

論文 サーモグラフィの画像処理を目的とした壁表面温度分布の簡易解析手法

黒川 善幸*1・藤森 繁*2・谷川 恭雄*3

要旨：本研究では，赤外線サーモグラフィを内部探査の1次診断手法と位置付け，部材をすべて健全とした場合の簡易数値解析を行い，実測結果と比較することで欠陥の状態を探る手法について検討した。本報では，色彩値による日射吸収率を考慮した表面温度の簡易解析手法について述べ，検証実験における測定画像の再現を試みた。その結果，全体としては表面温度分布の傾向をよくとらえているものの，色彩によっては温度差が生じた。表面色が黒色，ピリジアン[®]の箇所がよく一致したが，白色，黄色の箇所では温度が低く，補正の必要性が認められた。

キーワード：赤外線サーモグラフィ，内部探査，日射吸収率，表面温度の簡易解析手法

1. はじめに

構造体内部を非破壊で探査する手法は，適切なメンテナンスによって構造物を安全に使用するために不可欠なものとなりつつある。赤外線サーモグラフィ法は，壁面の熱伝導の異常を検出することで内部欠陥などを検出する手法であり，広範囲を同時にかつ非接触で測定する点において優れているが，測定結果に及ぼす要因が多様であり，画像の解釈には高度な判断が必要となる。その要因の一つとして，部材表面の色彩値による日射吸収率がある¹⁾。

屋外に露出している壁面の場合，晴天時には，日射による熱入力²⁾が外気温からの熱伝達に比べて支配的であり²⁾，日射吸収率が表面温度に与える影響は極めて大きい。そこで，筆者らは，様々な表面色を持つ供試体の測定結果からその補正手法を提案し³⁾，表面温度に対する日射吸収率の影響を定量化した⁴⁾。しかしながら，色彩値に差がある場合にも，隣接部からの熱伝導が発生し，その境界がぼやける現象が観察された。これを任意の面において考慮するには，有限要素法による個々の3次元熱伝導シミュレーション^{5,6)}が必要となるが，対象面を網羅するには計算量が膨大となり，また，仮定した欠陥

についてしか適用できない。

そこで，別報では，赤外線サーモグラフィを内部探査の1次診断手法と位置付け，部材をすべて健全と仮定して，壁体の熱伝導⁷⁾に関する簡易数値解析を行い，測定画像との比較により欠陥の状態を探る手法について検討した⁸⁾。本報では，色彩値による日射吸収率を考慮した表面温度の簡易解析手法について述べ，モルタル供試体による検証実験の結果と比較した。

2. 解析手法の概要

2.1 構成方程式^{2,5)}

コンクリートは温度伝導率が $0.57 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 程度と比較的高く，環境の変化に対して温度分布が速やかに定常状態に達する材料である。これは，通常の計測においても気温上昇時の外表面温度が単調に増加して大きな振動がみられないことから確認できる。定常熱伝導の支配方程式は，次式で与えられる。

$$\lambda \nabla^2 \theta + \dot{Q} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} = 0 \tag{1}$$

ここに， θ ：座標 (x, y, z) の温度(K)，

λ ：熱伝導率(W/(m・K))，

*1 名古屋大学 環境学研究科都市環境学専攻助手 工修(正会員)

*2 大同工業大学 非常勤講師 工修(正会員)

*3 名城大学 理工学部建築学科教授 工博(正会員)

\dot{Q} : 発熱率 (W/m³)

ここで, $x = 0$ を壁の外表面とし, $(0, y, z)$ における日射吸収率を a とする。 $x = 0$ における境界条件として, 日射強さ J (W/m²) による熱流束 q_s と, 外気温 θ_{oa} からの熱伝達による熱流束 q_a を考慮した熱流束 q_x を与える。

$$q_x = q_s + q_a = aJ + \alpha_o (\theta_{oa} - \theta_w) = \alpha_o (\theta_{sa} - \theta_w) \quad (2)$$

