

熱画像解析を用いたコンクリート構造物の欠陥検出に関する研究

A Study on Damage Detection of Concrete Structure Using Thermal Image Analysis

太田佳秀*・曾根彰**・増田新***・射場大輔****

Yoshihide Ohta*, Akira Sone**, Arata Masuda***, Daisuke Iba****

*京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科修士課程 (〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

** 工博 京都工芸繊維大学大学院教授 工芸科学研究科 (〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

*** 工博 京都工芸繊維大学大学院助教授 工芸科学研究科 (〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

**** 工博 京都工芸繊維大学大学院助手 工芸科学研究科 (〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

One of the damage detection technologies of highly elevated concrete structure is the method using infrared thermography. Because it is difficult to detect the damage visually from the unclear distribution of temperature, it depends on seat-of-the-pants approach. In this paper, the authors propose a method to identify the location and the geometrical shape of the damage quantitatively by processing the thermal image of the surface of the concrete structure. In the proposed method, a layer-by-layer inverse analysis using the boundary element method is carried out to obtain the sharper image of the damage as well as the depth of the damage layer. The effectiveness of the proposed technique is examined by a numerical study.

Key Words: concrete, thermography, boundary element method, inverse-analysis

キーワード: コンクリート, サーモグラフィ, 境界要素法, 逆解析

1. 緒言

我々の生活の安全・利便及び経済活動の根幹・運営などを支える社会基盤を構成する土木構造物は、鋼構造物とコンクリート構造物とに大きく分けることができる。鋼構造物は、構成材料である鋼材の腐食が不可避であるので、従来から塗装などの防食処置を施すことを前提に建設され、その後は疲労に対する管理も含めて厳格な維持管理が行われてきたため、維持管理上それほど大きな問題は生じていないと思われる。一方、コンクリート構造物は、元来、化学的に安定であると考えられる骨材とセメント水和物とがその構成要素のほとんどを占め、鉄筋などの補強鋼材はセメント水和物のアルカリ環境下にあつて、不動態被膜をその表面に形成し、電気化学的に腐食し難いだけでなく、被りコンクリートによって酸素の供給からも遮断された状態で保護されている。そのため、適正に設計・施工されたコンクリート構造物は基本的に耐久性が高い半永久構造物であると見なされ、経済の発展とともに大量のコンクリート構造物が建設されてきた。しかし、このように建設されてきたコンクリート構造物ではあるが、蓄積量及び供用年数の増加に伴って、かつては考慮する必要性が小さかった種々の原因に基づく劣化現象が近年次々に顕在化し、大きな社会問題の一つとなっている。例えば、骨材中の特殊なシリカ鉱物とセメント中のアルカリとによるアルカリ骨材反応、及び除塩が十分でない海砂の骨材としての使

用や冬季に散布される融雪塩類の使用が原因となる鉄筋腐食は、コンクリートのひび割れや剥離が異常に早い時期に発生する原因となることが明らかになった。また、施工合理化のために導入され現在のコンクリート施工に必要な不可欠となっているポンプ施工は、迅速な施工ができる反面、施工管理が十分でないと材料分離や空隙などの初期欠陥が生じやすく、それが原因となって劣化を引き起こす事例が多く発生している¹⁾²⁾。

このような状況に適切に対応していくためには、コンクリート構造物の劣化に基づく事故を防ぐとともに延命によって維持補修コストを削減することが必要不可欠である。適切な時期に適切な維持補修をしなければ急速に損耗が進行するので、コンクリート構造物の現在の劣化状態を正確に把握することは、構造物の保守・延命を効果的に行い、ライフサイクルコストを少なくする上で重要である。そのうえ、コンクリート構造物はその規模が大きく蓄積量が膨大であること、様々な自然環境下に存在することなどを考慮すると、高効率かつ高精度な劣化診断技術の開発が必要である⁴⁾。

本報告では、赤外線熱画像データ(物体表面の温度分布)をもとに、コンクリート構造物内部に存在する欠陥の形状及びその位置を同定する逆問題に着目し、欠陥形状の情報が不明瞭な赤外線画像データから、境界要素法を用いた逆解析により、欠陥部の形状や輪郭などをより鮮明化し、欠陥の深さを定量的に検出する新たな手法を提案する。

2. 原理

2.1 モデル設定

本研究で対象とするコンクリート構造物モデルを図-1に示す。構造物内部に欠陥の疑いのある部分を切り出し、厚さが一様な直方体モデルを考える。また、上面から日射が照射されるが、側面に沿った方向の熱の流れは一様であり、側面方向の熱の移動はない断熱境界とする。温度測定面は下面から行うものとする。

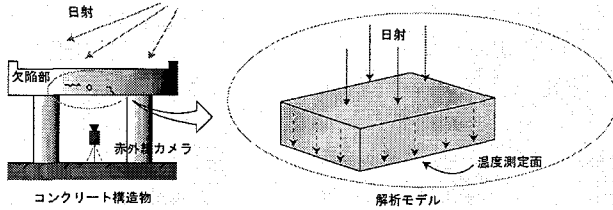


図-1 解析モデル

次に欠陥部のモデル化を図-2に示す。欠陥部は下面に平行な層状の空洞モデルで、断熱性を示す。また、欠陥部はモデルの内部に存在しており、側面には欠陥の影響がないものとする。

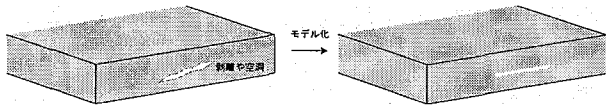


図-2 欠陥部のモデル化

2.2 境界要素法による3次元定常熱伝導解析

赤外線熱画像データすなわち構造物表面の温度データをもとに、構造物内部の温度分布を推測していくために、境界要素法による熱伝導解析を行う。3次元熱伝導方程式にガウスの発散定理などを用いると、以下の境界積分方程式が導かれる⁹⁾。

$$\frac{1}{2}t(\mathbf{y}) + \int_{\Gamma} t(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{q}^*(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\Gamma(\mathbf{x}) = \int_{\Gamma} q(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{t}^*(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\Gamma(\mathbf{x}) \quad (1)$$

ただし、

$$q(\mathbf{x}) = -\kappa \left(\frac{\partial t(\mathbf{x})}{\partial x_1} n_{x_1} + \frac{\partial t(\mathbf{x})}{\partial x_2} n_{x_2} + \frac{\partial t(\mathbf{x})}{\partial x_3} n_{x_3} \right) \quad (2)$$

$$\mathbf{t}^*(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{1}{4\pi\kappa r} \quad (3)$$

$$\mathbf{q}^*(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = -\kappa \left(\frac{\partial \mathbf{t}^*(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{\partial x_1} n_{x_1} + \frac{\partial \mathbf{t}^*(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{\partial x_2} n_{x_2} + \frac{\partial \mathbf{t}^*(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{\partial x_3} n_{x_3} \right) \quad (4)$$

である。ここで、 t は温度、 q は熱流束、 $\mathbf{x}$ は空間座標、 $\mathbf{y}$ はソース点、 Γ は物体の境界、 κ は物体の熱伝導率、 $\mathbf{n}$ は Γ 上のある点における外向き単位法線ベクトル、 r はソース点と境界上の点との距離とする⁹⁾。

次に、より一般性を増すために適当な寸法、温度等を用いて無次元化を行う。ここでは、代表的な寸法を L 、代表的な温度差を Δt 、代表的な熱流束を q_m として以下の一印の付いた無次元量を定義する。

$$\bar{x}_1 = \frac{x_1}{L} \quad \bar{x}_2 = \frac{x_2}{L} \quad \bar{x}_3 = \frac{x_3}{L} \quad \bar{t} = \frac{t - t_0}{\Delta t} \quad \bar{q} = \frac{q}{q_m} \quad \kappa = \frac{\Delta t}{q_m L} \quad \left(\Delta t = \frac{q_m L}{\kappa} \right) \quad (5)$$

