

建物外壁仕上げ材の剥離診断のための  
サーモグラフィー法の標準化に関する研究

(研究課題番号 05555158)

平成6年度科学研究費補助金 (試験研究 (B) (1))

研究成果報告書

平成7年3月

研究代表者 谷川 恭雄

(名古屋大学工学部教授)

KAKEN  
05555/58

図・本館

建物外壁仕上げ材の剥離診断のための  
サーモグラフィ法の標準化に関する研究

平成7年3月

研究代表者 谷川 恭雄  
(名古屋大学工学部教授)

名古屋大学図書
和B 86265

平成6年度科学研究費補助金 (試験研究 (B) (1) )

研究成果報告書

- (1) 課題番号 05555158
- (2) 課題名 建物外壁仕上げ材の剥離診断のための  
サーモグラフィー法の標準化に関する研究
- (3) 研究代表者 谷川 恭雄 (名古屋大学・工学部教授)
- (4) 研究分担者 森 博嗣 (名古屋大学・工学部助教授)  
黒川 善幸 (名古屋大学・工学部助手)  
新井 洋一 ((株)リコー・中央研究所主席係長研究員)  
笠井 豊 (日本電気三栄(株)・工業計測技術本部課長)  
野田 良平 ((株)コンステック・技術本部本部長)
- (5) 研究経費
- |       |         |
|-------|---------|
| 平成5年度 | 6,000千円 |
| 平成6年度 | 3,100千円 |
| 計     | 9,100千円 |

## (6) 研究発表

### (ア) 学会誌など

- 1) 渡部哲巳・黒川善幸・森博嗣・谷川恭雄：  
サーモグラフィー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.
- 2) T.Watanabe, Y.Kurokawa, H.Mori and Y.Tanigawa:  
Analytical Study on Estimation of Internal Defect in Concrete Wall by Thermography,  
Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.15, pp.281-288, 1993.
- 3) T. Komiyama, Y.Tanigawa, Y.Nakano and R.Noda:  
Study on Limitations of Thermographic Survey Applied to the Detection of Delaminations in  
External Walls,  
SPIE Proceedings (U.S.A.), Vol. 2473, (in print), 1995.

### (イ) 口頭発表

- 1) 谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・渡辺健治・渡部哲巳：  
サーモグラフィー法によるコンクリートの内部欠陥の推定に関する研究  
(その1：解析的研究)，  
日本建築学会東海支部研究報告集，No.31, pp.109-112, 1993.
- 2) 谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・渡部哲巳・李 慶一：  
サーモグラフィー法によるコンクリートの内部欠陥の推定に関する研究  
(その2：実験結果と解析結果との比較)，  
日本建築学会東海支部研究報告集，No.31, pp.113-116, 1993.
- 3) 渡部哲巳・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸：  
サーモグラフィー法によるコンクリート壁面の内部欠陥の推定に関する研究，  
日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），A, pp.231-232, 1993.
- 4) 谷川恭雄・葉錦・野田良平・込山貴仁：  
赤外線サーモグラフィー法による外壁仕上げ材のはく離検知の適用限界に関する実験的  
研究，  
日本建築学会東海支部研究報告集，Vol.33, pp.53-56, 1995.

## (7) 研究成果

### 第1章 サーモグラフィー法による欠陥部検出に関する理論的研究

1.1 概説	4
1.2 有限要素法を用いた熱伝導問題の解析	5
1.3 解析手法	8
1.4 解析結果の整理方法	9
1.5 解析結果とその考察	10
1.6 まとめ	15
[付図]	16

### 第2章 サーモグラフィー法による測定結果に関する解析的考察

2.1 概説	38
2.2 内部欠陥を有するモルタル試験体の表面温度の実測	39
2.3 まとめ	42
[付図]	43

### 第3章 サーモグラフィー法による内部欠陥の検出限界に関する解析的考察

3.1 概説	48
3.2 解析手法	49
3.3 解析結果とその考察	50
3.4 まとめ	51
[付図]	52

### 第4章 内部欠陥を有する試験体の表面温度の実測

4.1 概説	56
4.2 試験体の表面温度の実測	57
4.3 赤外線サーモグラフィー法の適用限界に関する実験結果	59
4.4 まとめ	65
[付図]	66

### 第5章 サーモグラフィー法による欠陥部検出に関する解析的研究

5.1 概説	80
5.2 実験結果と解析結果の比較および考察	81
5.3 まとめ	84
[付図]	85

## 第1章 サーモグラフィー法による欠陥部検出に関する理論的研究

### 1.1 概説

サーモグラフィー法による建物外壁の欠陥探査の方法は、欠陥部を視覚的に把握できること、一時に広範囲の調査が可能であることなど、いくつかの利点を持ち、広く活用されつつある。しかし、同手法は建築物の表面温度を測定し、その温度差から欠陥の存在を検知するため、欠陥の存在を推定することは可能であるが、欠陥部の外壁面からの深さや厚さを特定することが難しい。