ここに, q_x : x 方向の熱流束 (W/m²),
 α_o : 外気面の熱伝達率 (W/(m²·K)),
 θ_{oa} : 外気温度 (K),
 θ_w : 壁の外表面温度 (K),
 $\theta_{sa} = \theta_{os} + \theta_{oa}$: ソルエア温度 (K),
 $\theta_{os} = aJ/\alpha_o$: 日射による等価外気温 (K)

式(2)を境界条件として式(1)を解くと, 定常熱伝導問題の解が得られる。

2.2 1次元定常熱伝導²⁾

y, z 方向に熱流がない場合, Fourier の法則から, x 方向の熱流束 q_x は, 次式で表される。

$$q_x = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (3)$$

図-1 に示すような均質材料で構成される外壁の x 方向の熱貫流抵抗 Ω_x (m²·K/W) は, 壁の熱伝導抵抗と熱伝達抵抗の総和で表される。

$$\Omega_x = \omega_{oa} + \omega_k + \omega_{ia} = \frac{1}{\alpha_o} + \frac{l_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_i} \quad (4)$$

ここに, ω_{oa} : 室外の熱伝達抵抗 (m²·K/W),
 ω_{ia} : 室内の熱伝達抵抗 (m²·K/W),
 ω_k : 壁の熱伝導抵抗 (m²·K/W),
 α_o : 室外の熱伝達率 (W/(m²·K)),
 α_i : 室内の熱伝達率 (W/(m²·K)),
 λ_k : 壁の熱伝導率 (W/(m·K)),
 l_k : 壁の厚さ (m)

この場合, 壁体を貫流する熱流束 q_x は x 方向で一定であるため, x 方向の熱貫流抵抗 Ω_x により表される。まず, 日射がない場合, 熱流束 q_a と気温による壁の外表面温度 θ_{wa} は, 以下のように求められる。

$$q_a = \frac{\theta_{oa} - \theta_{ia}}{\Omega_x} = \frac{\theta_{oa} - \theta_{wa}}{\omega_{oa}} \quad (5)$$

$$\theta_{wa} = \frac{\Omega_x - \omega_{oa}}{\Omega_x} \theta_{oa} + \frac{\omega_{oa}}{\Omega_x} \theta_{ia} \quad (6)$$

ここに, θ_{ia} : 室内気温 (K)

これは, 図-1 (b) に示すように, 抵抗で表現すれば, 温度分布は線形に表されることを示している。

次に, 日射がある場合, ソルエア気温 $\theta_{sa} = \theta_{os} + \theta_{oa}$ により, 熱流束 q_x と外壁表面温度 θ_w が得られる。

$$q_x = \frac{\theta_{os} + \theta_{oa} - \theta_{ia}}{\Omega_x} = \frac{\theta_{os} + \theta_{oa} - \theta_w}{\omega_{oa}} \quad (7)$$

$$\theta_w = \frac{\Omega_x - \omega_{oa}}{\Omega_x} (\theta_{os} + \theta_{oa}) + \frac{\omega_{oa}}{\Omega_x} \theta_{ia} = \theta_{ws} + \theta_{wa} \quad (8)$$

$$\theta_{ws} = \frac{\Omega_x - \omega_{oa}}{\Omega_x} \theta_{os} = \frac{\Omega_x - \omega_{oa}}{\Omega_x} \omega_{oa} a J \quad (9)$$

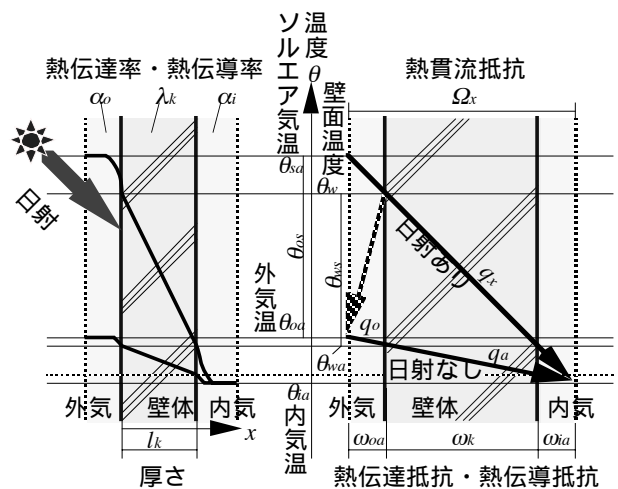
これは, 日射がない場合の外表面温度 θ_{wa} と日射による温度上昇量 θ_{ws} の和で表される。