これらの無次元量を用いると、無次元化境界積分方程式は以下のようになる。

$$\frac{1}{2}\bar{t}(\bar{\mathbf{y}}) + \int_{\Gamma} \bar{t}(\bar{\mathbf{x}}) \cdot \bar{\mathbf{q}}^*(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}) d\bar{\Gamma}(\bar{\mathbf{x}}) = \int_{\Gamma} \bar{q}(\bar{\mathbf{x}}) \cdot \bar{\mathbf{t}}^*(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}) d\bar{\Gamma}(\bar{\mathbf{x}}) \quad (6)$$

次に、四角形要素を用い、ポテンシャル関数値 t と q が四角形要素上で一定とし、四角形の中心を節点として、離散化を行う。要素数の総数を n 、境界 Γ 上のある一つの要素を Γ_j 、及び Γ_j 上のポテンシャル関数を $t_j, q_j(j=1 \sim n)$ とし、空間座標 $\mathbf{x}$ を二つの無次元座標 ξ_1, ξ_2 で座標変換すると離散化された式は以下のようになる。

$$\frac{1}{2}\bar{t}(\bar{\mathbf{y}}) + \sum_{j=1}^n \bar{t}_j \int_{\Gamma_j} \bar{q}^*(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}) |J| d\xi_1 d\xi_2 = \sum_{j=1}^n \bar{q}_j \int_{\Gamma_j} \bar{t}^*(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}) |J| d\xi_1 d\xi_2 \quad (7)$$

ただし、

$$|J(\xi_1, \xi_2)| = \left\{ \left(\frac{\partial \bar{x}_2}{\partial \xi_1} \frac{\partial \bar{x}_3}{\partial \xi_2} - \frac{\partial \bar{x}_3}{\partial \xi_1} \frac{\partial \bar{x}_2}{\partial \xi_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{x}_3}{\partial \xi_1} \frac{\partial \bar{x}_1}{\partial \xi_2} - \frac{\partial \bar{x}_1}{\partial \xi_1} \frac{\partial \bar{x}_3}{\partial \xi_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{x}_1}{\partial \xi_1} \frac{\partial \bar{x}_2}{\partial \xi_2} - \frac{\partial \bar{x}_2}{\partial \xi_1} \frac{\partial \bar{x}_1}{\partial \xi_2} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

である。

次に、ガウスの数値積分公式を用いて、

$$\hat{H}_{ij} = \int_{\Gamma_j} \int_{\Gamma_i} \bar{q}^*(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}) |J| d\xi_1 d\xi_2 = \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^l \sum_{m=1}^l \left\{ \left(-\frac{\bar{r}'}{\bar{r}_{km}^3} \right) w_k w_m |J| \right\} \quad (9)$$

$$G_{ij} = \int_{\Gamma_j} \int_{\Gamma_i} \bar{t}^*(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}) |J| d\xi_1 d\xi_2 = \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^l \sum_{m=1}^l \left\{ \frac{1}{\bar{r}_{km}} w_k w_m |J| \right\} \quad (10)$$

と定義し、式(7)を行列の形で表し、整理すると以下のようになる。ただし、 l は積分点、 w は重み係数、 r' は i 番目のソース点から j 番目の要素に下ろした法線距離、 r_{km} は i 番目のソース点から積分点までの距離とする^{7,8)}。

$$\begin{bmatrix} \hat{H}_{11+\frac{1}{2}} & \hat{H}_{12} & \cdots & \cdots & \hat{H}_{1n} \\ \hat{H}_{21} & \hat{H}_{22+\frac{1}{2}} & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \hat{H}_{n-1n-1+\frac{1}{2}} & \hat{H}_{n-1n} \\ \hat{H}_{n1} & \cdots & \cdots & \hat{H}_{nn-1} & \hat{H}_{nn+\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{t}_1 \\ \bar{t}_2 \\ \vdots \\ \bar{t}_{n-1} \\ \bar{t}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & \cdots & G_{1n} \\ G_{21} & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & G_{n-1n} \\ G_{n1} & \cdots & \cdots & G_{nn-1} & G_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{q}_1 \\ \bar{q}_2 \\ \vdots \\ \bar{q}_{n-1} \\ \bar{q}_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

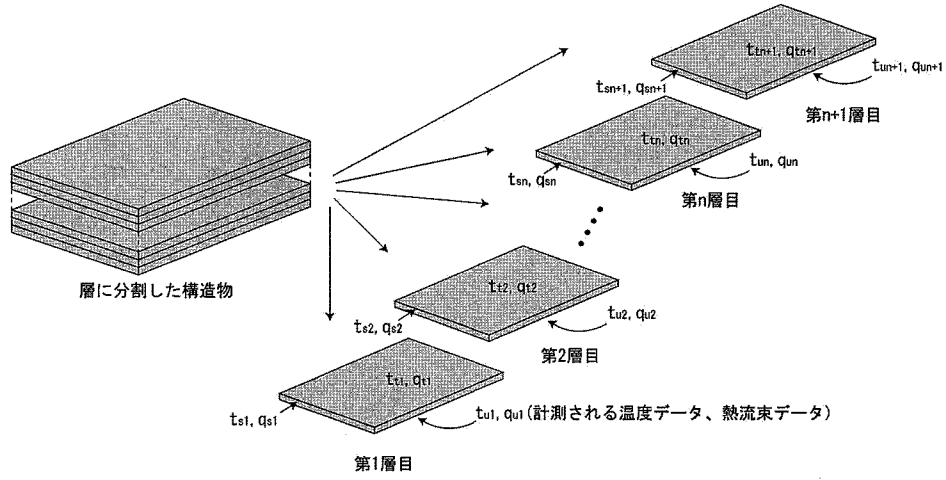
式(11)の各係数行列を H, G とすれば、節点ベクトル $\mathbf{t}, \mathbf{q}$ に関して、

$$\mathbf{H}\mathbf{t} = \mathbf{G}\mathbf{q} \quad (12)$$

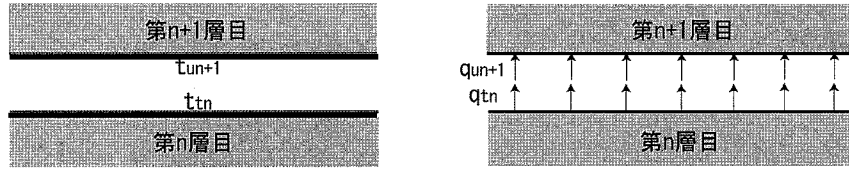
となり、与えられた節点ベクトルに対して未知節点量を決定することができる。

2.3 構造物内部の温度推定法

本報告では、図-3(a)に示すように2.1節で説明したモデルを薄い層の集合体と考える。そして境界要素法により各層の相関関係を定式化し、唯一利用できる赤外線画像データ(第1層目)をもとに次の層(第2層目)の温度分布を推



(a) 層に分割させたコンクリート構造物



(b) 第n層目と第n+1層目の温度と熱流束の関係

図-3 第n層目と第n+1層目の関係

測・算出していくことで、欠陥部の輪郭を明確化することができ、また位置も定量的に求めていく。

第n層目の下面の温度分布及び熱流束を t_{un} , q_{un} , 側面の温度分布及び熱流束を t_{sn} , q_{sn} , 上面の温度分布及び熱流束を t_n , q_n とすると、次式が成立する。

$$\tilde{t}_{un+1} = \tilde{t}_n \quad (13)$$

$$\tilde{q}_{un+1} = -\tilde{q}_n \quad (14)$$

実際の現場で計測されるのは赤外線カメラや熱流束計などから、第1層目の t_{u1} , q_{u1} であり、既知量として取り扱うことができる。また、側面方向の熱の移動はないものとみなすので、

$$\tilde{q}_{sn} = 0, (n=1, 2, \dots) \quad (15)$$

が成立し、 q_{sn} も既知量として取り扱うことができる。

ここで、 t_{u1} , q_{u1} , q_{s1} を既知ベクトル、 t_{u1} , q_{u1} , t_{s1} を未知ベクトルとすると、境界要素法の関係式(12)から

$$\begin{bmatrix} H_{\tilde{u}\tilde{u}} & -G_{\tilde{u}\tilde{u}} & H_{\tilde{u}\tilde{s}} \\ H_{\tilde{s}\tilde{u}} & -G_{\tilde{s}\tilde{u}} & H_{\tilde{s}\tilde{s}} \\ H_{\tilde{u}} & -G_{\tilde{u}} & H_{\tilde{s}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{t}_{u1} \\ \tilde{q}_{u1} \\ \tilde{t}_{s1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -H_{\tilde{u}\tilde{u}} & G_{\tilde{u}\tilde{u}} & G_{\tilde{u}\tilde{s}} \\ -H_{\tilde{s}\tilde{u}} & G_{\tilde{s}\tilde{u}} & G_{\tilde{s}\tilde{s}} \\ -H_{\tilde{u}} & G_{\tilde{u}} & G_{\tilde{s}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{t}_{u1} \\ \tilde{q}_{u1} \\ \tilde{q}_{s1} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

