

赤外線映像装置で測定されたサーモグラフィについての 等温線表示による劣化部の鮮明化

Clearing defected parts by indicating isothermal lines about thermography
measured with infrared thermography device

今西直人*, 曾根彰**, 増田新***, 太田佳秀****

Imanishi Naoto*, Sone Akira**, Masuda Arata***, Ohta Yoshihide****

*工修, (株)アークコンサルタント (〒709-4606 岡山県久米郡久米町中北上1646)

**工博, 京都工芸繊維大学教授, 工芸学部 (〒606-8585京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

*** 工博, 京都工芸繊維大学助教授, 工芸学部 (〒606-8585京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

**** 京都工芸繊維大学大学院修士課程 (〒606-8585京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

Infrared thermography has recently been utilized to detect faults in concrete structures. It is, however, not easy to judge the internal conditions of concrete because the distribution of temperatures on the surface of the concrete structure contains some kinds of noises which are derived from complexity of concrete, uneven surface and dirt. Accordingly, a method to remove the noises in the temperature distribution is discussed in this report. The method consists of three steps. The first step is to calculate the two dimensional wavelet transform of the temperature distribution. The second step is to remove the small components of the above wavelet transform. The third step is to calculate the two dimensional inverse wavelet transform of the remaining components of it. The compensated temperature distribution shows the faults more clearly.

Key Words : nondestructive test, infrared thermography, noise, wavelet transform, concrete

キーワード: 非破壊検査, 赤外線映像装置, ノイズ, ウェーブレット変換, コンクリート

1. 緒言

コンクリート構造物の維持管理において, 劣化の起点となる可能性が高いジャンカなどの施工欠陥を発見し, 浮きやひびわれなどの劣化が発生・成長する過程を監視して劣化の初期段階からその進行状態を把握することは, 構造物の保守・延命を効果的に行う上で重要である. 赤外線映像装置で測定したサーモグラフィをこのような目的で利用することがコンクリート構造物の検査分野において一般的になってきている¹⁾.

しかし, 従来のサーモグラフィによる劣化部の検出は対象物表面における温度分布を色分けして色の濃淡で表したものを利用することを基本とするが, 色分けと色の濃淡から目視で劣化部を検出することは, 多分に観測者の勘と経験に負うところが大きく, 検出精度も十分に高いとはいえない. そのため, 精度改善を目的とする研究²⁾が鋭意なされている. その一環として, 本報告は等高線を描いた地形図から地形の様子が容易に読み取ることができる点に着目し, 表面温度分布を等温線で表し, 等温線を色分けして描くことによって劣化部の存在をより鮮明にすることを考えた.

ところが, コンクリート構造物の表面温度データには元来コンクリートがセメント, 細骨材, 粗骨材などから構成される複合体であることに起因した局所的な熱的性質の不均一やコンクリート表面の凹凸および汚れなどによって生じる温度変化がノイズとして含まれる. このようなノイズの大きさに比べて劣化部の存在を反映して表面温度分布に現われる温度変化が相対的に小さいと, 劣化部の存在に基づく等温線がノイズに基づく等温線に紛れてしまうので検出が困難になる. 従って, 表面温度データに含まれるノイズを前処理として除去することは, 等温線を描く上で重要である. また, それだけに留まることなく, サーモグラフィを利用するその他の劣化部検出方法の適用においても, このようなノイズ除去は検出精度を向上させる点で共通して重要であると思われる.

そこで, 本報告では, 赤外線映像装置によって計測された表面温度データに含まれるノイズを除去した上で表面温度分布を色分けした等温線で表すことにより, コンクリート構造物に存在する劣化部に基づく温度変化を鮮明化して, 従来よりも容易に劣化部を検出する方法について検討した.

2. ノイズ除去法

本報告において用いたノイズ除去法³⁾は、信号に含まれるノイズの除去およびデータの圧縮に利用されているものであって、対象信号の統計的性質が明確でない場合でも適用可能な方法であると考えられている。その処理内容は1次元の直交ウェーブレット変換⁴⁾を2次元に拡張して応用するものであって具体的には次のようなステップからなっている。

すなわち、表面温度データは2次元の離散データとして与えられるものとし、これを $f(m, n)$ で表す。表面温度分布 $f(m, n)$ をレベル0 ($j=0$) のスケーリング係数 $s_{m,n}^{(0)}$ とみなして、横軸方向に1次元直交ウェーブレット変換を行なうと次式のようになる。

$$s_{m,n}^{(1,x)} = \sum_k p_{k-2m} s_{k,n}^{(0)} \quad (1)$$

$$w_{m,n}^{(1,x)} = \sum_k q_{k-2m} s_{k,n}^{(0)} \quad (2)$$

ここで、 $s_{m,n}^{(1,x)}$ および $w_{m,n}^{(1,x)}$ はそれぞれ横軸方向のスケーリング係数およびウェーブレット展開係数を示す。