本章では、これらの問題点を解決するために、まず、1.2では、有限要素法 (FEM) の工学的特徴と本解析で用いた熱伝導問題のプログラムの概要を述べ、つぎに1.3で、プログラムの特徴を生かして解析モデルと境界条件を設定し、これを用いて欠陥を持つコンクリート部材の表面温度について解析を行っている。これらの解析結果を効率よく表現するために、1.4では、解析結果の整理手法について述べ、1.5で解析結果とその考察を行い、最後に1.6で解析による理論的研究をまとめることにより、サーモグラフィー法によって得られる情報から欠陥部の深さおよび厚さを推定する手法について基礎的な検討を行っている。

## 1.2 有限要素法による熱伝導問題の解析

### 1.2.1 有限要素法の特徴

有限要素法とは、周知のように、無限の自由度をもつ連続体を、ある指定された、有限個の未知量を含む部分領域あるいは要素の集合体を用いて近似し、工学問題を解く一つの手法である。つまり、実際には複雑な形状・性質をもつ物体を、単純な形状・性質の小部分（要素）に分割し、その一つ一つの要素の特性を、数学的な方程式を用いて近似的に表現した後、この単純な方程式を組み合わせ、全ての方程式が成立する解を求めることによって全体の挙動を予測するものである。このために、有限要素法は要素として任意の形状を採用することができ、任意の境界形状を設定できる。そして最大の特徴は、近似内挿関数を任意に選択できることから、与えられた物理問題に対して最適な関数の選択が可能である点にある。

### 1.2.2 熱伝導問題における有限要素法

熱伝導問題における有限要素法では、質量、運動量およびエネルギーの3つの保存方程式に、ニュートン (Newton) の粘性法則やフーリエ (Fourier) の熱伝導法則などの各物質固有の構成式を組み合わせることにより、熱伝導や流れの現象をつかさどる基礎方程式（支配方程式）が導かれる。したがって、この基礎方程式を適当な初期条件、境界条件のもとに解くことにより解が得られる。FEMは、一般に汎用性に優れた計算手法と言え、熱伝導の数値解析にこの手法を用いることにより、構造物の熱の伝導状況を知ることができる。本研究では、サーモグラフィ法で測定される情報の物理的な意味をFEM解析を用いて定量的に明らかにし、より高精度の欠陥探査を行うための情報を収集する。

### 1.2.3 本プログラムの特徴

本研究で用いたプログラムは、任意形状の3次元物体の定常および非定常問題を解くことができるものであり、これを用いることにより、熱伝導問題に現れる温度規定の境界、熱伝達境界、熱流速境界、および熱放射境界の各種境界条件ならびに内部発熱について解析することができるので、これらの境界条件などを適当に与えることによって、一般の理工学問題に現れる各種の熱伝導問題を自由に解析することが可能である。また、3次元物

体の熱伝導問題を解くプログラムであるために、境界条件を適当に工夫すれば、2次元平面物体、軸対象物体、1次元形状などの熱伝導を取り扱うことも可能である。要素としては、アイソパラメトリックを用いているために、対象とする物体の形状を、少ない要素数で精度よく表現できる。

#### 1.2.4 解析に用いた熱伝導有限要素式

本プログラムにおける3次元非定常熱伝導問題の基礎微分方程式は次式で与えられる。

$$\kappa \nabla^2 T + \dot{Q} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1.1)$$

ここに、  $T$  : 温度 (K)

$t$  : 時間 (s)

$\kappa$  : 熱伝導係数 (W/m · K)

$\rho$  : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$c$  : 比熱 (J/kg · K)

$\dot{Q}$  : 内部発熱率

境界条件としては、一般に次のものが考えられる。

(1) 境界S1で温度が規定されている場合 (温度規定の境界)

$$T = T_p \quad \text{S1 上} \quad (1.2)$$

(2) 境界S2で熱流束が与えられている場合 (熱流束境界)

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = -q \quad \text{S2 上} \quad (1.3)$$

(3) 境界S3で熱伝達がある場合 (熱伝達境界)

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(T - T_0) \quad \text{S3 上} \quad (1.4)$$

ここに、  $\alpha$  : 熱伝達係数 (W/m<sup>2</sup> · K)

$T_0$  : 外部温度 (K)

(4) 境界S4で熱放射がある場合 (熱放射境界)

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = -\sigma \epsilon F(T^4 - T_\infty^4) \quad \text{S4 上} \quad (1.5)$$

ここに、  $\sigma$  : ステファン・ボルツマンの定数 (W/m<sup>2</sup> · K<sup>4</sup>)

$\epsilon$  : 放射率

$F$  : 形状係数

T : 熱放射源の温度 (K)

次に、熱伝導の有限要素式を以下に示す。構造物を要素に分割し、ある要素の温度分布を

$$T(x,y,z;t)=\sum_{i=1}^n N_i(x,y,z)\Phi_i(t) \quad (1.6)$$

と表現する。ここに、 $N_i(x,y,z)$ は、節点温度と要素内部温度を結び付ける内挿関数（形状関数）である。 $\Phi_i(t)$ は、時刻  $t$  における節点  $i$  の温度、 $n$  は1要素当りの節点数である。これを定式化すると次の有限要素式が得られる。

$$[C_{mn}]\{\dot{\Phi}_n\}+[K_{mn}]\{\Phi_n\}=\{R_m\}+\{S_m\} \quad (1.7)$$

ここに、 $\dot{\cdot}$  は時間微分を表す。また、

$$C_{mn}=\int_V \rho c N_m N_n dV \quad (1.8)$$

$$K_{mn}=\int_V \kappa \left( \frac{\partial N_m}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_n}{\partial x} + \frac{\partial N_m}{\partial y} \cdot \frac{\partial N_n}{\partial y} + \frac{\partial N_m}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_n}{\partial z} \right) dV + \int_{S_3} \alpha N_m N_n dS + \int_{S_4} \sigma \epsilon F (T+T_\infty) (T^2+T_\infty^2) N_m N_n dS \quad (1.9)$$

$$R_m=\int_V \dot{Q} N_m dV \quad (1.10)$$

$$S_m=-\int_{S_2} q N_m dS + \int_{S_3} \alpha T_0 N_m dS + \int_{S_4} \sigma \epsilon F T_\infty (T+T_\infty) (T^2+T_\infty^2) N_m dS \quad (1.11)$$