が成立し、式(14)の関係をを用いると、

$$\begin{bmatrix} H_{\tilde{u}\tilde{u}} & -G_{\tilde{u}\tilde{u}} & H_{\tilde{u}\tilde{s}} \\ H_{\tilde{s}\tilde{u}} & -G_{\tilde{s}\tilde{u}} & H_{\tilde{s}\tilde{s}} \\ H_{\tilde{u}} & -G_{\tilde{u}} & H_{\tilde{s}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{t}_{u2} \\ -\tilde{q}_{u2} \\ \tilde{t}_{s1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -H_{\tilde{u}\tilde{u}} & G_{\tilde{u}\tilde{u}} & G_{\tilde{u}\tilde{s}} \\ -H_{\tilde{s}\tilde{u}} & G_{\tilde{s}\tilde{u}} & G_{\tilde{s}\tilde{s}} \\ -H_{\tilde{u}} & G_{\tilde{u}} & G_{\tilde{s}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{t}_{u1} \\ \tilde{q}_{u1} \\ \tilde{q}_{s1} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

が成立する。算出された第2層目の t_{u2} , q_{u2} と q_{s2} をもとに、第3層目の t_{u3} , q_{u3} を算出することが可能である。構造物の内部である第n層目と第n+1層目の間には、一般的

に、

$$\begin{bmatrix} H_{\tilde{u}\tilde{u}} & -G_{\tilde{u}\tilde{u}} & H_{\tilde{u}\tilde{s}} \\ H_{\tilde{s}\tilde{u}} & -G_{\tilde{s}\tilde{u}} & H_{\tilde{s}\tilde{s}} \\ H_{\tilde{u}} & -G_{\tilde{u}} & H_{\tilde{s}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{t}_{un+1} \\ -\tilde{q}_{un+1} \\ \tilde{t}_{sn} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -H_{\tilde{u}\tilde{u}} & G_{\tilde{u}\tilde{u}} & G_{\tilde{u}\tilde{s}} \\ -H_{\tilde{s}\tilde{u}} & G_{\tilde{s}\tilde{u}} & G_{\tilde{s}\tilde{s}} \\ -H_{\tilde{u}} & G_{\tilde{u}} & G_{\tilde{s}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{t}_{un} \\ \tilde{q}_{un} \\ \tilde{q}_{sn} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

の関係が成立しており、各係数行列を P , Q , 第n層目の既知ベクトルを v_n , 第n+1層目の未知ベクトルを v_{n+1} とすると、第n層目と第n+1層目との関係は、

$$Pv_{n+1} = Qv_n \quad (19)$$

すなわち、

$$v_{n+1} = P^{-1}Qv_n \quad (20)$$

となり、計測される表面温度分布画像のみから内部の温度を推定することができる。

ただし、

$$P^{-1}Q = \begin{bmatrix} H_{\tilde{u}\tilde{u}} & -G_{\tilde{u}\tilde{u}} & H_{\tilde{u}\tilde{s}} \\ H_{\tilde{s}\tilde{u}} & -G_{\tilde{s}\tilde{u}} & H_{\tilde{s}\tilde{s}} \\ H_{\tilde{u}} & -G_{\tilde{u}} & H_{\tilde{s}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -H_{\tilde{u}\tilde{u}} & G_{\tilde{u}\tilde{u}} & G_{\tilde{u}\tilde{s}} \\ -H_{\tilde{s}\tilde{u}} & G_{\tilde{s}\tilde{u}} & G_{\tilde{s}\tilde{s}} \\ -H_{\tilde{u}} & G_{\tilde{u}} & G_{\tilde{s}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$v_{n+1} = \begin{Bmatrix} \tilde{t}_{un+1} \\ -\tilde{q}_{un+1} \\ \tilde{t}_{sn} \end{Bmatrix} \quad (22)$$

$$v_n = \begin{Bmatrix} \tilde{t}_{un} \\ \tilde{q}_{un} \\ \tilde{q}_{sn} \end{Bmatrix} \quad (23)$$

とする。

3. 順解析

本報告では、実際の赤外線画像データを用いた逆解析ではなく、有限要素法による順解析のシミュレーションを行い、その順解析結果を用いて逆解析を行う。順解析のシミュレーションを行うにあたっては、汎用有限要素法ソフト ANSYS を用いた。有限要素解析を用いると内部の温度分布を数値的に算出でき、逆解析結果と比較できる利点がある。図-4 に示すように、下面からの欠陥部の深さ z を 30[mm]、45[mm]、60[mm] と変化させ、各々の境界に境界条件を与えた場合の順解析を行った。境界条件は、上面から熱量を 400[W]、4 つの側面における熱流束が $0[\text{W}/\text{m}^2]$ 、下面においては、物体と空気との温度差に起因して熱が流出する対流境界として考え、下面付近の雰囲気温度を 20°C として、下面の温度分布を調べた。モデルの材料であるコンクリートにおける材料定数として代表的なものをを用いた。表-1 に解析に用いる材料定数の値を示す。各 z の値における下面温度分布画像、3次元温度分布、温度勾配である熱流束の流れ及びその熱流束値を図-5、図-6、図-7 に示す。また比較のために、上述と同じ境界条件を用いた健全モデルの解析結果を図-8 に示す。

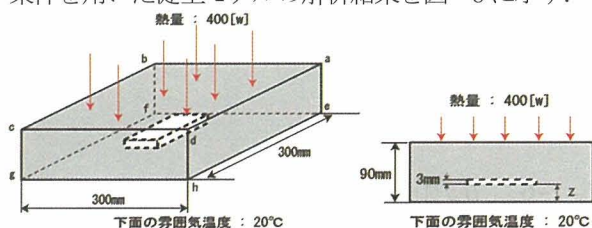
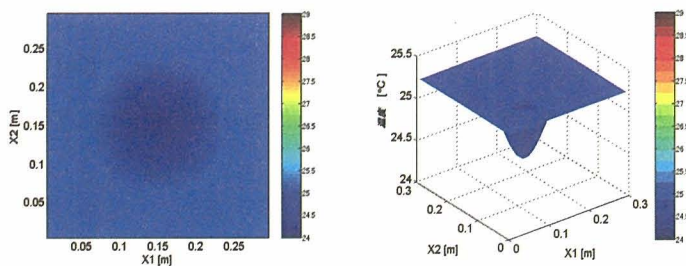


図-4 順解析モデル

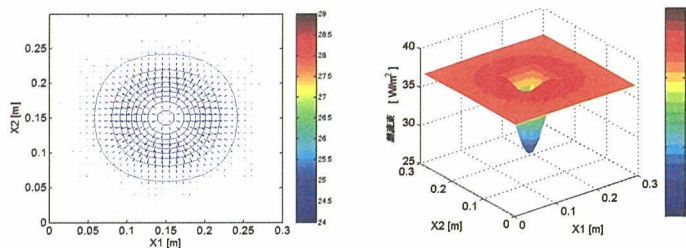
表-1 材料定数

熱伝導率 $\kappa [\text{W}/\text{m}]$	熱伝達係数 $\alpha [\text{W}/\text{m}^2 \text{K}]$
1.0	7.0