次に、それぞれの係数に対して縦軸方向に1次元直交ウェーブレット変換を行なうと次のようにレベル1 ($j=1$) の各係数が得られる。

$$s_{m,n}^{(1)} = \sum_l p_{l-2n} s_{m,l}^{(1,x)} \quad (3)$$

$$w_{m,n}^{(1,h)} = \sum_l q_{l-2n} s_{m,l}^{(1,x)} \quad (4)$$

$$w_{m,n}^{(1,v)} = \sum_l p_{l-2n} w_{m,l}^{(1,x)} \quad (5)$$

$$w_{m,n}^{(1,d)} = \sum_l q_{l-2n} w_{m,l}^{(1,x)} \quad (6)$$

ここで、 $w_{m,n}^{(1,h)}$ は横軸方向にスケーリング関数、縦軸方向にウェーブレットを作用させた係数を示す。 $w_{m,n}^{(1,v)}$ は横軸方向にウェーブレット、縦軸方向にスケーリング関数を作用させた係数を示す。また、 $w_{m,n}^{(1,d)}$ は縦方向および横方向ともにウェーブレットを作用させた係数を示す。

式(1)～式(2)と式(3)～式(6)とをまとめると次のようになる。

$$s_{m,n}^{(1)} = \sum_l \sum_k p_{k-2m} p_{l-2n} s_{k,l}^{(0)} \quad (7)$$

$$w_{m,n}^{(1,h)} = \sum_l \sum_k p_{k-2m} q_{l-2n} s_{k,l}^{(0)} \quad (8)$$

$$w_{m,n}^{(1,v)} = \sum_l \sum_k q_{k-2m} p_{l-2n} s_{k,l}^{(0)} \quad (9)$$

$$w_{m,n}^{(1,d)} = \sum_l \sum_k q_{k-2m} q_{l-2n} s_{k,l}^{(0)} \quad (10)$$

同様に、上式のうち $s_{m,n}^{(1)}$ のみをさらに4つの成分に分解するとレベル2 ($j=2$) の係数である $s_{m,n}^{(2)}$ 、 $w_{m,n}^{(2,h)}$ 、

$w_{m,n}^{(2,v)}$ および $w_{m,n}^{(2,d)}$ が得られ、このような操作を繰り返すことにより2次元の多重解像度分解を行うことができる。分解のレベルが上がるごとにスケーリング係数およびウェーブレット展開級数にはより低い周波数の成分が現われる。

表面温度データに含まれる劣化部の存在に基づく温度変化の成分とノイズに基づく温度変化の成分とを比較すると、後者は局所的なものであるから比較的高周波数であって値は小さいと思われる。従って、分解のレベルを上げて劣化部の存在に基づく低周波数の温度変化を代表する係数を顕著にした上で、得られた係数全体から値が小さいものを除けば相対的に劣化部が強調されることになる。すなわち、多重解像度分解の操作をL回繰り返してレベルL ($j=L$) のスケーリング係数 $s_{m,n}^{(L)}$ とウェーブレット展開級数 $w_{m,n}^{(L,h)}$ 、 $w_{m,n}^{(L,v)}$ および $w_{m,n}^{(L,d)}$ を求め、これらの係数を絶対値の大きい順に並べて上位 $\alpha\%$ の係数のみを残し、それ以外の級数を0にすることによって上記のノイズ除去が行なえる（以下において α を係数使用比率という）。続いて、これらの縮退した級数を次式に示すようにして2次元ウェーブレット逆変換するとレベル(L-1) ($j=L-1$) のスケーリング係数が再編成される。

$$s_{m,n}^{(L-1)} = \sum_k \sum_l [p_{m-2k} p_{n-2l} s_{k,l}^{(L)} + p_{m-2k} q_{n-2l} w_{k,l}^{(L,h)} + q_{m-2k} p_{n-2l} w_{k,l}^{(L,v)} + q_{m-2k} q_{n-2l} w_{k,l}^{(L,d)}] \quad (11)$$

以上に示した再構成をL回繰り返して行くと最終的にノイズが除去された表面温度分布 $f_c(m, n)$ が得られる。この補正後の表面温度分布 $f_c(m, n)$ について等温線を描けば元の表面温度分布 $f(m, n)$ を用いる場合よりも鮮明に劣化部の特徴を視認することができると考えられる。

本報告では、コンクリートに存在する劣化部の代表的なものとして、コンクリート内部に存在する空隙と表面部に存在するひび割れとを検討の対象とした。はじめに、これらの劣化部が存在する平板を対象として、有限要素解析による定常伝熱解析を行って得られた表面温度分布に上記ノイズ除去法を適用した場合の効果を検証した。次に、小型の試験体を用いた実験から得られた実験データについて検証した。

