差分処理によって加熱むらを除去した後の画像は、画像処理分野においてノイズ除去方法として広く用いられているメディアンフィルタを適用する。これは、差分によって発生した誤差と熱画像撮影時の日射や対象の表面状態といった各種環境条件の差異によって発生す

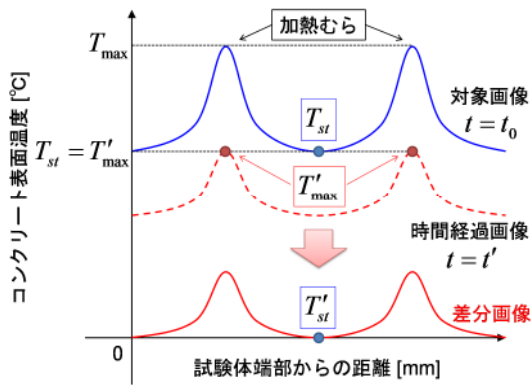


図-10 差分画像の作製方法(温度分布)

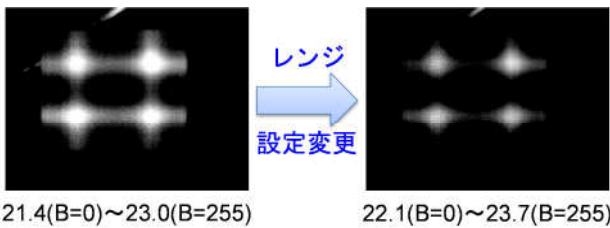


図-11 同時点における熱画像のレンジ変更例



図-12 メディアンフィルタによる処理例

るノイズを除去するためである。

以上の手順を終了した段階での画像は輝度のみの形式であり、温度情報が含まれていないため、この形式では腐食率の同定は困難となる。したがって本提案手法においては、④温度情報を保ちつつ画像処理の有用性を得るために、画像処理を適用した後の画像における各画素の輝度値に相当する温度情報を追加することとした。

これらの手順により、熱画像は画像処理を適用した状態で温度情報を有することとなり、腐食率の同定が可能となる。なお、腐食率の同定方法に関しては後述する。

3.2 経時差分処理 (図-9 中の②)

本提案手法においては、普遍性を有する差分画像の設定方法を目的とし、図-10 に示した差分画像の作成方法を用いて経時差分処理を鉄筋1本ごとに適用する。

いま、青線は経過時間 $t = t_0$ における鉄筋軸直上の温度分布であり、最高温度 T_{max} となる位置から十分に離れた加熱むらの影響が無い領域における温度を T_{st} とする。時間の経過とともに最高温度を示した位置の温度 T'_{max} は徐々に低下し、この T'_{max} が対象画像における T_{st} と等しくなる時点の画像を差分画像とし、その経過時間 t' に設定する。しかしながら、対象画像(青の実線)から時間 t' における差分画像(赤の破線)をそのままの状態で差し引くと、対象画像全域が差分されることとなり、加熱むらのみならず加熱むらの影響が無く差分処理を適用する必要の無

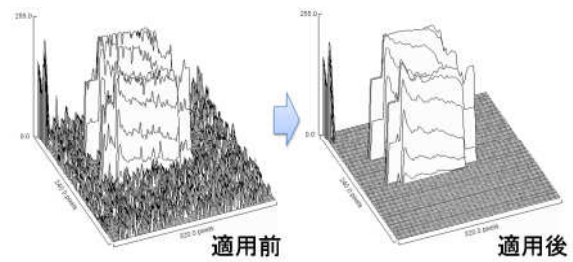


図-13 輝度の3Dプロットの比較

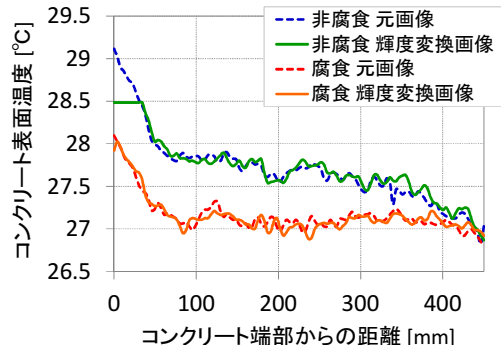


図-14 輝度の変換例(単一鉄筋試験体)