(a) 温度分布

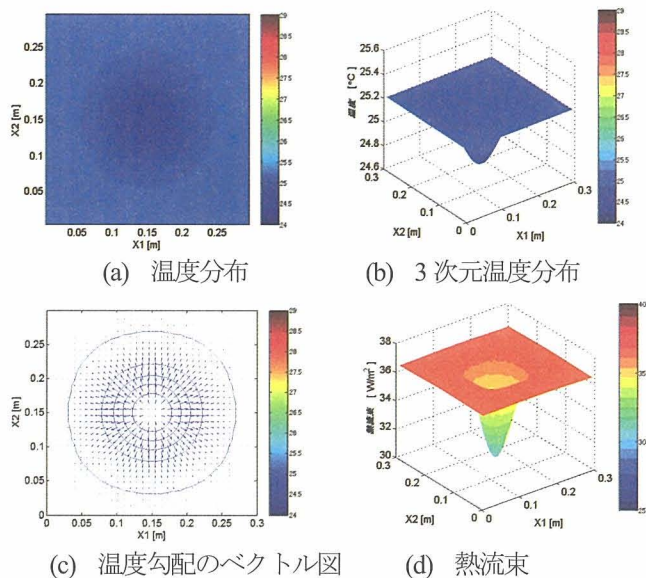
(b) 3次元温度分布



(c) 温度勾配のベクトル図

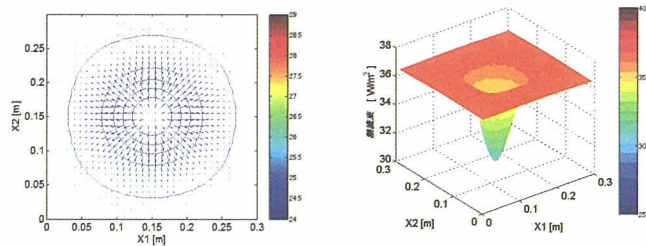
(d) 熱流束

図-5 $z=30[\text{mm}]$ の場合



(a) 温度分布

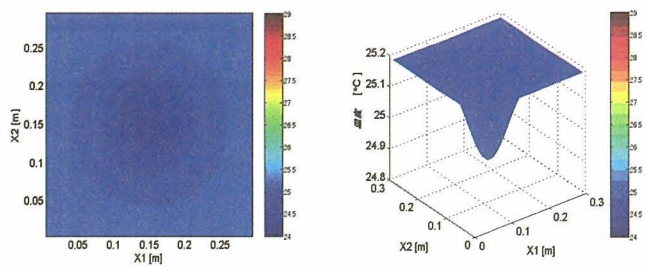
(b) 3次元温度分布



(c) 温度勾配のベクトル図

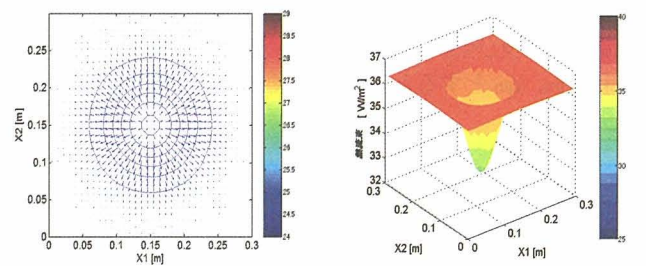
(d) 熱流束

図-6 $z=45[\text{mm}]$ の場合



(a) 温度分布

(b) 3次元温度分布

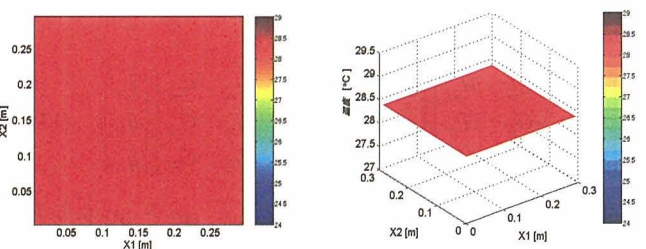


(c) 温度勾配のベクトル図

(d) 熱流束

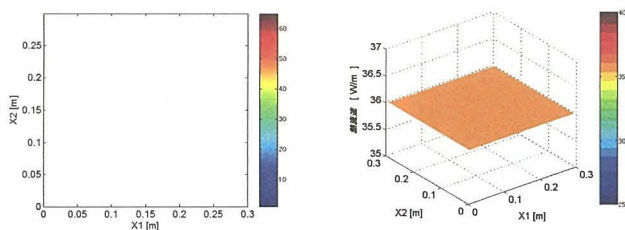
図-7 $z=60[\text{mm}]$ の場合

図-5、図-6、図-7の結果(a)(b)から見て取れるように、欠陥部の断熱性の影響により低温部が現れている。欠陥部の深さ z の値が大きいほど、すなわち欠陥部がより深い位置に内在しているほど、欠陥部の形状や輪郭が不鮮明になっていることが読み取れ、この温度分布画像のみからでは、欠陥の深さを判断するのは難しい。

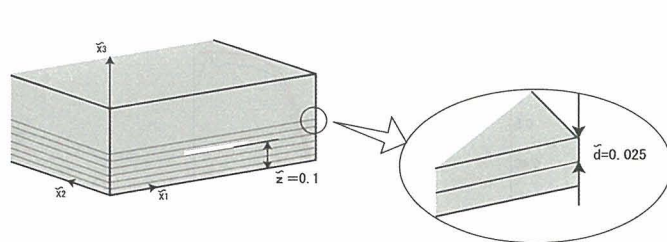


(a) 温度分布

(b) 3次元温度分布



(c) 温度勾配のベクトル図 (d) 熱流束
図- 8 健全モデルの場合

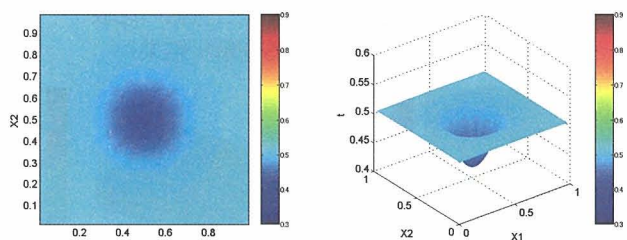
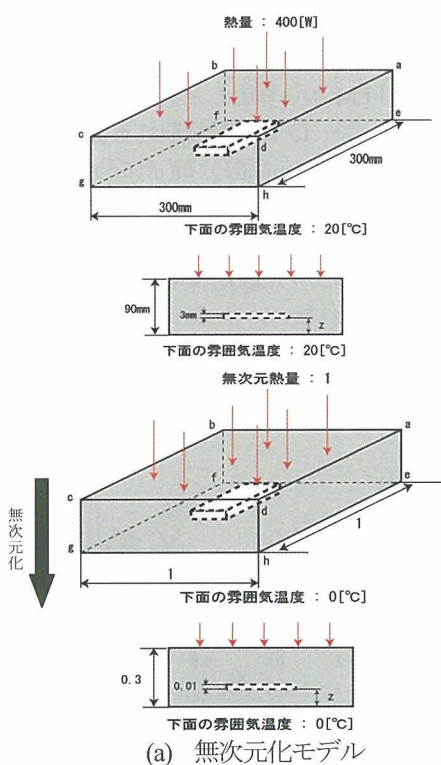