3. 解析データについての検討

3.1 空隙モデル

図-1は、コンクリートを想定した熱伝導率 $1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ の物質からなる $300 \times 300 \times 50 \text{ mm}$ の平板であってその中心部に深さ 20 mm から 30 mm までの範囲に $100 \times 100 \text{ mm}$ の空隙が存在する空隙モデルを示している。この平板の上面からの熱流束が 100 W/m^2 、4つの

側面における熱流束が 0 W/m^2 ，底面の温度が 20°C に固定されているときの平板上面における温度分布を定常伝熱解析で求め，それを色分けした等温線で示した画像を図-2に示す．空隙直上での温度は 26.9°C であり，空洞から十分に離れた点での温度は 21.5°C である．また，画像の一辺の画素数 p は $64(=2^6)$ である．

(四分の一対称モデル)

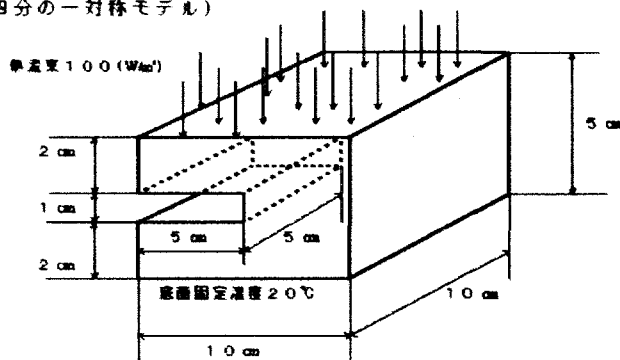


図-1 空隙モデル

この場合，空隙部の存在に起因して平板上面における表面温度分布は一様ではなく，その標準偏差を σ とすると $\sigma=0.94^\circ\text{C}$ である．この表面温度分布に平均値が0であって分散がそれぞれ σ^2 および $(3\sigma)^2$ である白色ガウスノイズを加えたものを等温線表示すると図-3(a)~(b)のようになる．ノイズが加えられた結果，図-3(a)および(b)の表面温度分布における最高温度は 28.5°C および 31.9°C ，最低温度は 18.2°C および 9.6°C ，平均温度はともに 21.8°C ，標準偏差は 1.3°C および 3.0°C となっている．図-2の画像のように平板上面での表面温度分布にノイズが含まれないときは等温線形状から空隙部の平面的な位置と範囲とを容易に目視によって識別できると思われる．しかし，現実の建造物の表面温度分布にはノイズが含まれるので，図-3に示すように，ノイズが大きいほどそのノイズの影響を受けて空隙部の存在を視認できるような等温線を描くことが困難になる．

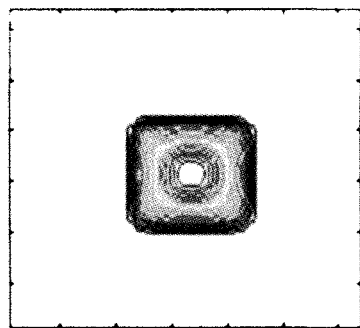
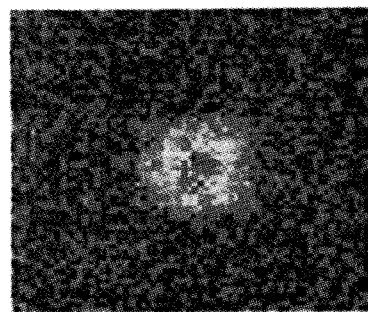
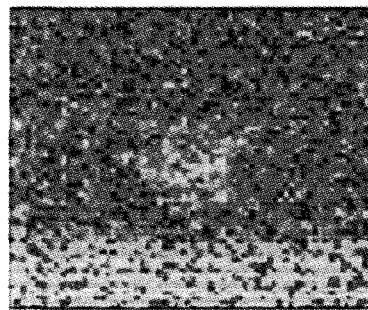


図-2 等温線画像 (ノイズ無し)



(a) 分散 σ^2



(b) 分散 $(3\sigma)^2$

図-3 等温線画像 (ノイズ有り)

そこで，2章で示したノイズ除去法によって，図-3に示す表面温度分布からノイズを除去を試み，この表面温度分布をウェーブレット変換してレベル $j=5$ のスケーリング係数およびウェーブレット展開係数を求め，2章で定義した係数使用比率 α を3，1，0.5および0.1%としたときのノイズの除去効果を調べた．その結果を図-4に示している．係数使用比率 α が3%から0.5%まで減少するに従ってノイズがより多く除去され，空隙部直上における表面温度上昇部の等温線がしだいに鮮明に現れてくるのがわかる．しかし，係数使用比率 α を0.1%まで下げると現実とは全く異なる温度分布になってしまう．このように，ノイズ除去方法を適用することによって等温線がうまく描けることがわかったが，実際に利用する上では妥当な係数使用比率 α のおよその値を設定することが必要となる．