上式の  $K_{mn}$ ,  $S_m$  において、 $T$  は前ステップの当該温度を用いる。

式 (1.7) について、時間  $t$  に関する1階の微分方程式をクランク・ニコルソン差分で解くと、 $\Delta t$  を時間増分として

$$\left( \frac{1}{\Delta t} [C_{mn}] + \frac{1}{2} [K_{mn}] \right) \{\Phi_n\}_{t+\Delta t} = \left( \frac{1}{\Delta t} [C_{mn}] - \frac{1}{2} [K_{mn}] \right) \{\Phi_n\}_t + \{R_m\} + \{S_m\} \quad (1.12)$$

非定常熱伝導問題は、式 (1.12) に基づいて、時間方向に繰返し計算して解析する。また、定常熱伝導問題については、式 (1.7) において、

$$\{\dot{\Phi}\}=0$$

として解く。

同式を用いて熱伝導解析を行うことにより、熱の挙動について精度の高い計算が可能となる。

## 1.3 解析手法

### 1.3.1 解析モデル

図-1.1 (a) および (b) に示すように、解析モデルとして縦500mm、横500mm、奥行き200mmのコンクリート部材を設定し、その前後面に空気の薄層を設けた。解析では、図-1.1 (c) に示した6×6×8の288個の要素分割で解析モデルの4分の1の部分について計算を行った。解析に用いた材料定数の値を表-1.1に示す。欠陥部は、空気あるいは水と仮定し、その面積を、20×20mm、50×50mmおよび100×100mm、表面からの深さを1～50mm、厚さを0.05～2mmの間でそれぞれ変化させた。なお、各要素の大きさは任意に設定した。

### 1.3.2 境界条件

境界条件としては、側面周辺部を断熱とし、壁体の初期温度を0、要素の内壁面における空気層の温度を0の一定と仮定した。また、外壁面の空気層の温度が、100の一定とした場合と、平均温度が0で最大温度が100となるサインカーブで経時的に変化させた場合について計算した。なお、熱は、コンクリートと空気または水のように異なる材質間では全て熱伝導のみによって伝わるものと仮定した。

## 1.4 解析結果の整理方法

### 1.4.1 各記号の説明

欠陥部の存在するコンクリート外壁表面の中心点の温度を欠陥部の温度 ( $\theta d$ )、欠陥部から最も離れた位置にある試験体の左下端部を健全部の温度 ( $\theta n$ ) とし、欠陥部の深さを  $D$ 、欠陥部の厚さを  $W$ 、欠陥部と健全部の温度差が最大になるまでの時間を  $T_m$ 、欠陥部と健全部の最大温度差を  $\theta m$ 、また、入力外気温の周期を  $T_c$ 、欠陥部と健全部の温度差の変化率を  $\theta r$  とし、以下の考察を行う。

### 1.4.2 情報の整理方法

本項では、解析結果を有効に考察するための情報の整理方法を説明する。

#### (1) 外壁面温度一定の場合

境界条件として、外壁面空気層の温度を一定とした場合には、欠陥部の温度 ( $\theta d$ ) の経時変化、欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta d - \theta n$ ) の経時変化、欠陥部と健全部の温度差が最大になるまでの時間 ( $T_m$ ) および最大温度差 ( $\theta m$ ) に及ぼす欠陥部の面積 ( $A_f$ )、深さ ( $D$ ) および厚さ ( $W$ ) の影響に関する温度情報を整理している。また、検知限界として、最大温度差 ( $\theta m$ ) に与える欠陥部の厚さ ( $W$ ) および深さ ( $D$ ) の影響についても整理している。さらに、欠陥部の乾湿状態の判別の可能性を検討するために、欠陥部が湿潤状態であると仮定した場合の欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta d - \theta n$ ) の経時変化の計算を行っている。

#### (2) 外壁面温度を変化させた場合

外壁面の空気層の温度をサインカーブで経時的に変化させた場合には、外壁面の空気層の温度を一定とした場合と比較するために、欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta d - \theta n$ ) の経時変化に及ぼす欠陥部の深さ ( $D$ )、欠陥部の厚さ ( $W$ ) および入力外気温の周期 ( $T_c$ ) の影響を示している。また、本解析では特に、欠陥部と健全部の温度差の変化率 ( $\theta r$ ) に着目し、欠陥部と健全部の温度差の変化率 ( $\theta r$ ) と温度差 ( $\theta d - \theta n$ ) の関係に与える欠陥部の厚さ ( $W$ )、深さ ( $D$ ) および経過時間 ( $T$ ) の影響を整理し、欠陥部の厚さ ( $W$ ) および深さ ( $D$ ) の推定手法の基礎的な検討を行っている。