(b) 解析パターン
図- 9 逆解析モデル

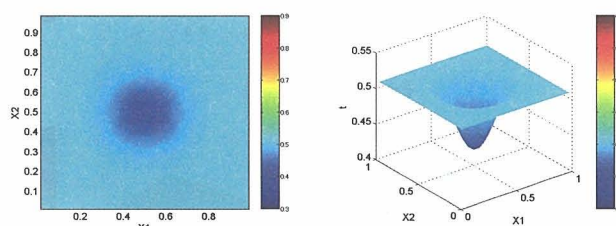
4. 逆解析

4.1 赤外線画像の鮮明化

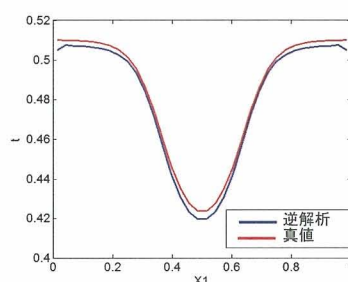
次に、3章で算出した表面温度分布及び熱流束分布を利用して、実際に逆解析を行う。実際の計測では、温度と熱流束の測定はサーモグラフィーと熱流束計を用いる。また、計測は日射が安定した時期に短時間で行うので熱伝導は定常と仮定している。2.3節で説明した構造物内部の温度推定方法を用いて、コンクリート試験体の内部の温度分布を算出した。なお、図- 9(a)に示すように順解析モデルを無次元化したモデルで逆解析を行う。境界条件として、図- 5～図- 7の(a)(b)に示した各欠陥深さにおける順解析結果の下面温度を t_{u1} 、図- 5～図- 7の(d)に示した下面の熱流束を q_{u1} 、側面の熱流束を $q_{sl}=0$ とし、剥ぎ取る層の厚さ d が 0.025 の場合の試験体内部及び欠陥部付近の温度分布の算出結果を図- 10～図- 13に示す。また、逆解析結果と比較を行うために、順解析時の FEM モデルから算出された内部の温度分布と $x_2=0.5$ の深さでの温度分布も共に示す。なお本節では図- 9(b)に示すような、欠陥部の深さが $x_3=0.1$ のモデルにおける逆解析結果とその考察について述べる。



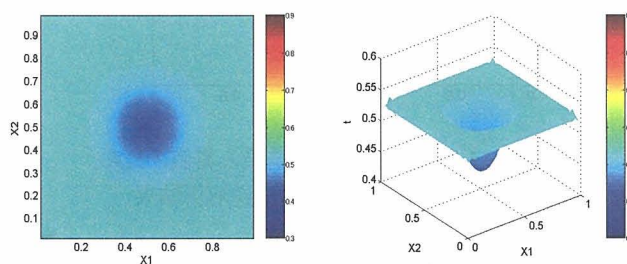
(a) 逆解析結果



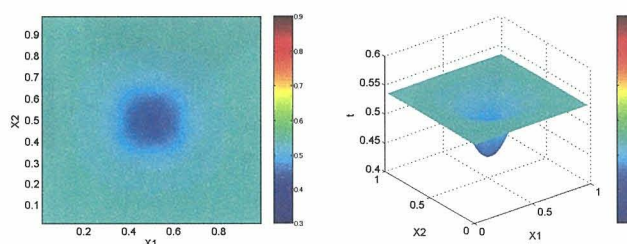
(b) 真値(FEM 結果)



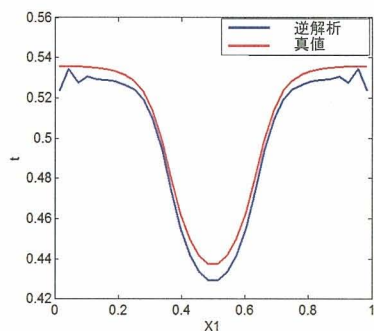
(c) $x_2=0.5$ における逆解析結果と真値の比較
図- 10 $x_3=0.025$ における逆解析結果



(a) 逆解析結果

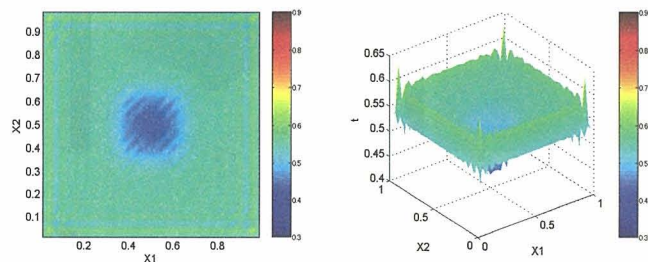


(b) 真値(FEM 結果)

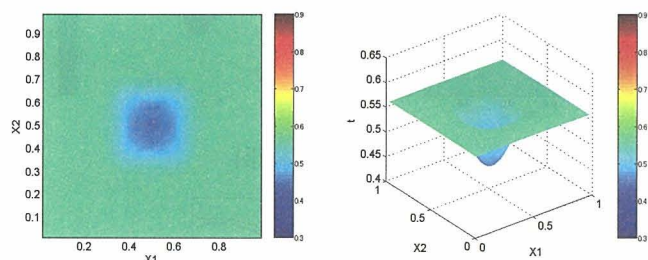


(c) $x_2=0.5$ における逆解析結果と真値の比較

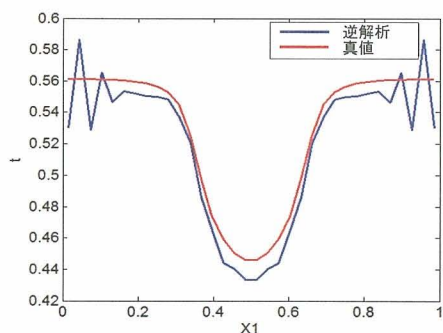
図-11 $x_3=0.05$ における逆解析結果



(a) 逆解析結果

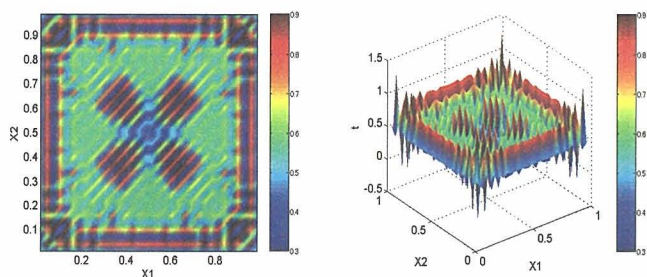


(b) 真値(FEM 結果)

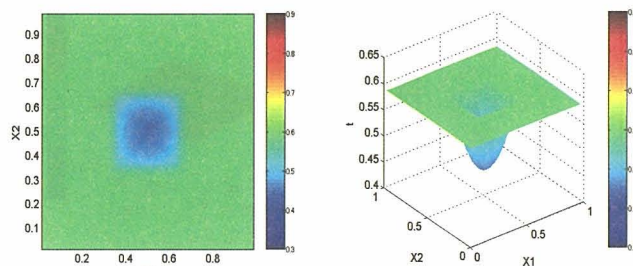


(c) $x_2=0.5$ における逆解析結果と真値の比較

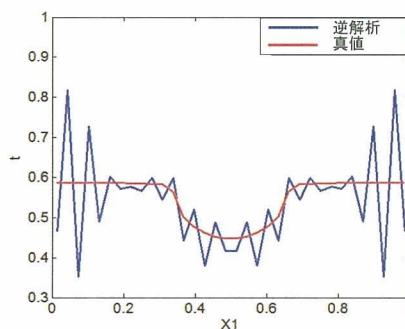
図-12 $x_3=0.075$ における逆解析結果



(a) 逆解析結果



(b) 真値(FEM 結果)



(c) $x_2=0.5$ における逆解析結果と真値の比較

図-13 $x_3=0.1$ における逆解析結果

d の値が大きいほど(剥ぎ取る厚さが厚いほど), 逆解析後の誤差が拡大し, 不適切になる. また, 表面近傍では誤差の影響が少なく, 精度の高い温度分布の復元が可能であり, 欠陥の形状を鮮明化することができたが, 逆解析の回数を繰り返すことで, 誤差が拡大し, より内部の温度分布の復元が難しく, やはり不適切になる. これは, 一定要素による離散近似や境界条件などのモデル化誤差や丸め誤差が, 逆解析を繰り返すことで誤差が拡大され, 逆問題を記述する方程式(20)が不安定であることを証明している. 次に, $d=0.025$ のときの $x_2=0.5$ の位置での逆解析結果の推移を図-14 に, FEM から算出した実際の内部温度の推移を図-15 に示す. 図-15 から読み取れるように実際には欠陥部を境に低温分布から高温分布(下に凸 $\Rightarrow$ 上に凸)へと変化する. もし, 逆解析結果にもこのような変化が生じれば, 凸性に変化する高さ x_3 に欠陥が存在することを判別できるが, 逆解析結果からは誤差が拡大し, 不安定なために, その傾向は見られない.