これを受けて，ノイズを含む表面温度分布が与えられたときに係数使用比率 α の妥当な値を設定する方法について検討した．そのため，次式によって求めることができる，ノイズ除去法を適用した後の表面温度分布 $f_c(m,n)$ と元の表面温度分布 $f(m,n)$ との平均二乗誤差 mse を利用した．なお， p は画像の一辺の画素数である．

$$mse = \sum_k \sum_l (f_c(k,l) - f(k,l))^2 / p^2 \quad (12)$$

図-5の折れ線グラフは，ノイズの標準偏差が 3σ で

ある表面温度分布に対してノイズ除去法を適用したときの係数利用率 α と適用前後の平均二乗誤差 mse との関係を示している。係数利用率 α が小さいほど適用後の表面温度分布 $f_c(m,n)$ と元の表面温度分布 $f(m,n)$ との差が増加するので平均二乗誤差 mse の値が大きくなる。

この傾向をより明瞭にするために、平均二乗誤差 mse のグラフを図-5に太線で示した累乗近似曲線によって近似し、この累乗近似曲線の曲率と係数利用率 α との関係を示したものが図-6である。図-5にその累乗近似式および決定係数 R^2 を併記しているが、累乗近似式において y は平均二乗誤差 mse 、 x は係数利用率 α をそれぞれ示している。近似についての決定係数 R^2 は0.95であって0.8よりも十分に大きいので、近似の精度はかなり良いと考えられる。

図-6において、係数利用率 α が1%より小さくなると累乗近似曲線の曲率が急激に大きくなっている。これは、係数利用率 α が1%より大きい範囲ではノイズの除去が中心であるため適用後の表面温度分布 $f_c(m,n)$ と元の表面温度分布 $f(m,n)$ との差が小さいのに対して、1%より小さくなると表面温度分布の本質的な部分まで除去されるため両者の差が大きくなり、平均二乗誤差 mse が急激に増加することに起因していると考えられる。したがって、図-6から、 α の値としておよそ1%前後に設定することが妥当と判断されるが、これは図-3について検討した結果とほぼ一致している。

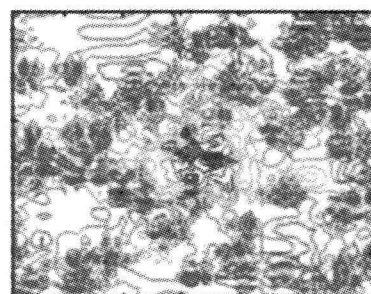
このように、ノイズ除去を行なうときには、まず、計測された表面温度分布 $f(m,n)$ について係数利用率 α をいくつか変えてノイズ除去を行い、その結果得られた表面温度分布 $f_c(m,n)$ と元の表面温度分布 $f(m,n)$ との平均二乗誤差 mse のグラフを得る。そして、平均二乗誤差 mse の累乗近似曲線の曲率を求めて、曲率の値が急変するときの α の値を選択すればよいと考えられる。累乗近似曲線を用いるのは、連続的な α に対する曲率の値を求め易くするためである。

3. 2 ひび割れモデル

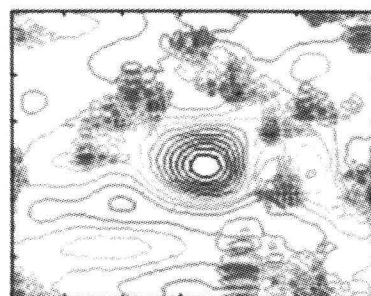
図-7は熱伝導率 $1W/m/^\circ C$ の物質からなる $1000 \times 1000 \times 200mm$ の平板の上面中央部付近から幅1mm、長さ300mmのひび割れが上面となす角度が 30° で深さ50mmまで貫入したものを模擬したモデルを示している。

この平板の上面からの熱流束が $25W/m^2$ 、4つの側面における熱流束が $0W/m^2$ であり、底面の温度を $20^\circ C$ に固定したときの平板上面における温度分布を定常伝熱解析で求め、それを色分けした等温線で示した画像が図-8(a)である。この場合の表面温度はひび割れの開口を挟んでひび割れが傾斜した側で高くなり、その反対側で低くなっており、開口の長さ方向の中央においてそれぞれ温度が最高または最低となるという特徴がある。

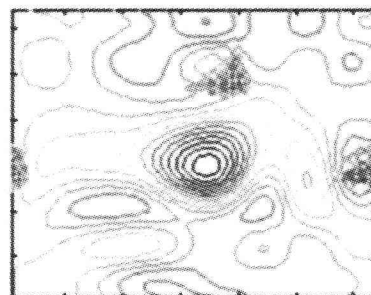
この表面温度分布の標準偏差 σ を求めると、 $\sigma = 0.28^\circ C$ であり、平均値が0であって分散が σ^2 である白色ガウスノイズを表面温度分布に加えたものを図8-(b)に示す。ノイズを加えた結果、表面温度分布における最高温度は $28.4^\circ C$ 、最低温度は $23.7^\circ C$ 、平均温度は $25.0^\circ C$ および標準偏差は $0.4^\circ C$ となっている。係数利用率 α を



