

# 論文 照度分布を考慮した人工光源によるサーモグラフィ画像の補正手法に関する研究

黒川 善幸\*1・藤森 繁\*2・谷川 恭雄\*3

要旨：壁面の内部欠陥の非破壊検査手法として赤外線サーモグラフィ法が用いられているが、日射のない条件下では、人工熱源が必要である。しかしながら、検査面を均一に加熱することは困難であり、熱画像もその影響を受けることが指摘されている。そこで本研究では、人工光源による検査面の照度分布に着目し、入射熱量の分布を考慮した数値解析手法を提案した。供試体実験の結果、全面1色塗り供試体の場合、デジタルカメラによる輝度分布測定による補正は、照度計で測定した照度分布を用いるよりも良好であった。

キーワード：赤外線サーモグラフィ, 内部探査, 人工光源, 3次元定常熱伝導重畳法

## 1. はじめに

近年、各種の災害や事件・事故等により、構造物の安全性に関する社会一般からの信頼が、設計・施工・維持管理の全ての段階において揺るがされている。そのため、オーナーや利用者に対して構造物の現状を客観的かつ解りやすく説明するためのシステムが期待されている。特に、内部の見えないRC構造物においては、内部探査が不可欠であり、非破壊検査による内部欠陥等の早期発見が求められている。

表面温度を画像として撮影する赤外線サーモグラフィ法による壁面の内部探査は、熱伝導状態が正常でない箇所を探知するものであるが、加熱の方法として、日射を利用するもののほか、人工熱源により加熱する方法が検討されている。日射の加熱力は強力であるが、適用が外壁に限られ、また、結果が立地や気象条件に大きく左右されることから、室内やトンネルなどに適用可能な加熱法に関する研究が盛んに行われている<sup>1-3)</sup>。人工熱源には、室温を上げるタイプのほか、可視光線や赤外線を検査面に照射して、局所的に加熱するタイプがある。このような光線照射方式の場合、加熱する光線の分布が一樣でないこと、検査面における吸収量が太陽光と

同様に表面色の影響を受ける点が問題とされるが、これらを解析的に取り扱った研究は少ない。

筆者らは既に、壁面の表面温度に与える表面色の影響について考察したほか<sup>4)</sup>、壁表面の各点について3次元の定常熱伝導を重ね合わせる簡易解析手法によって、サーモグラフィ法による熱画像を補正する手法について提案した<sup>5)</sup>。本研究では、この3次元定常熱伝導重畳法において照度分布を用いて入射熱量を考慮できるよう改良した。さらに、モルタル供試体に対して、ハロゲンライトの照射により強制的に加熱する実験を行い、本解析手法の適用性を検討した。

## 2. 解析手法の概要

### 2.1 3次元定常熱伝導重畳法

3次元定常熱伝導重畳法は、壁表面を格子状のセルに分割し、各セルに入力した熱量の3次元的な熱伝導を重ね合わせる簡易解析手法であり、計算量も少なく、表面色の影響を考慮しながら、赤外線画像の分解能に容易に合わせることが出来る点に特徴がある<sup>5)</sup>。

まず、内部発熱が無い場合の定常熱伝導の支配方程式は、次式で与えられる。

\*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 博士(工学)(正会員)

\*3 名城大学 理工学部建築学科教授 工博 (正会員)

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

ここに， $\theta$ ：座標  $(x, y, z)$  の温度 (K)，

$\lambda$ ：熱伝導率 (W/(m・K))

ここで，何らかの光線が壁の表面に照射されている場合を考える。 $x = 0$  を壁の表面とし， $(0, y, z)$  における光線吸収率を  $a$  とする。 $x = 0$  における境界条件として，光線の放射の強さ  $J$  (W/m<sup>2</sup>) による熱流束  $q_s$  と，気温  $\theta_{oa}$  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。