壁面に当たる日射の強さ J と室内外の気温は基本的に壁面で共通するため, 日射吸収率 a を色彩値によって与えると, 健全な壁面の色彩値を考慮した表面温度分布が得られる。

また, 式(7)より, 日射吸収による発熱は, 一部が壁内部へ, 残りが外気に流れる。

$$q_s = \frac{\omega_{oa}}{\Omega_x} a J \quad (10)$$

$$q_x = \frac{\omega_{oa}}{\Omega_x} a J + \frac{\theta_{oa} - \theta_{ia}}{\Omega_x} = q_s + q_a \quad (11)$$



(a) 寸法による表示 (b) 熱伝導抵抗による表示

図-1 1次元定常熱伝導

2.3 3次元定常熱伝導

実際の壁体では y, z 方向の熱流が生じる。そこで、材料定数の温度依存性がないものと仮定し、壁の外表面上の任意の点において吸収された熱が3次元的に周囲に拡散する場合の影響を求め、これを壁表面上の点について重ね合わせることで壁面の表面温度分布を求める手法を考案した。

まず、図-2に示すように、壁の外表面の任意の微小領域について考える。この微小領域の日射吸収率を a 、面積を dA とすると、日射強さ J の日射を吸収して得られる発熱量は $a J dA$ となる。この吸収熱の一部が壁内部に熱伝導するが、他に熱源がない場合、等方性材料では全方位に等しく熱伝導する。半径 r の半球の表面積が $2\pi r^2$ であることから、内部への熱伝導の比率を b とすると、入射点から r 離れた位置の外向きの熱流束 q_r は、次式で表される。なお、 $0 < b < 1$ である。

$$q_r = \frac{b a J dA}{2\pi r^2} = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} \quad (12)$$

この式を r で積分すると、この日射吸収による影響圏内の温度上昇量 θ_{rs} が求められる。

$$\theta_{rs} = \frac{b a J dA}{\pi \lambda r} \quad (13)$$

したがって、表面上の任意の点の日射による温度上昇量 θ_{ws} は、これを入射のある領域で積分したものである。

$$\theta_{ws} = \int \theta_{rs} dA \quad (14)$$

ここでは、内部伝導の比率を表す係数 b として、式(11)に示す1次元定常熱伝導における内部伝導の比率を用いた。

$$b = \frac{\omega_{oa}}{\Omega_x} \quad (15)$$

実際の画像データは、縦横に分割されたセル単位で離散化されているので、式(14)は、具体的には、図-3に示すように、セル単位の値の重ねせで計算される。

なお、断熱条件の境界は、図-3に示すように、境界を挟んで対称な条件の壁が延長されて

いるものと設定し、この境界間の熱収支を0と仮定することで考慮する。

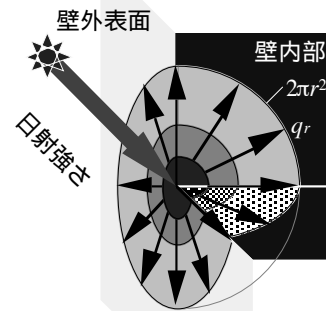


図-2 3次元定常熱伝導

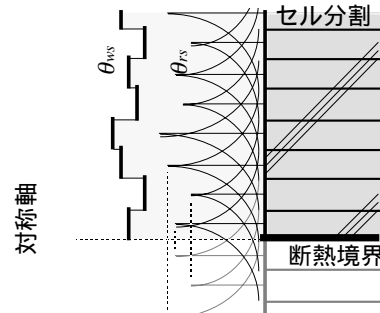
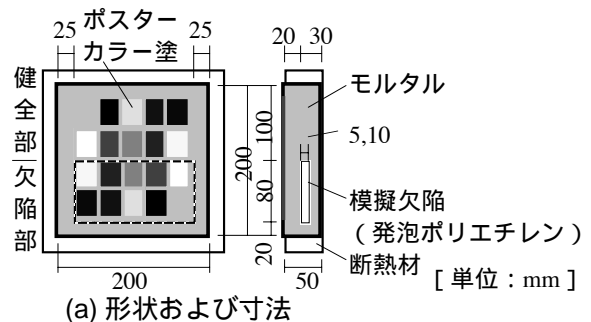