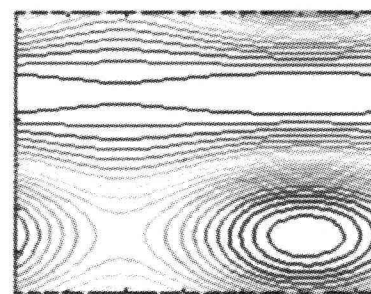
(a) $\alpha = 3\%$



(b) $\alpha = 1\%$



(c) $\alpha = 0.5\%$



(d) $\alpha = 0.1\%$

図-4 等温線画像 (ノイズ除去後)

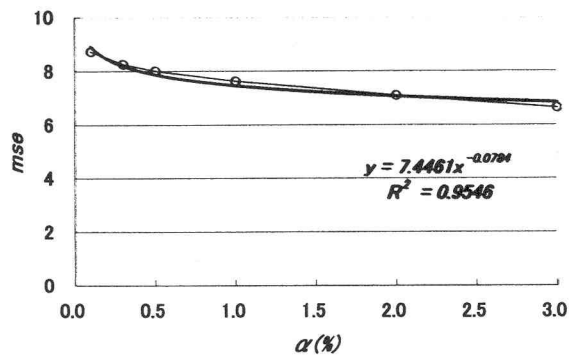


図-5 α - mse の関係

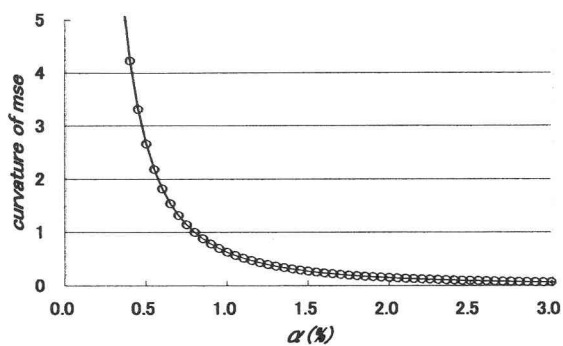


図-6 α - 曲率の関係

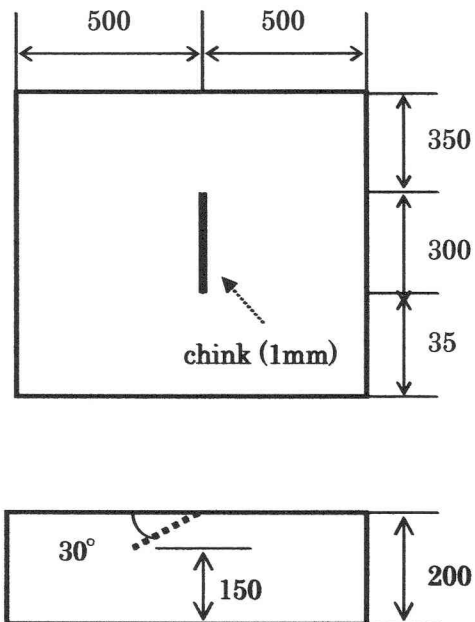
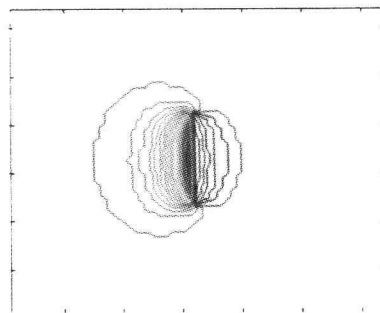
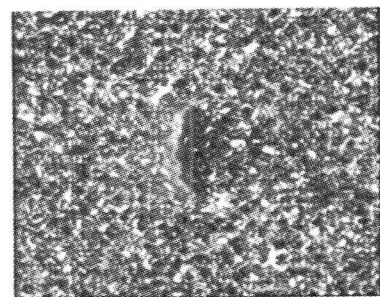