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

ここに， $q_x$ ： $x$  方向の熱流束 (W/m<sup>2</sup>)，

$\alpha_o$ ：壁表面の熱伝達率 (W/(m<sup>2</sup>・K))，

$\theta_{oa}$ ：気温 (K)，

$\theta_w$ ：壁の表面温度 (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。

図-1 に示す壁表面の任意の微小領域について，微小領域の光線吸収率を  $a$ ，面積を  $dA$  とすると，放射の強さ  $J$  の場合に吸収する熱量は  $aJdA$  となる。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。

$$q_r = \frac{b a J dA}{2\pi r^2} = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} \quad (3)$$

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  $\theta_{rs}$  が求められる。

$$\theta_{rs} = \frac{b a J dA}{\pi \lambda r} \quad (4)$$

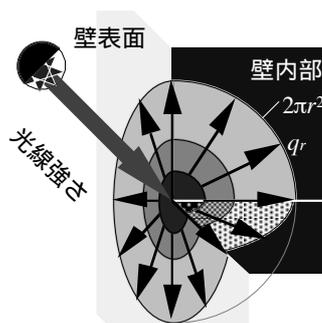


図-1 3次元定常熱伝導

この放射の強さ  $J$  および吸収率  $a$  は，各セルで設定できるため，図-2 に示すように，面的な分布をそれぞれ設定して掛け合わせることで，表面色や光線の当り具合の不均一さを考慮する。

## 2.2 放射の強さと照度

電磁波の持つ単位時間あたりのエネルギー量が放射束  $\Phi$  (W) であるが，波長  $\lambda$  (nm) ごとの放射束  $\phi(\lambda)$  に標準比視感度  $V(\lambda)$  を乗じて波長  $\lambda$  で積分したものが光束  $F$  (lm) である<sup>6)</sup>。したがって，光束  $F$  は，単位時間あたりの可視光の量を評価している。

$$F = K_m \int \phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

ここに， $K_m$ ：最大視感度 (= 680 lm/W)

この放射束  $\Phi$  と光束  $F$  を照射された面において微小面積  $dA$  で微分したものが，それぞれ放射の強さ  $J$  (W/m<sup>2</sup>) と照度  $E$  (lx) である<sup>6)</sup>。

$$J = \frac{d\Phi}{dA} \quad (6)$$

$$E = \frac{dF}{dA} \quad (7)$$

したがって，放射束の分光分布が変化しなければ，放射の強さと照度は比例関係にある。このことは，一定の可視光源の下で，入射する放射の強さに分布が生じている受照面においては，それに比例して照度も分布することを意味する。放射の強さを測定する機器に比べて，照度計は一般に広く普及していることから，照度分布の測定により，放射強さ分布を簡易に求めることができる。

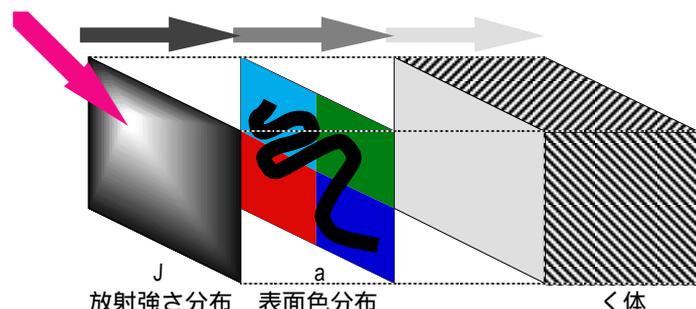


図-2 表面分布

### 3. 実験の概要

#### 3.1 供試体の概要

図 - 3 に、モルタル供試体の概要を示す。モルタルの調合は、水セメント比が  $W/C = 0.5$ 、砂セメント比が  $S/C = 2.0$  である。寸法は、 $200 \times 200 \times 50$  mm で、欠陥ありの供試体では、内部の図に示す位置に、厚さ 2 mm の発泡ポリエチレン模擬欠陥を埋設した。打設後、20