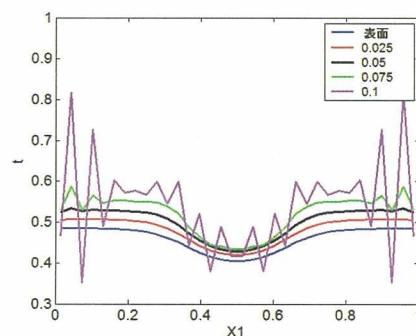


図-14 逆解析結果の推移

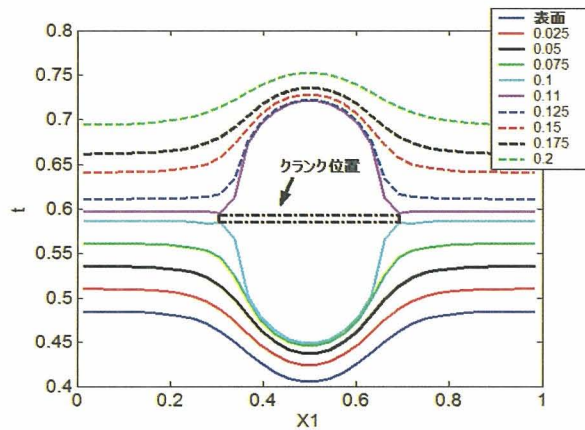


図- 15 内部温度の推移

4.2 正則化法による不安定性の緩和⁹⁾

前節の考察で述べたように、逆問題を記述する方程式(20)が不安定であるがために、誤差が拡大され、温度分布の復元が困難になる。そこで、この不安定性を緩和させるために正則化法を用いる。前項の結果に現れた不安定性は係数行列Pによる影響であると考えられる。そこで、任意の $\lambda(>0)$ を正則化パラメータとし、正則化行列 A_r を

$$A_r = (P'P + \lambda^2 I)^{-1} P'Q \quad (24)$$

と定義し、式(20)の係数行列を、

$$t_{n+1} = A_r t_n \quad (25)$$

とすることで、式(20)の不安定性の緩和が可能である。ただし、正則化行列を用いた時の逆解析結果を t_{m+1} とする。

式(24)は、任意の λ によって変化する。そこで次に、 λ をPの最大固有値から決定することにする。係数行列P

及びQは逆解析時の剥ぎ取る厚さdによって変化するが、ここでは、内部温度の再現性に一番優れている $d=0.025$ に関する不安定性の緩和について説明する。 $d=0.025$ の係数行列Pを固有値分解し、その固有値を次数ごとに表したものを図- 16に示す。

固有値分解を行った結果、最大固有値 $\mu_{\max}$ は0.6925であった。そこで、 λ を

$$\lambda = \alpha \mu_{\max} \quad (26)$$

とし、ここでは、 α が0.02のときの λ を用いて正則化した逆解析を行った。その結果を以下の図- 17～図- 20に示す。ただし、前節と同じ欠陥位置が $z=0.1$ のモデルを解析対象とし、 $x_3=0.1$ までの温度画像分布、3次元温度分布及び $x_2=0.5$ における順解析結果と逆解析結果の比較を示す。また、比較のために各 x_3 の値における正則化を行わなかった逆解析結果も共に示す。

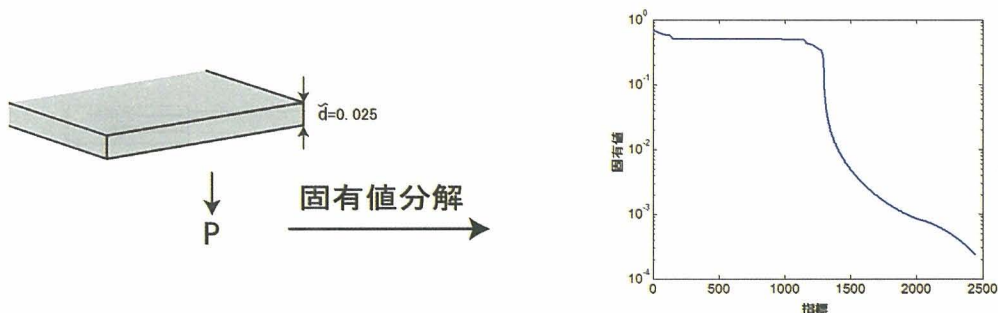
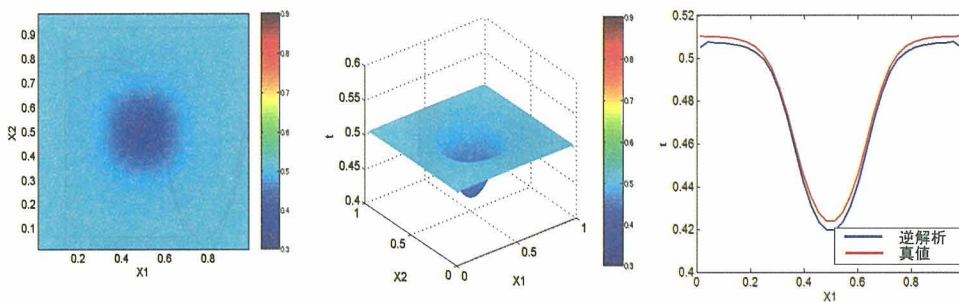
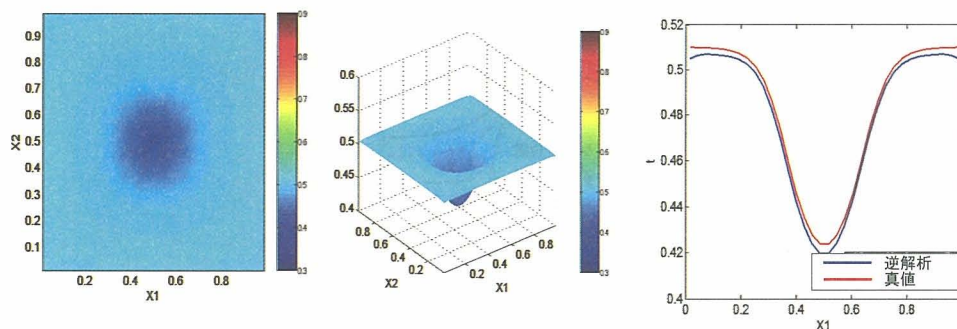