図-7 ひび割れモデル



(a) ノイズ無し



(b) ノイズ有り

図-8 等温線画像

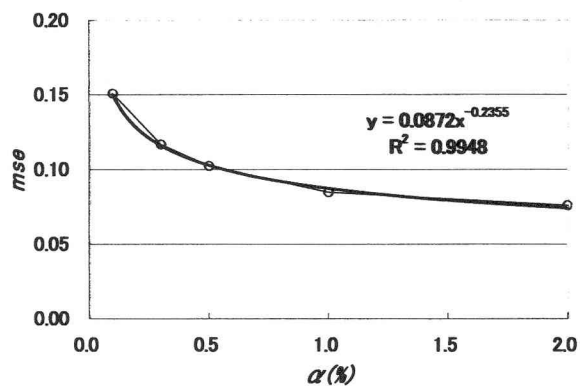


図-9 α - mse の関係

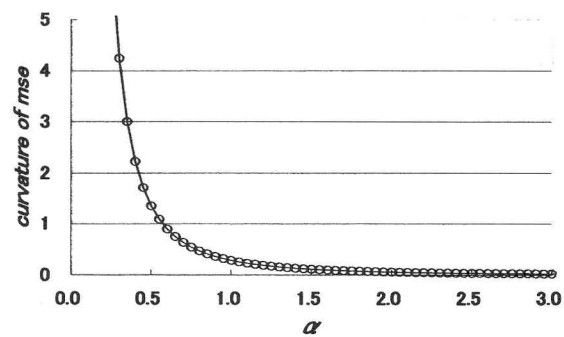


図-10 α - 曲率の関係

いくつか変えてノイズ除去を行い、適用前後の表面温度分布 $f_c(m,n)$ と元の表面温度分布 $f(m,n)$ との平均二乗誤差 mse について前記と同様の処理を行なうと図-9および図-10のようになる。この場合は1%より若干小さい係数利用比率 α で、平均二乗誤差 mse のグラフの曲率が急変しており、たとえば $\alpha=0.75\%$ を選択すると図-11のようになり、ひび割れ周辺の等温線がかなり明瞭に描けるようになる。

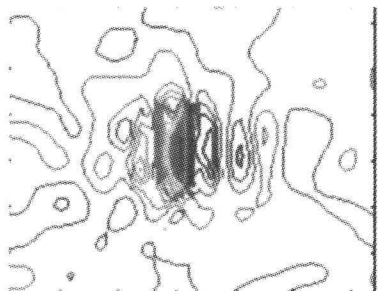


図-11 等温線画像（ノイズ除去後）

4. 実験データについての検討

4.1 空隙モデル

図-12に示す $300 \times 300 \times 100\text{mm}$ のモルタル試験体を作成して、空隙を模擬するためにその中心部を縦に貫通する断熱材（スタイロフォーム、 $300 \times 100 \times 25\text{mm}$ ）を設置した。 $300 \times 300\text{mm}$ のひとつの露出面以外は厚さ 10mm の木製型枠で覆ったままにして露出面を真南に向けて直立させ、快晴の日の日中に日射により加熱した。図-13は加熱開始3時間後における露出面のサーモグラフィであり、画像の1辺の画素数は、 $256 (=2^8)$ である。

露出面における最高温度は 24.8°C 、最低温度は 18.6°C 、平均温度は 20.7°C 、標準偏差は 1.0°C である。この実験データと図-3に示す画像の解析データとを単純に比較することはできないが、含まれる白色ノイズの標準偏差が σ の場合の解析データが実験データに比較的近い特性を有していると思われる。

図-13のサーモグラフィーを目視観察すると、試験体内部の断熱材の存在が視認できるが、十分に明瞭であるとは言えない。なお、下端中央から1時方向に見られる筋状の高温部は、コンクリート表面に存在する幅 10mm 、深さ 1mm 程度の傷による影響である。

図-13のサーモグラフィに対応する表面温度分布をそのままにして、すなわち係数使用比率 α を 100% として等温線を描くと図-14(a)のようになり、空隙部の存在が視認できるような等温線とはならない。ついで、係数使用比率 α を 1% 以下に設定してノイズ除去を行った上で等温線で描くと図-14(b)~(d)のようになり、断熱材が内

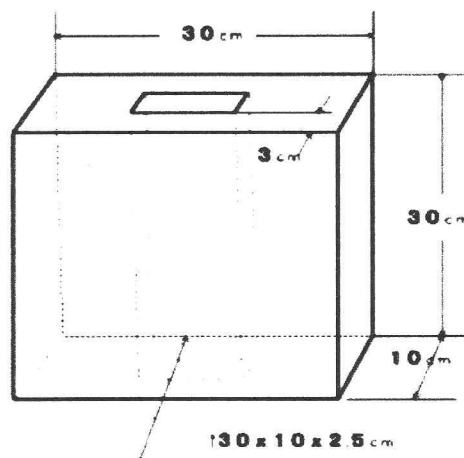


図-12 試験体（空隙モデル）

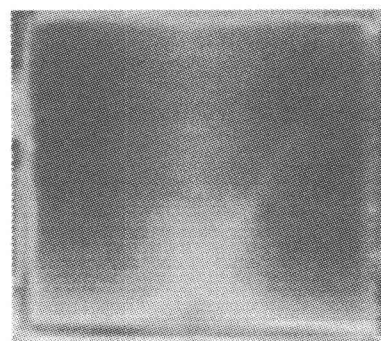


図-13 サーモグラフィ（空隙モデル）

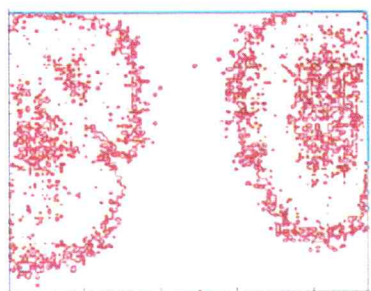
在する箇所の試験体表面の温度が高いことがより明確になって、断熱材の存在が視認できるようになっている。