い領域までも温度が差し引かれてしまう。この問題を回避するため、熱画像中に表示する輝度に応じたレンジ(熱画像に対応した温度の出力範囲)設定を図-11 に示すように、差分画像における加熱むらの影響が無い領域の温度 T'_{st} が0になるように設定する。このように作成した画像を差分画像として使用し、経時差分処理を適用することで、加熱むらの影響のみを除去することが可能となる。

3.3 メディアンフィルタの適用 (図-9 中の③)

メディアンフィルタは、図-12 に示すように画像中の注目画素とその近傍領域における全ての値のメディアン(中央値)を注目画素と置き換える手法である。これにより画像の特徴点を損なわずにノイズのみを除去することが可能となる。これは、図-13 に示した人工的にノイズを加えた画像に対するメディアンフィルタ適用前後の3Dプロット図からも確認できる。

3.4 輝度の変換 (図-9 中の④)

輝度の変換には原画像における温度レンジの値を用い、レンジ中の最大値を T_1 、最小値を T_2 とすると、レンジ幅 ΔT_{range} は次式で表せる。

$$\Delta T_{range} = T_1 - T_2 \quad (1)$$

本システムに用いているモノクロの熱画像は 8bit-255 階調であるため、単位輝度に対する温度上昇量は、

$$BT = \frac{\Delta T_{range}}{255} \quad (2)$$

となる。式(2)および輝度 B を用いることで、最終的に輝度値に伴う温度 T' を以下のように表せる。

$$T' = BT \cdot B(x, y) \quad (3)$$

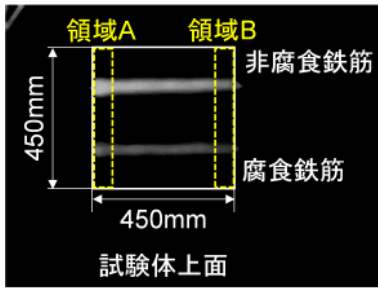


図-15 画像処理後の熱画像(単一鉄筋試験体)

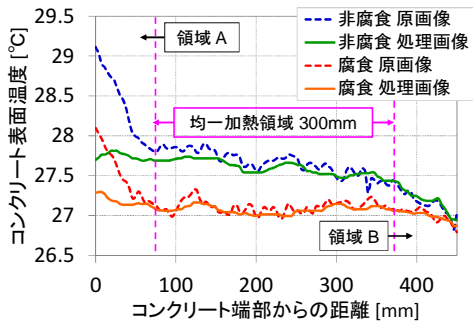


図-16 画像処理適用後の温度分布(単一鉄筋試験体)

ここで、上式における輝度 B の変数 x および y は画像の左上端部を原点 $(0,0)$ とした時の xy 座標である。

図-14 は単一鉄筋試験体の原画像(図-2)における温度分布(図-3)と、原画像を輝度のみの値に変換した後に、式(3)を用いて温度を関連付けた画像における温度分布の比較である。同図から、加熱むらが非常に大きい端部においては、限界輝度 $B = 255$ の値をとるため一定となっているものの、その他の領域では輝度の変換により発生する誤差はごく小さいものであると言える。以上のことから、熱画像から温度情報を取り除いたとしても温度の影響は反映されており、各画素の輝度に温度情報を関連付ける本手法には有用性があることが示された。

4. 鉄筋腐食診断技術の高精度化

前章では本システムの高精度化を目的とした本提案手法のアルゴリズムについて論じた。本章では実際の実験結果に本提案手法を適用するとともに、それによる腐食率測定精度の変化について論じる。