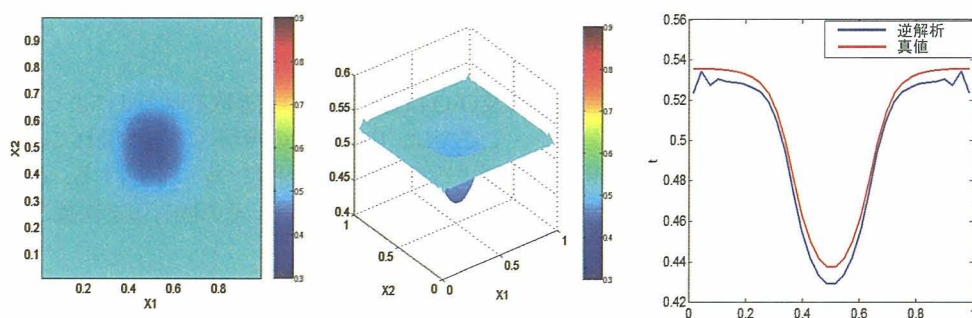
図- 16 固有値



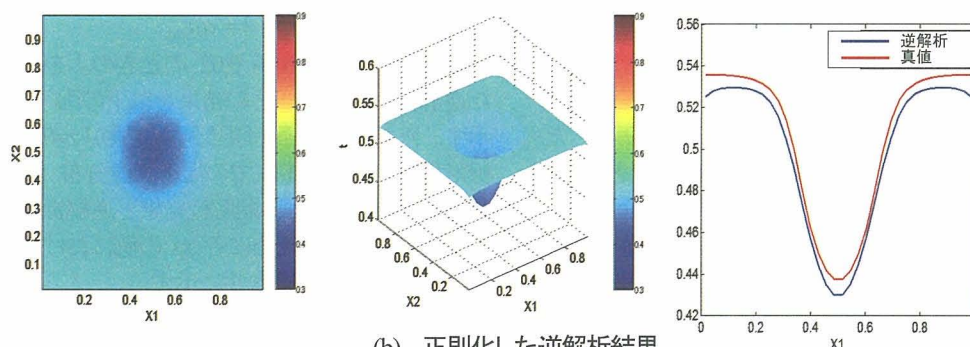
(a) 正則化を行わなかった逆解析結果



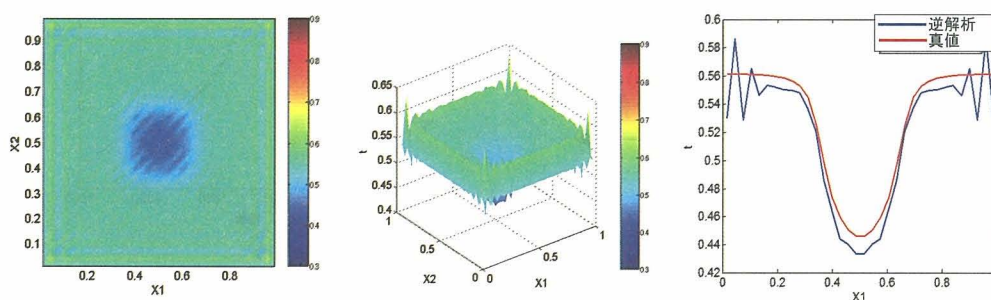
(b) 正則化した逆解析結果
図-17 $x_3=0.025$ の場合



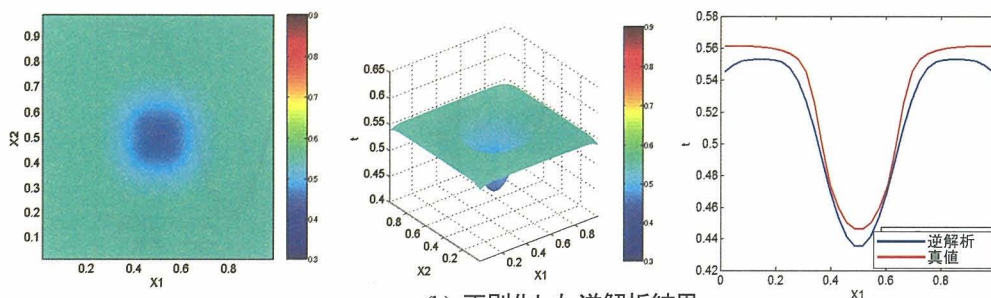
(a) 正則化を行わなかった逆解析結果



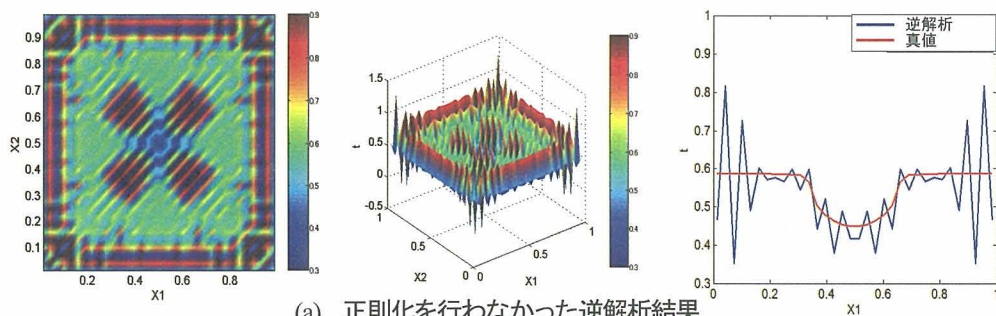
(b) 正則化した逆解析結果
図-18 $x_3=0.05$ の場合



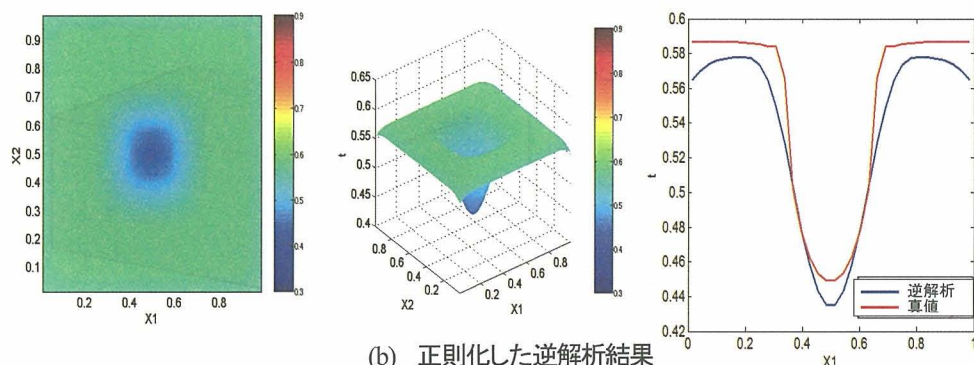
(a) 正則化を行わなかった逆解析結果



(b) 正則化した逆解析結果
図-19 $x_3=0.075$ の場合



(a) 正則化を行わなかった逆解析結果



(b) 正則化した逆解析結果

図-20 $x_3=0.1$ の場合

以上の結果より P の最大固有値を用いた正則化により不安定性を緩和させることができた。また、不安定性を緩和させることで、より内部の温度分布を復元させることができ、そのうえ、欠陥形状の鮮明化を可能にした。しかし、この逆解析結果からでは、欠陥部上部まで剥ぎ取っても温度分布は下に凸のままで、図-15 で見られた欠陥部の上下での温度分布の変化(下に凸⇒上に凸)が見られない。すなわち、以上の結果からでは欠陥部の深さを判別することはできないことが読み取れる。

4.3 欠陥深さの同定

欠陥深さ z が 0.1, 0.15, 0.2 の場合の正則化法を用いた $x_2=0.5$ での逆解析結果の推移を図-21 に示す。

前節の考察で述べたように、正則化法を用いた逆解析からは、不安定性を緩和させ画像を鮮明化することはできたが欠陥位置を検出することはできなかった。しかし、逆解析を繰り返し、欠陥部付近を通り過ぎたあたりで、欠陥の存在を示す低温部分(下に凸な部分)の変化量が小さくなっ

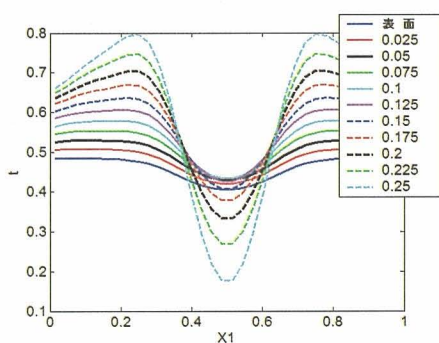
ていく、あるいは変化量が負の値を示すようになる。また、欠陥部の両側(健全部)では変化量が著しく増加していることが図-21 から読み取れる。

そこで、低温部分の最小値に着目し、欠陥位置の評価指標として、

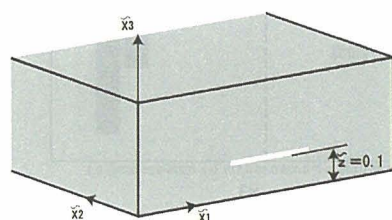
$$I_{\text{depth}} = t_{n+1}^{\min} - t_n^{\min} \quad (27)$$