図-15は上記ノイズ除去における係数利用比率 α と平均二乗誤差 mse を累乗近似曲線で近似したときの累乗近似曲線の曲率との関係を示している。両者の関係から、この実験データについては係数利用比率 α がおおよそ 0.5% より小さくなると表面温度分布の本質的な部分が除去され始めると考えられる。

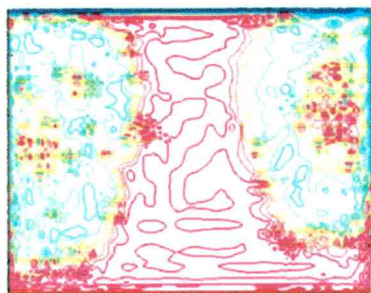
そこで、改めて図-14を観察すると、係数利用比率 α が 1% のときは試験体画像の左右にノイズによると思われるシミ状のものが見られる。しかし、 α が 0.3% 以下ではこれらが完全に消失し、ノイズ除去が完了していると考えられるが、 0.05% まで下げると等温線が乱れており表面温度分布の本質的な部分も除去されていると思われる。

4.2 ひび割れモデル

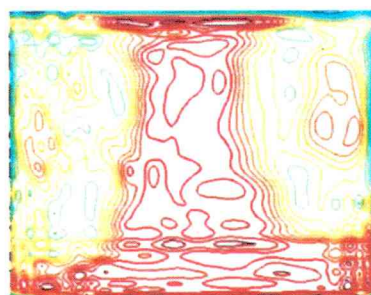
図-16は $450 \times 600 \times 200\text{mm}$ のコンクリート試験体であって、表面となす角度が 30° および 60° であるように厚さ 1mm （幅 250mm 、長さ 200mm および 150mm ）のひび割れを模擬するアクリル板を挿入したものである。



(a) $\alpha = 100\%$



(b) $\alpha = 1\%$



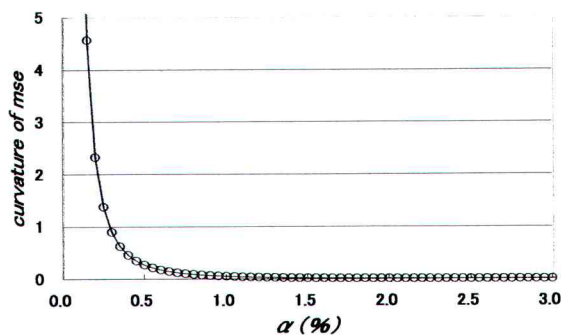
(c) $\alpha = 0.3\%$



(d) $\alpha = 0.05\%$

図－１４ 等温線画像（ノイズ除去後）

図－１７は模擬ひび割れを設けた面を真上にして快晴の日の日中に日射により加熱したときの加熱開始２時間後のその面におけるサーモグラフィである。このときの表面温度分布の最高温度は 19.4°C 、最低温度は 13.8°C 、平均温度は 16.3°C および標準偏差は 1.1°C である。傾斜角 30° のひび割れのコンクリート表面に現れる開口部が視認で

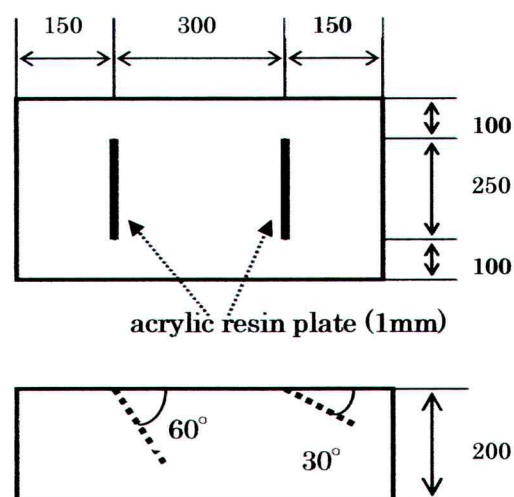


図－１５ α －曲率の関係

きるが、傾斜角 60° のひび割れについては明瞭ではない。

図－１７のサーモグラフィに対応する表面温度分布から係数使用比率 α を変化させてノイズ除去を行った上で等温線で描くと図－１８(a)～(c)のようになる。図－１９は上記ノイズ除去における平均二乗誤差mseを累乗近似曲線で近似したときの累乗近似曲線の曲率と係数利用比率 α との関係を示したものである。

図－１８において、係数利用比率 α が 2% のときは試験体中央部付近の低温部にシミ状のものが存在し、ノイズの除去が完全でないと思われる。 α が 0.3% になるとシミ状のものは見られずノイズの除去が完了していると考えられるが、 α が 0.1% になると低温部の等温線が単調形状に変化し始めており、ひび割れの存在に起因する表面温度分布の本質的な部分が除去されていると考えられる。図－１９から、平均二乗誤差mseは α がおおよそ 0.5% より小さくなると急変すると考えられる。これは図－１８についての検討結果とほぼ一致している。