図-3 重ねせと断熱境界



(a) 形状および寸法

| 色番号 | 色名 | 分光吸収率 |
|-----|------|-------|
| 0 | モルタル | 0.66 |
| 1 | ブラック | 0.98 |
| 2 | グレー | 0.96 |
| 3 | グレー | 0.93 |
| 4 | グレー | 0.90 |
| 5 | グレー | 0.81 |
| 6 | グレー | 0.74 |
| 7 | グレー | 0.59 |
| 8 | グレー | 0.40 |
| 9 | ホワイト | 0.14 |

(b) 無彩色供試体の色の配置

| 色番号 | 色名 | 分光吸収率 |
|-----|------------|-------|
| 0 | モルタル | 0.66 |
| 1 | ブラック | 0.98 |
| 2 | バイオレット | 0.76 |
| 3 | コバルトブルー | 0.78 |
| 4 | ピリジアン | 0.91 |
| 5 | パーマネントイエロー | 0.57 |
| 6 | オレンジ | 0.73 |
| 7 | パーマネントレッド | 0.78 |
| 8 | パーントシェンナー | 0.89 |
| 9 | ホワイト | 0.13 |

(c) 有彩色供試体の色の配置

図-4 供試体の概要³⁾

3. 解析結果とその考察

3.1 実験の概要

既往の実験⁴⁾の供試体を用いて赤外線画像を測定した。供試体は、図-4に示すように、下半分のみに厚さ5, 10mmの内部欠陥を有する。無彩色のグレー部分には、ホワイトとブラックの塗料を混合して用い、分光吸収率も線形の関係にある⁴⁾。この他、材料定数の校正を目的として全面ホワイト塗装の供試体を並置した。

測定は名古屋大学工学部4号館南棟屋上で行い、いずれの供試体も南面させて設置した。測定時の気象データを表-1に示す。日射強さは瞬間値であるが、測定日は終日快晴であり、急激な変動はみられなかった。

3.2 解析の概要

解析に用いた熱伝導率は $\lambda = 1.396 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ である。壁面の熱伝達率は、全面ホワイト塗装の供試体の測定値から求め、表-1に併示した。

分解能は、測定画像により異なるが、供試体に対し縦横とも約200分割である。影響半径は、

表-1 測定時の気象データ

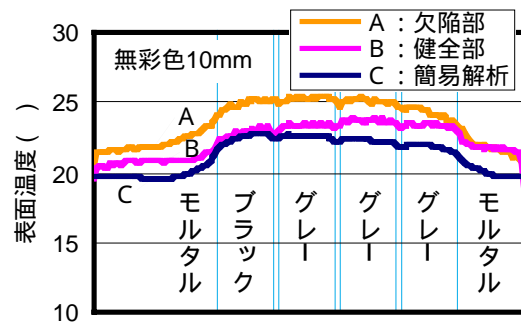
| 日時 | 気温 () | 南面 日射強さ (W/m ²) | 熱伝達率 (W/(m ² ·K)) | 欠陥 厚さ (mm) |
|----------------------|-----------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------|
| 2004年 12.17 10:00 | 9.1 | 805.9 | 9.86 | 5 |
| 12.21 10:00 | 11.4 | 812.1 | 10.87 | 10 |

既往の解析結果⁸⁾から20mmに設定した。

3.3 解析結果とその考察

(1) 無彩色供試体

図-5は、欠陥厚さ10mmの無彩色供試体の実測結果と解析結果の比較である。図(a)の実測画像では、欠陥のある下半分が高温となっている他、日射吸収率の高い箇所が高温を示し