4.1 改良型画像処理手法の適用

図-2 の単一鉄筋試験体の熱画像に対し、3 章で論じた本提案手法を適用した際の画像を図-15 に示す。同図から、図-2 の加熱むら発生位置において白($B=255$)で表示されていた領域 A が、本提案手法の適用により緩和され、加熱むらの無い領域とほぼ同程度の輝度で表示されていることが確認できる。

図-16 は図-15 の各鉄筋軸直上部における原画像と本手法適用後の温度分布を示した図である。加熱むらが存在した領域では、その影響がほぼ完全に除去され、加熱むらの存在しない領域においては元の温度性状が保た

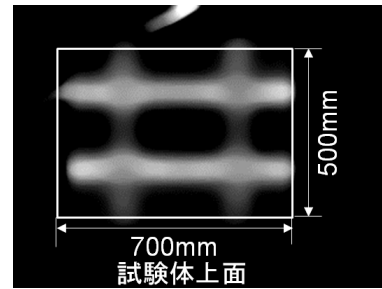


図-17 画像処理後の熱画像(鉄筋格子試験体)

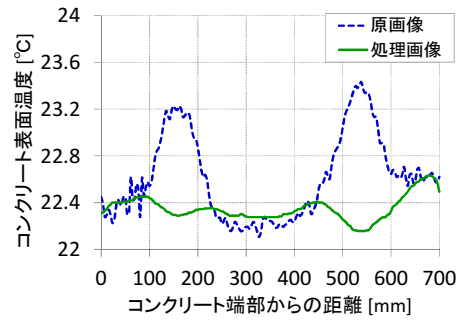


図-18 画像処理適用後の温度分布(鉄筋格子試験体)

れていることがわかる。また、全体的にノイズが除去され、急激な温度変化がなくなっていることも確認できる。

次に、本提案手法を適用した後の鉄筋格子試験体の熱画像と鉄筋軸直上の温度分布を図-17 および図-18 に示す。鉄筋格子試験体についても格子部において発生した高温部分が除去されており、図-18 における原画像との温度分布の比較から、格子部の加熱状態がほぼ一般的な状態へと変換されていることがわかる。

これらの結果は、均一加熱領域外および格子部に発生した加熱むらが本提案手法により良好に除去されていることを示している。

4.2 腐食率の同定

既往の研究²⁾において、かぶり、初期温度、外気温を変数とし、熱伝導解析による非腐食鉄筋加熱時のコンクリート表面温度上昇量 ΔT_{\max} を以下のように表している。

$$\Delta T_{\max} = a + c \{-0.0023(a-b) - 0.0395\} + 3.075 \quad (4)$$

ここで、 a 、 b および c は、それぞれ初期温度、外気温およびかぶりである。

式(4)によって算出された温度上昇量 ΔT_{\max} と実測の温度上昇量 ΔT との温度差、非腐食鉄筋、腐食生成物およびコンクリートの熱物性値を用いることで鉄筋腐食率 n は次式となる。

$$n = \alpha \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \cdot \frac{\rho_{st} C_{st} S_{st}}{\rho_{con} C_{con} S_{con}} \cdot \frac{C_{co}}{C_{co} - C_{st}} \quad (5)$$

ここで、添字 st, con, co はそれぞれ非腐食鉄筋、コンクリート、腐食生成物を表し、 ρ, C はそれぞれ密度および比熱である。各物性値は表-2 に示す通りで、腐食生成物の比熱測定に際しては、加熱炉を用いて一定温度とした物質を低温の水に投げ、水の温度上昇を測定する混合

表-2 解析に用いた各物質の物性値

非腐食鉄筋	比熱 C_{st} [kJ/kg°C]	0.47
	密度 ρ_{st} [kg/m ³]	7850
コンクリート	比熱 C_{con} [kJ/kg°C]	1.15
	密度 ρ_{con} [kg/m ³]	2400
腐食生成物	比熱 C_{co} [kJ/kg°C]	1.2