## 1.5 解析結果とその考察

### 1.5.1 外壁面温度一定の場合

外壁面および内壁面の空気層の温度をそれぞれ100 および0 の一定と仮定した場合の解析結果とその考察について以下に述べる。

#### (1) 欠陥部の表面温度 ( $\theta d$ ) の経時変化

欠陥部の温度 ( $\theta d$ ) の経時変化を図-1.2に示す。図-1.2 (a) および図-1.2 (b) は、それぞれ欠陥部の深さ ( $D$ ) および厚さ ( $W$ ) の影響を示したものである。

##### (a) 欠陥部の深さ ( $D$ ) の影響

図-1.2 (a) によると、加熱初期における欠陥部の温度 ( $\theta d$ ) の上昇率は、欠陥部の深さ ( $D$ ) が小さくなるにつれて大きくなっており、欠陥部の深さ ( $D$ ) の温度上昇率に及ぼす影響は、時間の経過とともに小さくなっている。

また、欠陥部の面積 ( $Af$ ) が大きくなるにつれて、加熱初期における欠陥部の温度 ( $\theta d$ ) の上昇率に対する深さ ( $D$ ) の影響は大きくなる。逆に、欠陥部の面積 ( $Af$ ) が小さくなるにつれて、加熱初期における欠陥部の温度 ( $\theta d$ ) の上昇率の差も小さくなるため、欠陥部の温度 ( $\theta d$ ) および上昇率の差から深さ ( $D$ ) を推定することは難しくなる。

さらに、欠陥部の面積 ( $Af$ ) の大きさに拘らず、欠陥部の深さ ( $D$ ) がある程度以上大きくなると、欠陥部の温度 ( $\theta d$ ) に対する欠陥部の深さ ( $D$ ) の影響は小さくなる。このため、欠陥部の深さ ( $D$ ) がある程度以上大きい場合には、欠陥部の深さ ( $D$ ) の推定精度は悪くなる。

##### (b) 欠陥部の厚さ ( $W$ ) の影響

一方、図-1.2 (b) に示すように、欠陥部の厚さ ( $W$ ) を変化させた場合には、欠陥部の温度 ( $\theta d$ ) は、加熱初期における、上昇率に対する厚さ ( $W$ ) の影響が小さく、その後も上昇率が一定である。また、欠陥部の面積 ( $Af$ ) が大きくなると、厚さ ( $W$ ) による欠陥部の温度 ( $\theta d$ ) の差は大きくなるため、欠陥部の温度 ( $\theta d$ ) の上昇率の差から欠陥部の厚さ ( $W$ ) の推定が容易になる。

#### (2) 欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta d - \theta n$ ) の経時変化

欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta d - \theta n$ ) の経時変化の一例を図-1.3に示す。図-1.3 (a) およ

び (b) は、それぞれ欠陥部の深さ (D) および厚さ (W) の影響を示したものである。

#### (a) 欠陥部の深さ (D) の影響

図-1.3 (a) によると、欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) は、欠陥部の深さ (D) が小さくなるほど大きくなっており、欠陥部の深さ (D) がある程度以上小さくなると欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) のピークが顕著に現れる。また、欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) は、欠陥部の面積 (Af) が小さくなるにしたがって欠陥部の深さ (D) による影響が小さくなっている。

欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) が最大になる時間は、欠陥部の深さ (D) が大きくなるほど遅くなる傾向がある。また、欠陥部の面積 (Af) が大きくなるにしたがって、最大温度差となるまでの時間 (Tm) に与える欠陥部の深さ (D) の影響が大きくなり、さらに、欠陥部の深さ (D) が小さくなるにつれて欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) も大きくなっている。

#### (b) 欠陥部の厚さ (W) の影響

図-1.3 (b) に示すように、欠陥部の厚さ (W) が大きいほど、欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) は大きくなっており、欠陥部の面積 (Af) が小さくなるほど欠陥部の厚さ (W) に対する影響は小さくなっている。

また、欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) が最大になる時間は、欠陥部の深さ (D) が等しい場合には、欠陥部の厚さ (W) および欠陥部の面積 (Af) に拘らず一定であり、欠陥部の深さ (D) が小さくなるほどピークになる時間は早くなる。

#### (3) 欠陥部と健全部の温度差が最大になるまでの時間 (Tm) と欠陥部の深さ (D) の関係

図-1.4に欠陥部と健全部の温度差が最大になるまでの時間 (Tm) と欠陥部の深さ (D) の関係を示す。同図によれば、欠陥部の厚さ (W) および欠陥部の面積 (Af) に拘らず、欠陥部と健全部の温度差が最大になるまでの時間 (Tm) は、欠陥部深さ (D) にほぼ比例し、欠陥部の深さ (D) が大きくなるにつれて遅くなることわかる。この性質を用いることにより、欠陥部の深さ (D) を推定することが可能である。