(d) 表面温度の分布

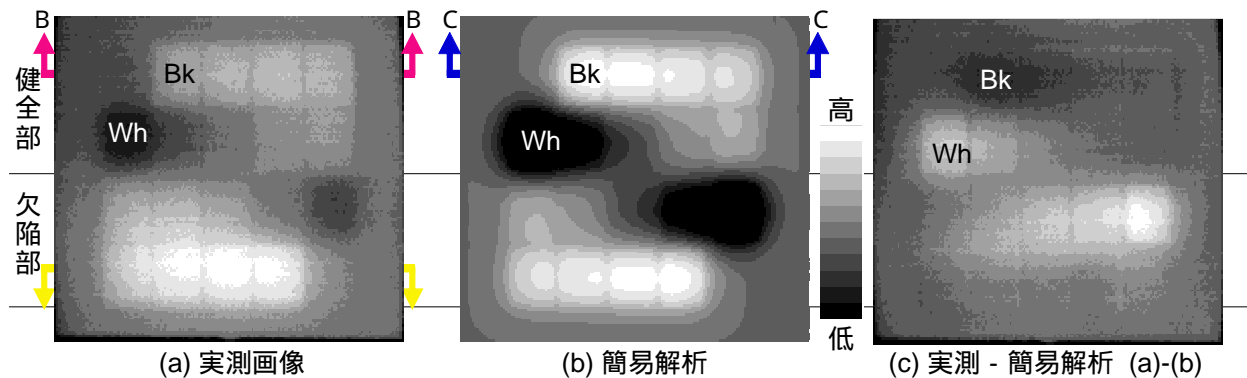


図-5 実測画像と解析画像の比較（無彩色，欠陥厚さ10mm）

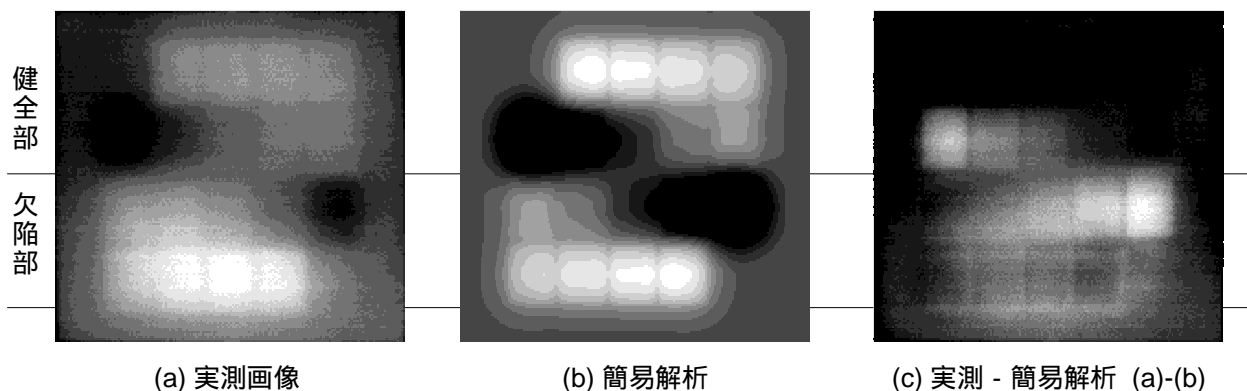


図-6 実測画像と解析画像の比較（無彩色，欠陥厚さ5mm）

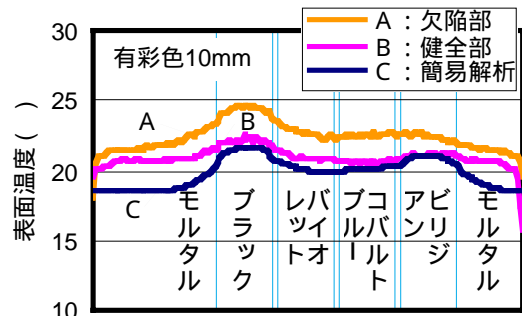
ている。図(b)は3次元定常熱伝導による本数値解析結果であるが、温度が拡散し、表面色の境界に比べて、ぼやけた温度分布の形がよく再現されている。図(d)は、図(a)および図(b)中に示した位置における表面温度の分布である。簡易解析による表面温度は、表面色がブラックの箇所(Wh)で健全部の表面温度と最も一致している。他は若干の温度差が残るものの、健全部の表面温度分布の形状が比較的再現されている。