図－１６ 試験体(ひび割れモデル)

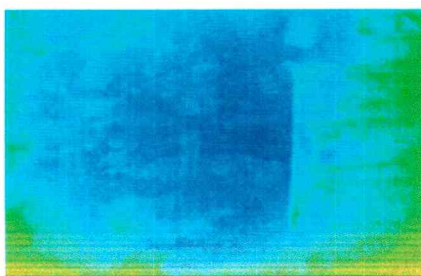
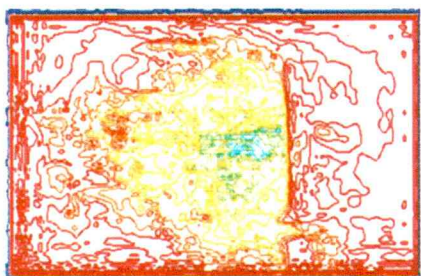
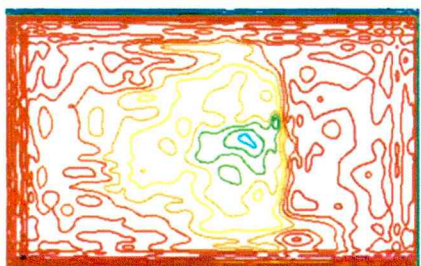


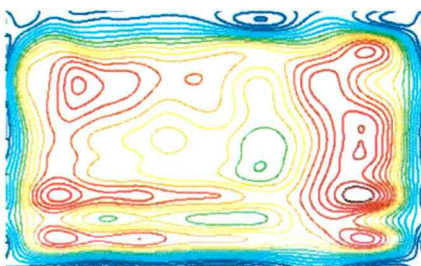
図-17 サーモグラフィ（ひび割れモデル）



(a) $\alpha=2\%$



(b) $\alpha=0.3\%$



(c) $\alpha=0.1\%$

図-18 等温線画像（ノイズ除去後）

図-18(b)の等温線の形状をみると、ひび割れの開口部を挟んでひび割れが内部に存在する側の表面温度が相対的に高くなり、存在しない側の表面温度が低くなっている。また、ひび割れが内部に存在しない側に温度が局所的に低くなる部分が現れる。これらの特徴は3章の解析結果とほぼ同様のものであり、このような等温線に現れる特徴を分析してひび割れの存在範囲や傾きの方向などを推定することができると思われる。

ただし、ノイズの除去を行っても傾斜角 60° のひび

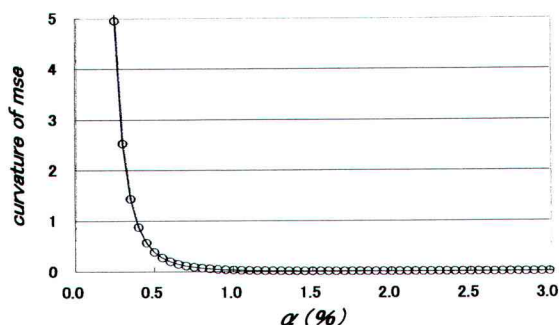


図-19 α -曲率の関係

割れの存在は明確にはならなかった。これは、傾斜角が大きいとひび割れを挟む左右の部分の温度差が小さくなるためであると考えられる。

5. 結 言

本報告では赤外線映像装置によって計測された表面温度データを用いてコンクリート構造物に存在する劣化部をより鮮明に検出する方法について検討した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 表面温度データに含まれるノイズは、2次元の直交ウェーブレット変換を利用したノイズ除去法により除去することができ、その結果得られた表面温度分布を色分けした等温線で表すことによって劣化部の存在をより鮮明に表すことができると思われる。
- (2) ノイズ除去を行うときの妥当な係数利用比率 α の大きさは、平均二乗誤差mseのグラフを累乗近似曲線によって近似し、累積近似曲線の曲率の値が急変するときの α の値を参考にして定めることができると思われる。

謝 辞

本報告で示した試験体実験は、(株)ケミカル工事と共同で実施したものであり、そのご協力に感謝致します。

参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会, コンクリート診断技術'04[基礎編], (2004.4), pp107-110.
- 2) 阪上隆英・久保司郎, ロックイン赤外線サーモグラフィによるコンクリート構造物の非破壊検査, 機械年次講演会論文集, No.014-11, (2001), 6-16.
- 3) 中野宏毅・山本鎮男・吉田靖夫, ウェーブレットによる信号処理と画像処理, (1999.8), 71-73, 共立出版.
- 4) 曾根彰・山本鎮男・有馬幸蔵・増田新・中岡明, ウェーブレット変換を用いた機械・構造物のヘルスマニタリングシステム, 機論, 61-586, (C1995.6), 166-172. (2004年9月17日受付)