，60 %RH で 2 週間以上気中養生したあと、打設底面に屋外用水性塗料を塗装し表面とした。

表 - 1 に、塗装した各色とその吸収率を示す。供試体の塗装した各面において、分光測色計を用いて、標準の光 D65<sup>6)</sup> における分光反射率から、吸収率を算出した<sup>4)</sup>。塗装は、図 - 4 および写真 - 1 に示すように全面 1 色塗りまたは 4 分割 4 色塗りとした。そして、外形寸法が  $600 \times 600$  mm の田の字形の木枠の内側に供試体を 4 体セットし、各側面を発泡ポリスチレンで断熱した。模擬欠陥は、向かって左側があり、右側がなしの供試体である。

#### 3.2 測定の概要

図 - 5 に、測定の概要を示す。測定は、20

，60%RH の恒温恒湿室内で行った。赤外線カメラを供試体表面中央から、1,200 mm の位置にセットし、正面から撮影した。さらに、加熱用のハロゲンライト 4 台を正反射光がカメラに映り込まない位置にセットした。供試体までの水平距離は、600 mm である。

定常状態とするため、ライト照射開始から 120 分後に赤外線カメラで撮影したあと、供試体表面位置に紙を貼り、照度と輝度分布を測定した。照度は照度計により 50mm ピッチのグリッド上でマニュアル測定し、線形補間を行った。輝度分布は、デジタルカメラで撮影し、測定データを 0 - 1 の範囲で基準化し、補正によって線形化したものである。

#### 3.3 吸収率の修正

分光測色計では、可視光域しか測定できず、また、測色に用いる標準の光<sup>6)</sup> がハロゲンライトとは分光分布が大きく異なっているため、本

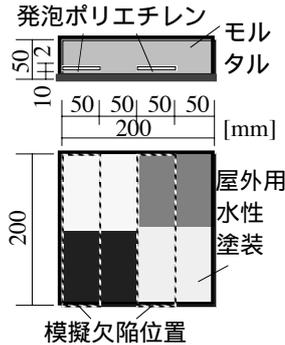


図-3 供試体の一例

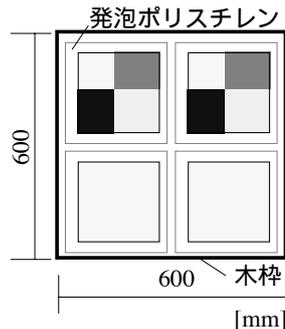


図-4 供試体の断熱

表 - 1 各色の吸収率

色	D65 吸収率	修正 吸収率
白	0.142	0.374
赤	0.831	0.877
青	0.848	0.889
黄	0.481	0.621
黒	0.951	0.964
オレンジ	0.631	0.731
空色	0.753	0.820
緑	0.924	0.944
ねずみ	0.771	0.833
フレッシュグリーン	0.724	0.799

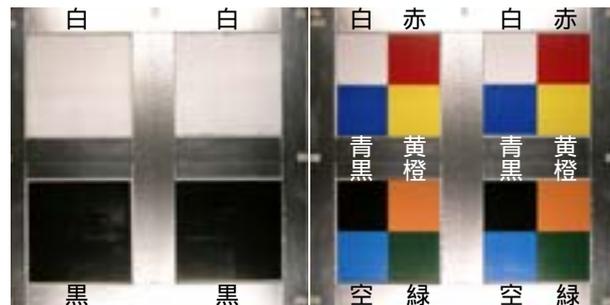


写真-1 供試体の例

解析のためには吸収率の修正が必要である。

図 - 6 に、標準の光 D65 による吸収率と本解析で用いる修正吸収率を示す。まず、白、黒、ねずみ色の全面 1 色塗り供試体の測定結果から、供試体表面の平均温度上