図(c)は、図(a)から図(b)を減算したものである。実測値と数値解析値で温度差が生じているが、欠陥部付近が高温で浮き出ていることが、図から見て取れる。ただし、健全部の表面色がホワイトの箇所(Wh)も浮き出ている。これは、ホワイトの箇所で、実際には本解析の設定以上に日射が吸収されていることを示している。本解析では、日射吸収率として分光測色計の測定値をそのまま採用したが、既往の研究⁴⁾においても、ホワイト/ブラックの日射吸収による温度上昇量の比率は分光吸収率の比率よりも大きくなっており、この現象が改めて確認された。

図-6は、欠陥厚さ5mmの無彩色供試体の実測画像と解析画像の比較である。10mmの供試体に比べて欠陥部の温度上昇が小さく全体の温度差も小さいが、温度分解能を上げることで、図-5と同様の傾向が観察された。

(2) 有彩色供試体

図-7は、欠陥厚さ10mmの有彩色供試体の実測画像と解析画像の比較である。有彩色においても、図-5と同様の傾向が認められるが、色彩によるばらつきが若干生じている。数値解析結果に比べて、実際には表面色がホワイトの箇所(Wh)の表面温度が高い他、イエローの箇所(PY)の表面温度も比較的高いことなどが認



(d) 表面温度の分布

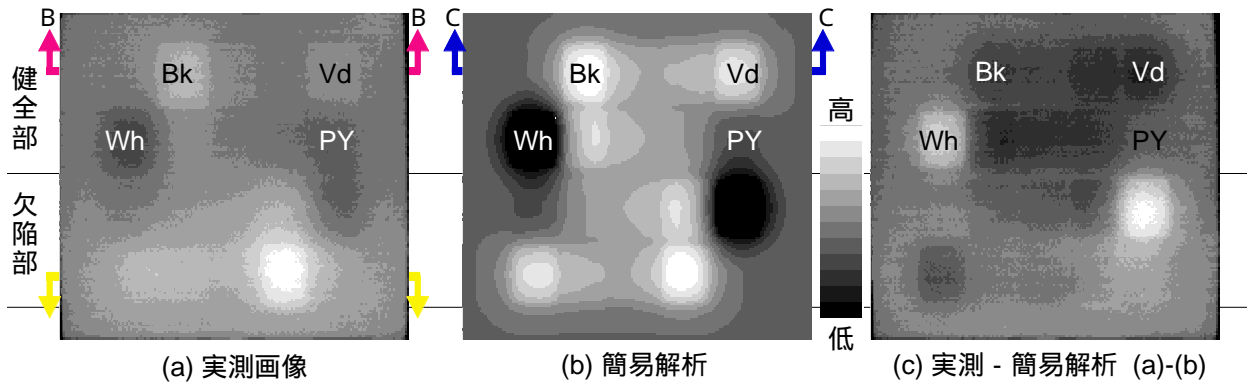


図-7 実測画像と解析画像の比較(有彩色, 欠陥厚さ10mm)