#### (4) 最大温度差 ( $\theta_m$ ) と欠陥部の深さ (D) の関係に与える欠陥部の厚さ (W) の影響

図-1.5に最大温度差 ( $\theta_m$ ) と欠陥部の深さ (D) の関係に与える欠陥部の厚さ (W) の影響を示す。同図によれば、欠陥部の厚さ (W) がある程度以上大きくなると、最大温度差 ( $\theta_m$ ) に与える欠陥部の厚さ (W) の影響は小さくなる。逆に、欠陥部の厚さ (W) がある程度

以上小さくなると、最大温度差 ( $\theta m$ ) に与える欠陥部の深さ (D) の影響は小さくなる。

また、欠陥部の面積 (Af) が小さくなると、欠陥部の深さ (D) が小さい範囲でのみ、欠陥部の厚さ (W) は最大温度差 ( $\theta m$ ) に影響を及ぼすために、推定可能な欠陥部の深さ (D) の範囲が小さくなるとともに推定精度も悪くなる。

#### (5) 最大温度差 ( $\theta m$ ) に与える欠陥部の厚さ (W) および深さ (D) の影響

図-1.6に最大温度差 ( $\theta m$ ) に与える欠陥部の厚さ (W) および深さ (D) の影響を示す。最大温度差 ( $\theta m$ ) の曲線は、欠陥部の厚さ (W) および深さ (D) の推定限界を示しており、いずれの曲線が推定限界になるかは、室内外温度差および測定装置の精度に依存するが、図の曲線より左上の部分が推定可能範囲となる。また、欠陥部の面積 (Af) が小さい場合には、欠陥部の厚さ (W) に及ぼす最大温度差の影響が少ないために、欠陥部の厚さ (W) の大きさを推定することが難しくなると同時に、測定可能な欠陥部の深さ (D) の範囲が小さくなる。

#### (6) 欠陥部の規模の推定

欠陥部の規模は、図-1.4を用いて最大温度差となるまでの時間 (Tm) から欠陥部の深さ (D) を求め、この値と最大温度差 ( $\theta m$ ) から図-1.5を用いて欠陥部の厚さ (W) を求めることが可能である。

#### (7) 湿潤状態の欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta d - \theta n$ ) の経時変化

図-1.7に湿潤状態の欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta d - \theta n$ ) の経時変化を示す。加熱初期において一時的に欠陥部の温度 ( $\theta d$ ) が健全部の温度 ( $\theta n$ ) よりも低くなっている。これは、水がコンクリートに比べて熱容量が大きいためであり、この性質を利用して、欠陥部の乾湿状態を推定できる可能性がある。

### 1.5.2 外壁面温度を変化させた場合

外壁面の空気層の温度を平均温度が0で最大温度が100となるサインカーブで経時的に変化させた場合の解析結果についての考察を以下に示す。

#### (1) 欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta d - \theta n$ ) の経時変化

欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta d - \theta n$ ) の経時変化の一例を図-1.8に示す。図-1.8 (a), (b) お

よび(c)は、それぞれ欠陥部の深さ(D)、厚さ(W)および入力外気温の周期( $T_c$ )の影響を示したものである。

#### (a) 欠陥部の深さ(D)の影響

図-1.8(a)によると、入力外気温を一定とした場合と同様に、欠陥部と健全部の温度差( $\theta_d - \theta_n$ )は、欠陥部の深さ(D)が小さくなるほど大きく、欠陥部の厚さ(W)が大きくなるほど欠陥部の深さ(D)による影響が大きくなる。

欠陥部と健全部の温度差( $\theta_d - \theta_n$ )が最大になる時間も、同様に、欠陥部の深さ(D)が大きくなるにつれて遅くなるが、その差異は、入力外気温が一定の場合に比べてそれほど大きくない。したがって、外壁面の表面温度の温度励振が大きくなるほど、欠陥部の深さ(D)の相違による、欠陥部と健全部の温度差( $\theta_d - \theta_n$ )が最大になる時間の差異が大きくなり、欠陥部の深さ(D)の推定精度は高くなるものと思われる。

#### (b) 欠陥部の厚さ(W)の影響

図-1.8(b)に示すように、欠陥部と健全部の温度差( $\theta_d - \theta_n$ )は、欠陥部の厚さ(W)が大きくなるほど大きく、欠陥部の深さ(D)が大きいほど欠陥部の厚さ(W)による影響が小さくなり、欠陥部の深さ(D)がある程度以上大きくなると、欠陥部の厚さ(W)を推定することは不可能となる。

また、欠陥部と健全部の温度差( $\theta_d - \theta_n$ )が最大になる時間は、入力外気温を一定とした場合と同様に、欠陥部の深さ(D)が等しい場合には、欠陥部の厚さ(W)に拘らず一定であり、欠陥部の深さ(D)が小さくなるほどピークになる時間は早くなる。

#### (c) 入力外気温の周期( $T_c$ )の影響

図-1.8(c)は、欠陥部と健全部の温度差( $\theta_d - \theta_n$ )に及ぼすサインカーブを用いた入力外気温変化の周期( $T_c$ )の影響を示している。同図によれば、欠陥部と健全部の温度差( $\theta_d - \theta_n$ )は、入力外気温変化の周期( $T_c$ )が短くなるにつれて最大温度差( $\theta_m$ )が大きくなっており、外壁面の温度励振による影響が大きい。