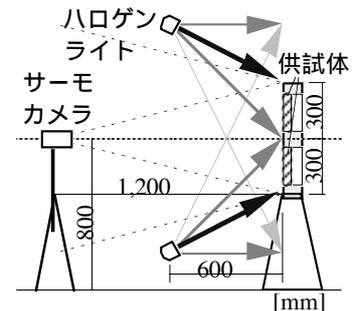


図-5 測定の概要

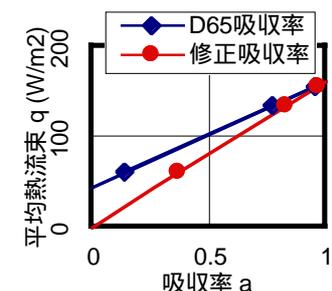


図 - 6 吸収率の修正

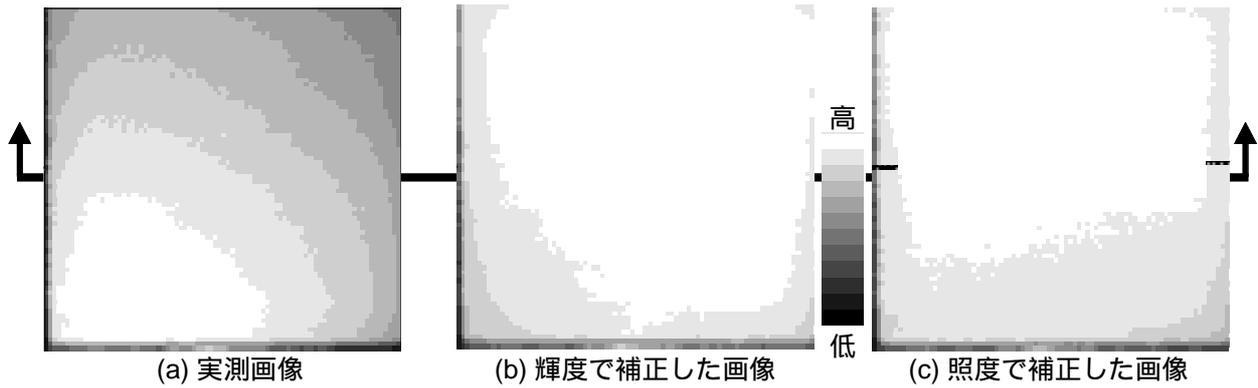


図-7 実測結果と解析結果の比較（全面黒色，欠陥なし）

昇量をそれぞれ算出し，平均熱流束  $q$  ( $W/m^2$ ) を求めた。これを図にプロットして回帰し，吸収率が  $a = 1$  の点を固定して，原点を通るように修正した。

また，このときの光線強さと輝度および照度の比例定数をそれぞれ求め，以下の解析に用い，解析画像を求めた。また，これを測定画像から減算して補正画像を得る。なお，画像は最高温度と任意の温度の間を11段階に等分したものである。

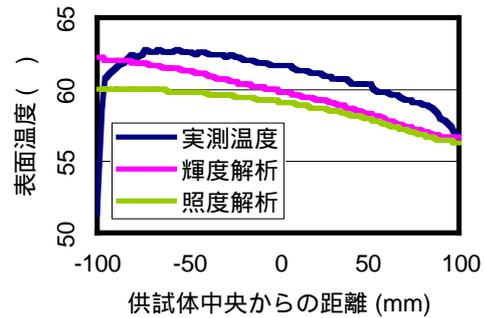


図-7 (d) 表面温度の分布

#### 4. 解析結果とその考察

##### 4.1 全面1色塗り供試体

図-7は，模擬欠陥のない全面黒色供試体の表面温度の実測結果と補正結果の比較である。図(a)の赤外線カメラによる実測画像では，光線のムラによって温度差が生じている。図(b),(c)の補正画像は，実測画像に比べて，温度分布がより扁平になっている。図(d)は，図(a)~(c)に示した供試体表面の中段位置における，実測と解析による表面温度の横断図である。実測温度とは差があるものの，本解析による温度分布では温度の勾配は比較的再現されている。実測温度との差は，照度より輝度を用いた解析結果の方が少ない。

図-8，9は，模擬欠陥のある全面白色供試体および黒色供試体の表面温度の実測結果と補正結果の比較である。いずれも，模擬欠陥のある位置で実測温度が高くなっているが，輝度による補正により，それがより鮮明となっている

ことが解る。また，図(d)においても，本解析による温度分布は，模擬欠陥の影響を受けることなく光線のムラによる温度勾配を表現していることが解る。また，照度より輝度を用いた解析結果の方がやや高温となっている。