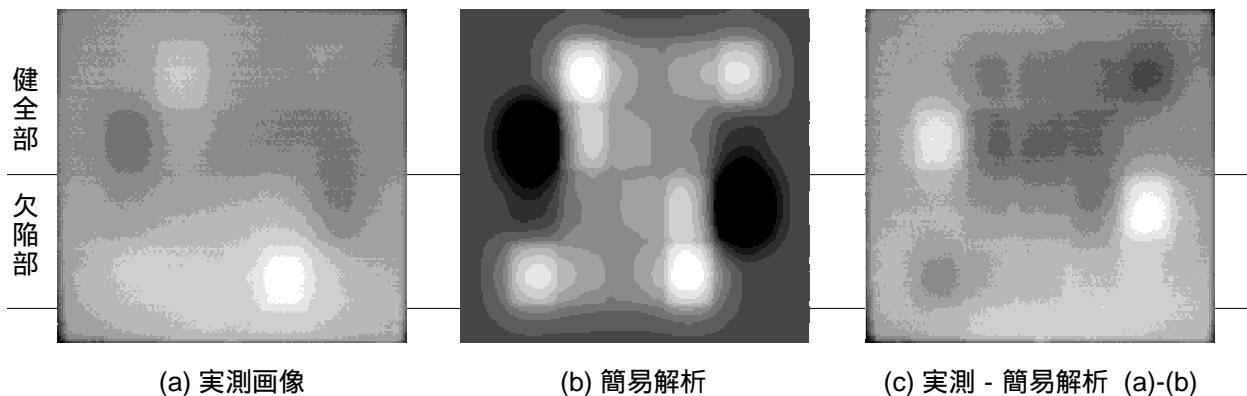


図-8 実測画像と解析画像の比較(有彩色, 欠陥厚さ5mm)

められる。図(d)は、図(a)および図(b)中に示した位置における表面温度の分布である。表面色がブラックの箇所および淡緑色のピリジアン製の箇所の健全部の表面温度が数値解析結果とよく一致していることがわかる。その他、表面温度分布の大きな傾向は比較的再現されているが、色彩によっては温度差がある。

図(c)は、図(a)から図(b)を減算したものであるが、表面色がブラックの箇所(Bk)等で高温となる影響は除去できているものの、表面色がホワイトの箇所(Wh)等で前述の影響が新たに発生している。それ以外の部分では、無彩色供試体よりもばらつきが見られるが、比較的影響を除去できているといえる。

図-8は、欠陥厚さ5mmの有彩色供試体の実測画像と解析画像の比較である。欠陥が薄いことで、実測画像からの欠陥部の判断はより困難になっているが、基本的には、図-7と同様の傾向が認められる。

4. まとめ

本報では、色彩値による日射吸収率を考慮した表面温度の簡易解析手法を提案し、実測のサーモグラフィ画像の処理に適用した。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- 1)本簡易解析手法によって、無彩色供試体の実測画像を再現でき、実画像からの減算により、表面色の影響をある程度除去することが可能となる。
- 2)日射吸収率は、分光測色計の測定値をそのまま用いたが、表面色がホワイトの箇所を低く評価する傾向にあるため、何らかの補正を検討する必要がある。
- 3)有彩色供試体では、色彩によるばらつきが若干生じる。今回の解析結果では、表面色がブラック、ピリジアンの箇所でよく一致し、ホワイト、イエローの箇所で低くなった。

今後、解析精度の向上を図るとともに、さらなる検証実験によってデータの蓄積を行う予定である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、気象データの一部を、中野優先生(名古屋大学・助手)にご提供いただいた。なお、本研究費の一部は、平成16年度日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(B)によった。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1)桃木昌子, 山田和夫:サーモグラフィ法によるコンクリートの内部評価に及ぼす測定表面色分布の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), A-1, pp.595-596, 1997.9
- 2)小島武男, 中村洋 共編:現代 建築環境計画, 新建築学叢書, オーム社, pp.93-153, 1983.3
- 3)藤森繁, 谷川恭雄, 森博嗣, 黒川善幸, 青木孝義, 宮部喬司:モルタルの表面色を考慮した赤外線サーモグラフィ画像の補正手法に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), A-1, pp.835-836, 2003.9
- 4)宮部喬司, 谷川恭雄, 森博嗣, 黒川善幸, 藤森繁:赤外線画像に及ぼす測定面の表面色および表面状態の影響に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), A-1, pp.837-838, 2003.9
- 5)矢川元基:流れと熱伝導の有限要素法入門, 有限要素法の基礎と応用シリーズ8, 培風館, pp.103-121, 1983.9
- 6)渡部哲巳, 黒川善幸, 森博嗣, 谷川恭雄:サーモグラフィ法によるコンクリートの内部欠陥推定に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.589-594, 1993.6
- 7)庄司正弘:伝熱工学, 東京大学機械工学 6, 東京大学出版会, pp.35-51, 1995.3
- 8)藤森繁, 森博嗣, 黒川善幸, 谷川恭雄:色彩値による日射吸収率分布を考慮した表面温度の簡易解析手法, 日本建築学会東海支部研究報告集, No.43, pp.33-36, 2005.2