また、欠陥部と健全部の温度差が最大および最小になる時間は、入力外気温が最大および最小になる時間よりも早くなっており、これは実験による報告と一致している。

#### (2) 欠陥部と健全部の温度差の変化率( $\theta_r$ )の経時変化

欠陥部と健全部の温度差の変化率( $\theta_r$ )の経時変化を図-1.9に示す。図-1.9(a)および(b)は、それぞれ欠陥部の深さ(D)および厚さ(W)による影響を示したものである。

(a) 欠陥部の深さ (D) の影響

図-1.9 (a) によれば、欠陥部の厚さ (W) が大きくなるにつれて、加熱初期において欠陥部と健全部の温度差の変化率 ( $\theta_r$ ) は、欠陥部の深さ (D) による影響が大きくなる。

(b) 欠陥部の厚さ (W) の影響

図-1.9 (b) によれば、欠陥部の深さ (D) がある程度小さい場合には、加熱初期において欠陥部と健全部の温度差の変化率 ( $\theta_r$ ) は、欠陥部の厚さ (W) による影響が大きいため、設計仕様などにより欠陥の生じる深さが既知の場合には、この性質を利用して欠陥部の厚さ (W) を推定することが可能である。

(3) 欠陥部と健全部の温度差の変化率 ( $\theta_r$ ) と温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) の関係に与える欠陥部の深さ (D)、厚さ (W) および経過時間 (T) の影響

図-1.10に欠陥部と健全部の温度差の変化率 ( $\theta_r$ ) と温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) の関係に与える欠陥部の深さ (D) および厚さ (W) の影響を示す。これは解析開始後1時間から5時間までの1時間毎に、ある欠陥規模を有する壁面の欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) と温度差の変化率 ( $\theta_r$ ) を解析により計算し、プロットしたものである。同図によれば、欠陥部の規模がある程度大きい場合には、欠陥部と健全部の温度差の変化率 ( $\theta_r$ ) と温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) を用いることによって、欠陥部の規模を推定することが可能である。

図-1.11は、経過時間 (T) の影響を比較するために、図-1.10を整理したものである。同図によれば、欠陥部の厚さ (W) は、加熱初期において、温度差の変化率 ( $\theta_r$ ) に及ぼす影響が大きく、欠陥部と健全部の温度差が最大になる時間 ( $T_m$ ) においては、温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) に及ぼす影響が大きい。この性質を利用して、壁面に人工的に急激な温度励振を加え、欠陥部と健全部の温度差の変化率 ( $\theta_r$ ) の差異を測定することによって、欠陥部の規模を推定することが可能である。

## 1.6 まとめ

本章では、有限要素法を用いて内部に欠陥を持つコンクリート壁面の表面温度の経時変化について解析し、理想的な環境下において、欠陥部の厚さ (W)、深さ (D) および面積 (Af) が表面温度に及ぼす影響について理論的な検討を行い、欠陥部の形状および規模の推定手法を提案した。その結果、得られた知見を以下に示す。

- 1) 欠陥部の厚さ (W) および欠陥部の面積 (Af) に関係なく、欠陥部と健全部の温度差が最大になる時間 (Tm) は欠陥部の深さ (D) に比例する。
- 2) 最大温度差 ( $\theta_m$ ) および最大温度差となるまでの時間 (Tm) を用いることによって、欠陥部の規模をある程度推定することができる。しかし、欠陥部の厚さ (W) がある程度 (約2mm) 以上大きい場合には、欠陥部の厚さ (W) の大きさの推定精度が低下し、逆に、欠陥部の厚さ (W) がある程度 (約0.05mm) 以上小さい場合には、欠陥部の深さ (D) の大きさの推定精度が低下する。
- 3) 欠陥部の面積 (Af) が小さい (約4cm<sup>2</sup>以下) 場合には、欠陥部の厚さ (W) に及ぼす最大温度差の影響が少ないために、欠陥部の厚さ (W) の大きさを推定することが難しくなると同時に、測定可能な欠陥部の深さ (D) の範囲が小さくなる。
- 4) 欠陥部が湿潤状態の場合には、加熱初期において一時的に欠陥部の温度 ( $\theta_d$ ) が健全部の温度 ( $\theta_n$ ) よりも低くなるため、欠陥部の規模が大きい場合にはこの性質を利用して、欠陥部の乾湿状態を推定できる可能性がある。
- 5) 外壁面の温度励振が激しくなるにつれて、欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) は大きくなるため、欠陥部の規模の推定は容易になる。また、欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) が最大および最小になる時間は、外壁面の温度が最大および最小になる時間よりも早くなる。
- 6) 設計仕様などにより欠陥の生じる深さ (D) が既知の場合には、温度差の変化率 ( $\theta_r$ ) および欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) を用いて、欠陥部の厚さ (W) を推定することが可能である。