##### 4.2 4分割4色塗り供試体

図-10, 11は，模擬欠陥のある4分割4色供試体の表面温度の実測結果と補正結果の比較である。図(a)の実測画像では，表面色の違いと光線のムラによって温度差が生じており，欠陥の位置は全く解らない状態である。図(b),(c)の補正画像は，特に図-11において欠陥位置が浮き出る結果となっている。図(d)は，図(a)~(c)に示した供試体の下半分の表面の中段位置における表面温度の横断図である。全面1色塗り供試体に比べて実測温度との差が大きい，本解析による温度分布は，模擬欠陥の影響を受けることなく光線のムラによる温度勾配を表現していることが解る。また，照度より輝度を用いた解析結果の方がやや高温となっている。

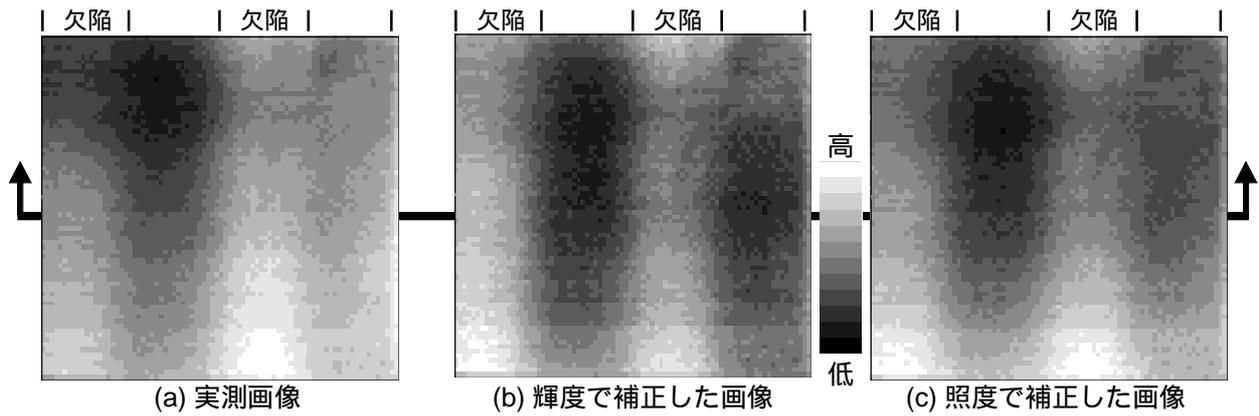


図-8 実測結果と解析結果の比較（全面白色，欠陥あり）

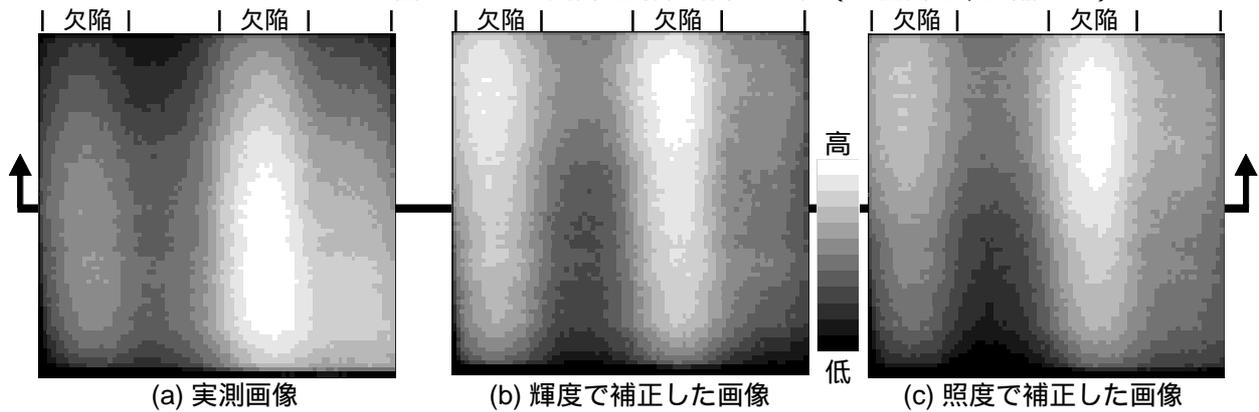


図-9 実測結果と解析結果の比較（全面黒色，欠陥あり）

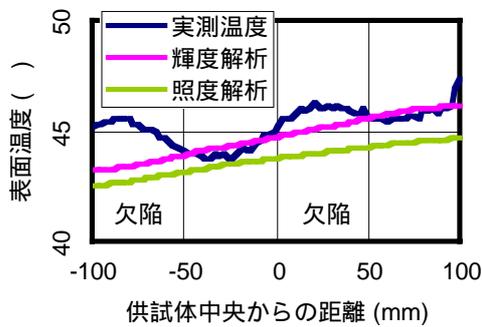


図-8 (d) 表面温度の分布

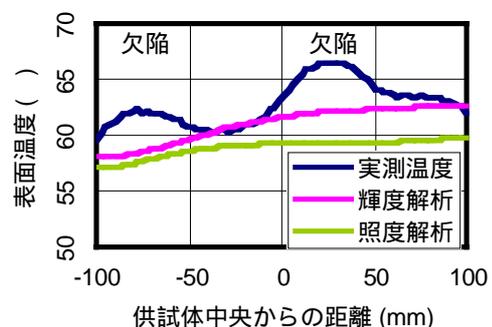