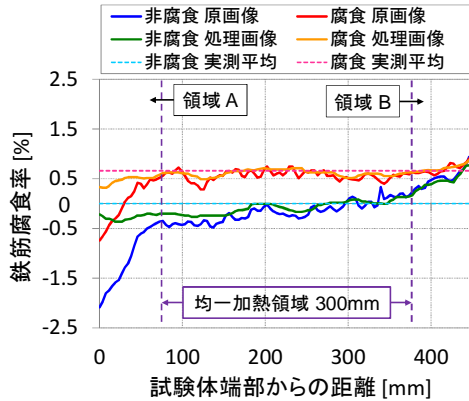


図-19 単一鉄筋試験体の腐食率分布

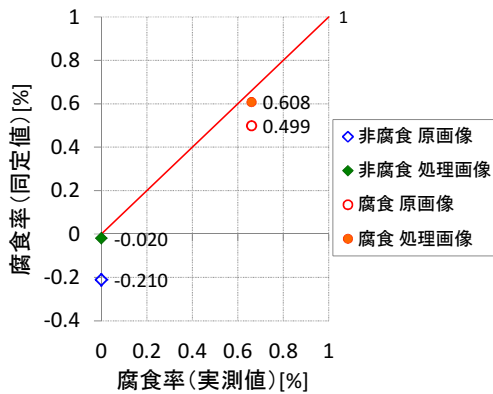


図-20 平均腐食率の比較

法を採用した。 S は単位奥行きあたりの熱拡散影響面積で、かぶりコンクリート内部の熱拡散は鉄筋を中心に45度の角度で広がると仮定している。また、 α は本仮定に対する補正係数であり、以下のように表せる。

$$\alpha = 0.0164c - 0.1 \quad (6)$$

本節では2.1節で示した単一鉄筋試験体の温度分布(図-3)と本提案手法適用後の温度分布(図-15)から実測の温度上昇量 ΔT を算出し、(4)および(5)式を用いて、各画像における腐食率を同定する。

図-19は、腐食率分布の算定結果と実測結果を表したものである。まず、原画像における腐食率分布に着目すると、非腐食鉄筋では、本来腐食率は0%になるにもかかわらず負の値となり、また腐食鉄筋における0~50mmの領域では、実際の腐食率よりも低い値となっている。

一方、本手法を適用した処理画像においては、いずれの鉄筋においても真値0%(非腐食)、0.66%(腐食)に近づいており、本提案手法の適用により精度良く評価されることがわかる。

図-20は縦軸に同定した腐食率分布の平均値、横軸を

実測の平均腐食率として、図-17の各鉄筋における温度分布の平均値をプロットしたものである。なお、図中の赤線は同定値と実測値が等しくなる点を結んだ線である。同図から原画像の同定値が本来の値から離れていることに対し、本提案手法の処理画像は真値に近い値で同定されており、同定値と真値との差異は非腐食鉄筋で0.02%、腐食鉄筋で0.052%と非常に小さい値となっている。

これらのことから、本提案手法は画像処理適用後の画像においても腐食性状を定量的に評価することが可能であり、かつ測定精度が高精度化されることが示された。

5. まとめ

以下に、本研究で得られた知見を示す。

- (1) 加熱むら発生領域とその影響が無い領域の温度差を閾値に利用した経時差分処理の適用により、加熱むらが有効に除去されることが確認された。
- (2) 熱画像に対するメディアンフィルタの適用により、元の温度性状を保ちつつ、画像中に発生したノイズのみを取り除くことが可能となった。
- (3) 既往の研究においては、画像処理適用後の画像から定量的な腐食性状評価を行うことは困難だったが、輝度を温度に変換することで、処理後の画像による腐食率の同定が可能となった。
- (4) 加熱むら発生領域においては高温となるため、本来であれば非腐食と誤判定されてしまうが、改良型画像手法の適用により、その問題が解消され、かつ本腐食診断技術の測定精度が向上した。

参考文献

- 1) 今井 嵩弓, 矢寄 早織, 大下 英吉, 林 詳悟: 赤外線サーモグラフィによる RC 構造物の鉄筋腐食性状評価における熱画像処理手法の検討に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1714-1719, 2012
- 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) 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
- 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