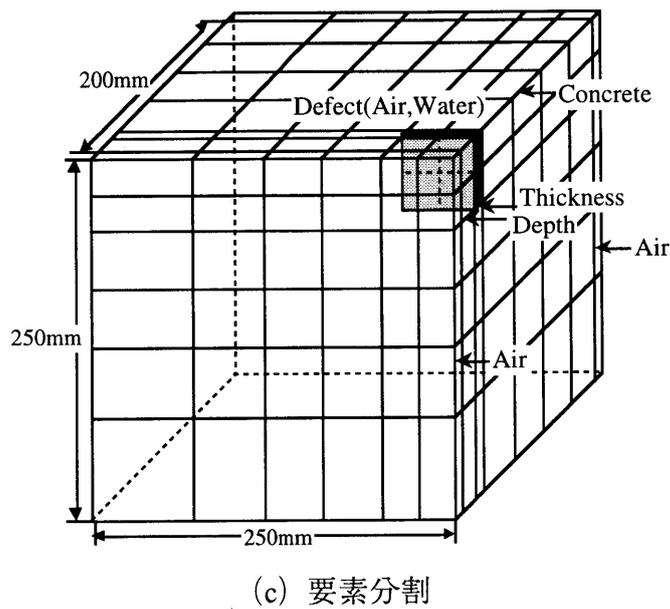
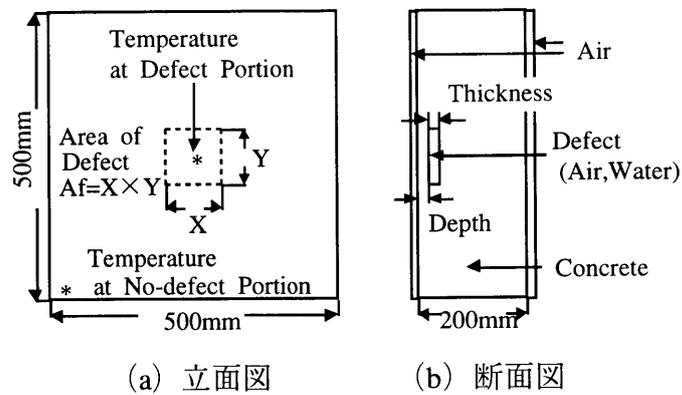
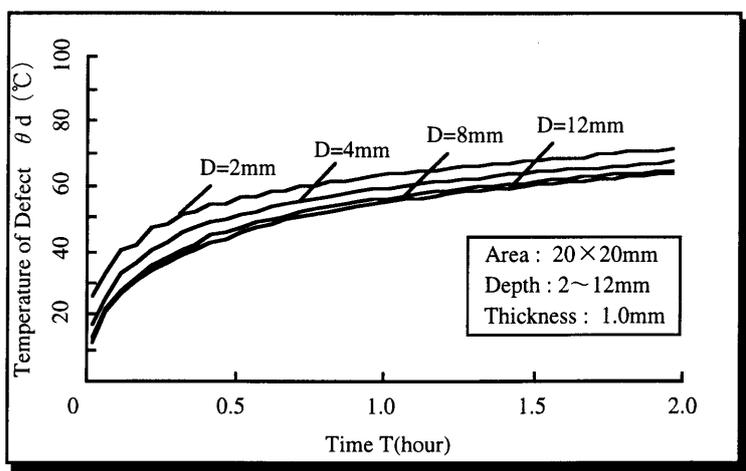
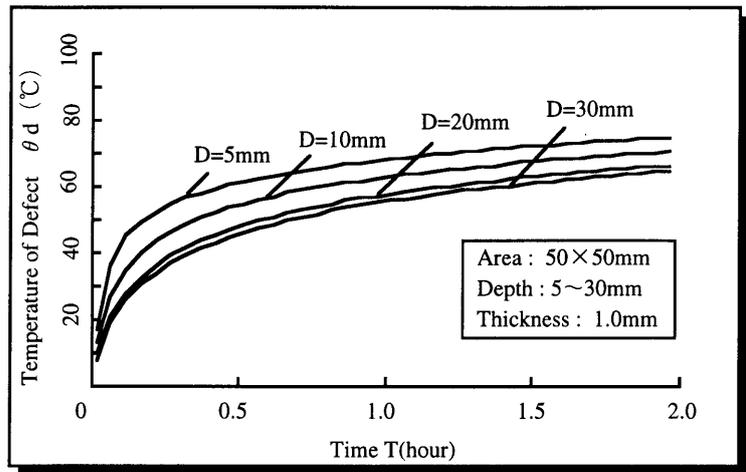
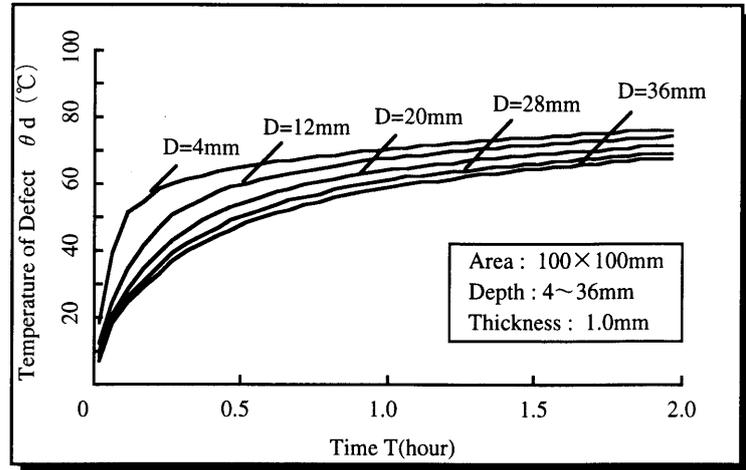