図-9 (d) 表面温度の分布

## 5. まとめ

本報では，照度分布を考慮した表面温度の定常3次元熱伝導重畳法による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) 照度の測定は，マニュアル操作で行ったため，簡便ではあったが，測定点数には限度があった。デジタルカメラの輝度分布による方法はより密度の高いデータが得られるが，単色のシート等で表面を覆う必要がある。
- 2) 全面1色塗り供試体では，本簡易解析手法に

よる結果を実測熱画像から減算することで，表面色および照度分布の影響を除去できる。

- 3) 4分割4色塗り供試体では，実測温度と解析結果に大きな温度差が生じた。

## 謝辞

本研究にあたり，吉永美香先生（名城大学・助教授），青木孝義先生（名古屋市立大学・助教授），寺西浩司先生（名城大学・助教授）の助力を得た。なお，本研究費の一部は，平成17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。

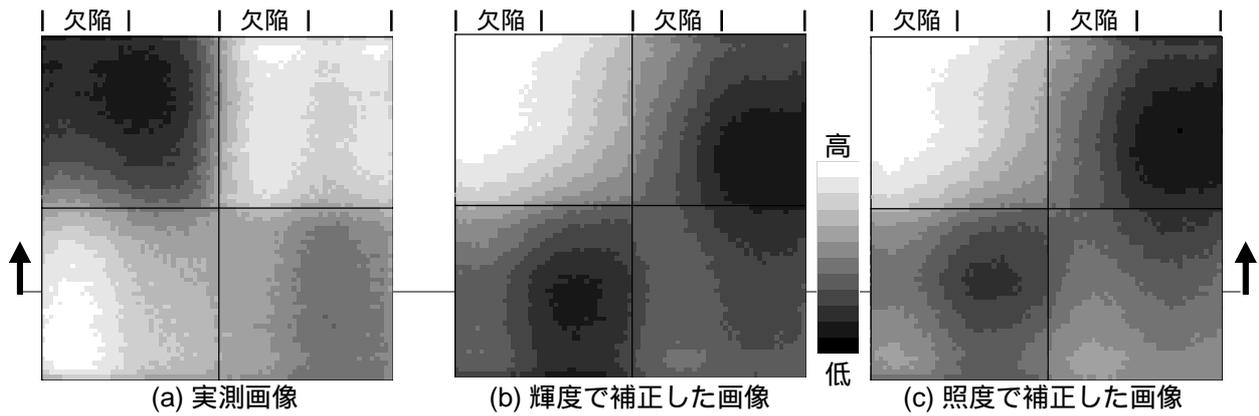


図-10 実測結果と解析結果の比較 (4分割白赤青黄, 欠陥あり)