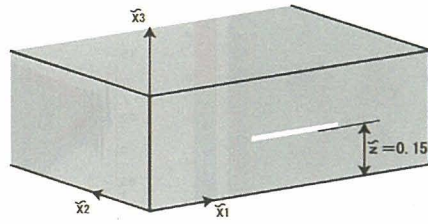
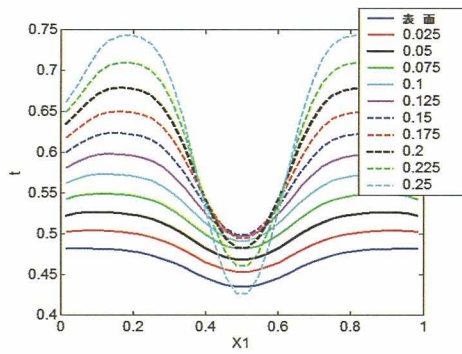
を定義する。これは t_{n+1} の最小値と t_n の最小値の差であり、この式(27)を用いて各 z の値での I_{depth} を描くと、以下に示す図-22 のようになる。

図-22 の(a)(b)(c)の共通な特徴として、点線で描いた実際の欠陥位置付近を境に I_{depth} の値が正の値から負の値へと変化している。これはすなわち、 I_{depth} の値が変化し始める x_3 付近(例えば、図-22 の(a)では、 $x_3=0.1$ 付近)に欠陥が存在することを意味しており、欠陥位置の評価指標 I_{depth} を深さごとに算出し、 I_{depth} の値が正の値から負の値へと変化し始める深さを調べることで定量的に欠陥位置を同定することが可能になる。

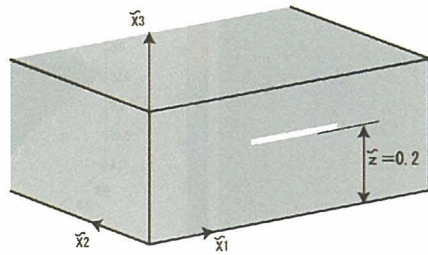
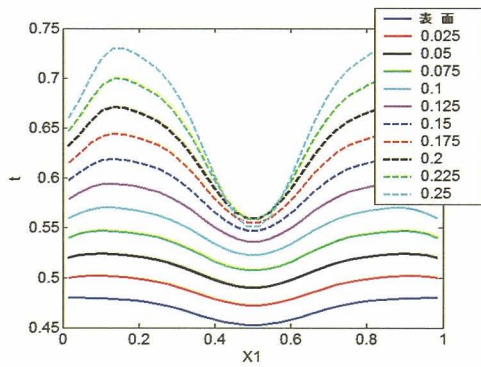


(a) $z=0.1$



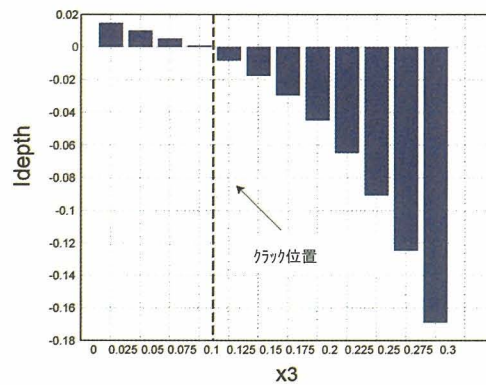


(b) $z=0.15$

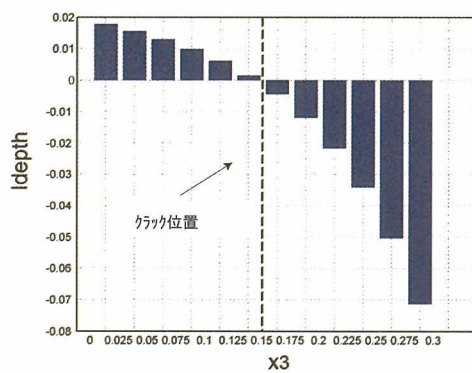


(c) $z=0.2$

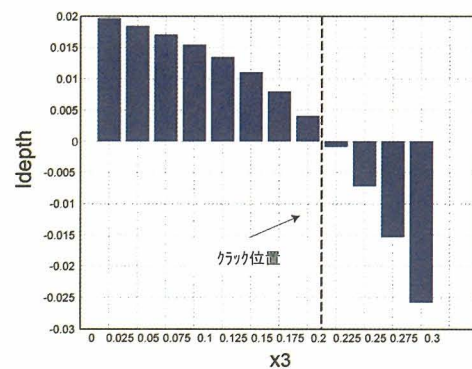
図- 21 逆解析の温度分布



(a) $z=0.10$



(b) $z=0.15$



(c) $z=0.2$

図- 22 各欠陥深さにおけるDepth の結果

5. 結言

本報告では、欠陥形状が不明瞭な赤外線画像データから、数値計算手法の一つである境界要素法を用いた逆解析により、構造物内部の温度分布を算出し、欠陥部の形状や輪郭の鮮明化と欠陥部の位置を定量的に検出する手法を考案した。逆解析時の剥ぎ取る厚さ d を変化させ、有限要素解析による順解析結果を用いて構造物内部の温度分布を算出し、その温度分布の再現性を確かめ、本手法の有効性を検討した。以下に本研究で得られた結果を示す。

- 逆解析時の剥ぎ取る厚さ d を変化させた場合、 d の値が小さいほど(剥ぎ取る厚さが薄いほど) 内部温度の再現性(復元)に優れており、表面近傍では順解析結果との誤差の影響も少なく、精度の高い温度分布の復元が可能であり、欠陥の形状を鮮明化することができたが、逆解析の回数を繰り返すことで、誤差が拡大し、より内部の温度分布の復元が難しく、不安定になる。
- 逆解析時の不安定性に対しては、 d の値で変化する係数行列 P の最大固有値を用いた正規化により不安定性を緩和させることができ、より内部の温度分布を復元させることができ、そのうえ、欠陥形状の鮮明化を可能にした。
- 欠陥位置の検出に関しては、逆解析から算出した各層の温度分布の最小値に着目し、欠陥位置の評価指標 I_{depth} を深さごとに算出し、 I_{depth} の値が正の値から負の値へと変化し始める深さを調べることで欠陥位置を定量的に検出することができた。

また、(はぎとる厚さ) $\times$ (逆解析の回数) が同じ場合については検討していないが、上記のように、はぎとる厚さが大きいと内部温度補足が悪化し、一方、逆解析の回数を大きくすると、誤差が大きくなるので、欠陥の状況にもよるが、それらには最適値があると思われる。この点については今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 今西直人, ウェーブレット変換を応用したコンクリート構造物のヘルスマonitoring技術に関する研究, 京都工芸繊維大学博士学位論文, pp.1-38, 2005
- 2) 今西直人, 曾根彰, 増田新, 太田佳秀, 赤外線映像装置で計測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, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.51A, pp.977-984, 2005
- 3) 今西直人, 曾根彰, 増田新, 赤外線映像装置で測定したコンクリート表面温度分布に含まれるノイズのウェーブレット変換による除去, 日本機械学会論文集(C編)71 巻 705 号, pp.1617-1624, 2005
- 4) コンクリート工学協会, コンクリート診断技術'01 基礎編, pp.98-129, 2001
- 5) 榎園正人, 境界要素解析, pp.44-46, pp.187-213, 培風館, 1986
- 6) 登坂宣好, 大西和榮, 山本昌宏, 逆問題の数理と解法, pp.17-18, pp.206-214, 東京大学出版会, 1999
- 7) 田中正隆, 松本敏郎, 中村正行, 計算力学と CEA シリーズ2 境界要素法, pp.23-72, 培風館, 1991
- 8) 田中正隆, 松本敏郎, 中村正行, 詳解境界要素法, pp.51-65, オーム社, 1993
- 9) 武者利光, 岡本良夫, 逆問題とその解き方, pp.169-212, オーム社, 1992

(2006 年 4 月 13 日 受付)