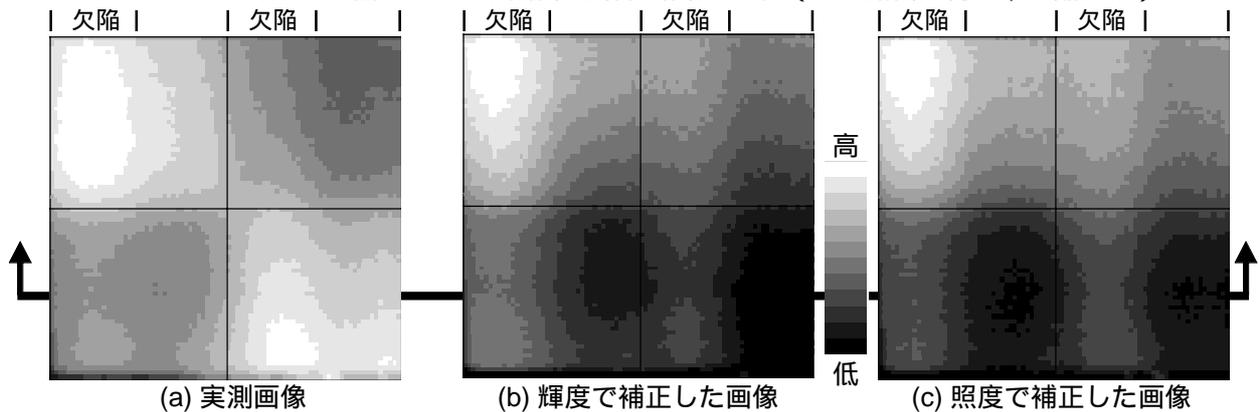


図-11 実測結果と解析結果の比較 (4分割黒橙空緑, 欠陥あり)

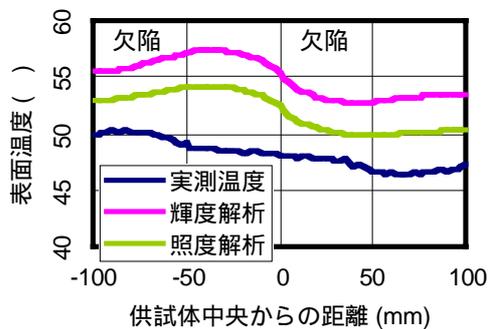


図 - 10 (d) 表面温度の分布

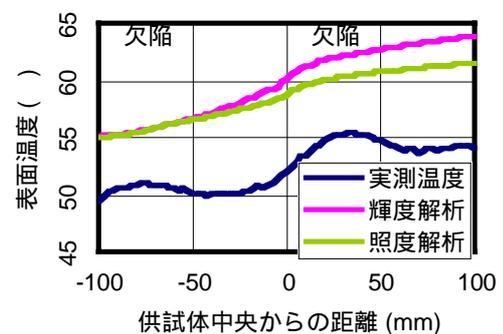


図 - 11 (d) 表面温度の分布

参考文献

- 1) 谷川恭雄・森博嗣・安龍男・井内浩：サーモグラフィによるタイル壁面の欠陥探査に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), A, pp.385-386, 1989.10
- 2) 山田和夫, 安藤秀則：強制加熱を利用したサーモグラフィによるコンクリートの内部評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1485-1490, 2002.6
- 3) 田中寿志, 仁平達也, 鳥取誠一, 栗田耕一：アクティブ赤外線法における照射光源の影響に関する基礎的研究, コンクリート工学年次

- 論文集, Vol.27, No.1, pp.1753-1758, 2005.6
- 4) 藤森繁, 黒川善幸, 谷川恭雄：表面色を考慮した赤外線サーモグラフィ画像の補正方法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.600, pp.23-28, 2006.2
- 5) 黒川善幸, 藤森繁, 谷川恭雄：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1747-1752, 2005.6
- 6) 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.57-259, 1983.3