図-1.1 解析モデルの形状

表-1.1 解析に用いた材料定数値

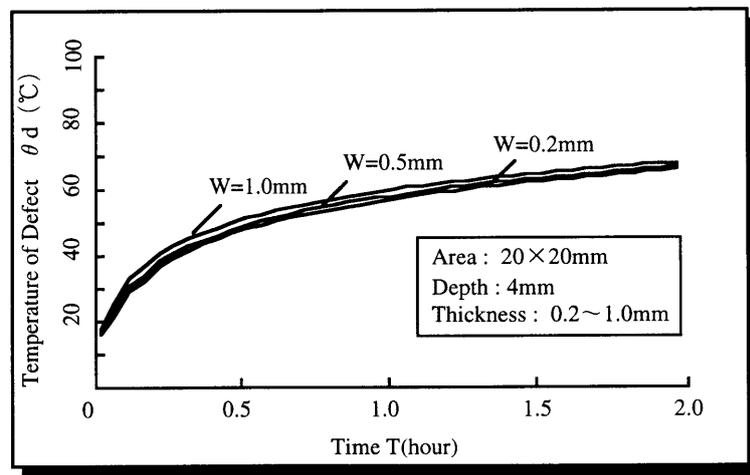
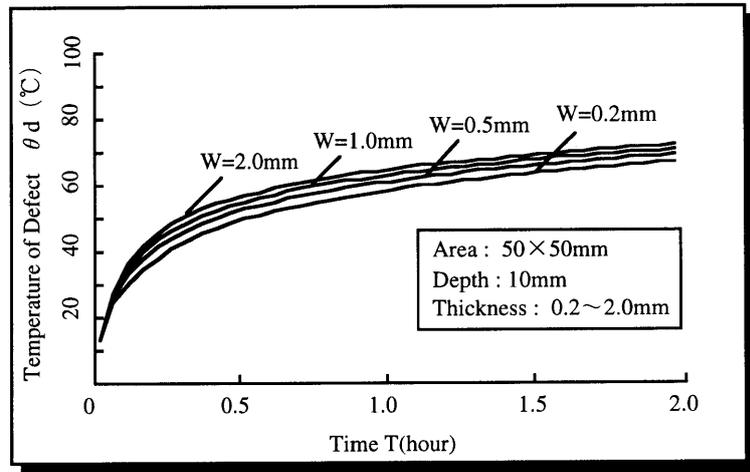
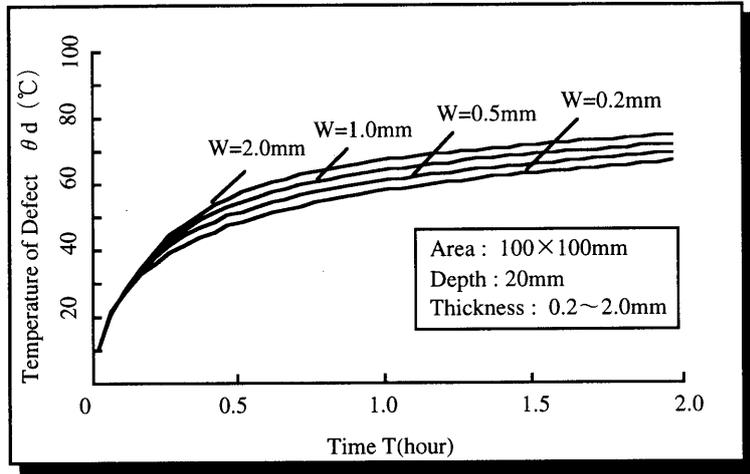
Material	$\lambda$	C	$\rho$
Concrete	1.37	0.21	2200
Mortar	1.12	0.19	2000
Tile	1.12	0.22	2200
Air(Defect)	0.019	0.24	1.3
Water(Defect)	0.516	1.0	998
Styrofoam(Defect)	0.032	0.3	28

[Notes]  $\lambda$ : Thermal conductivity ( kcal/m $\cdot$ h $\cdot$ °C),  
 C: Specific heat ( kcal/kg $\cdot$ °C ),  $\rho$ : Density ( kg/m $^3$  ).



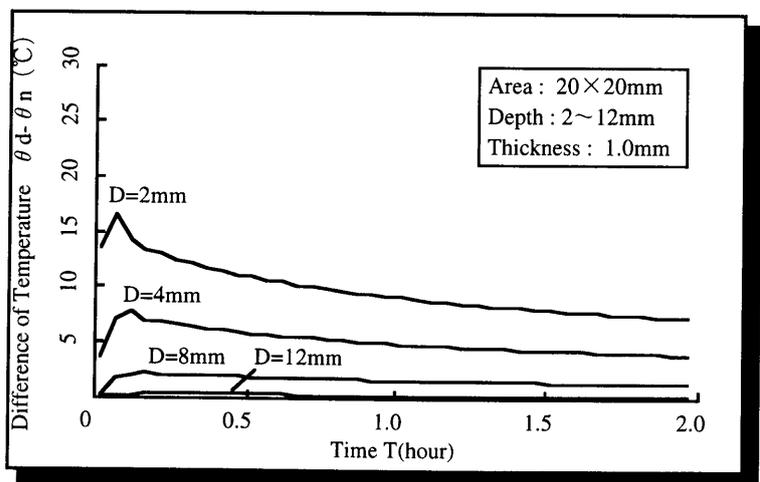
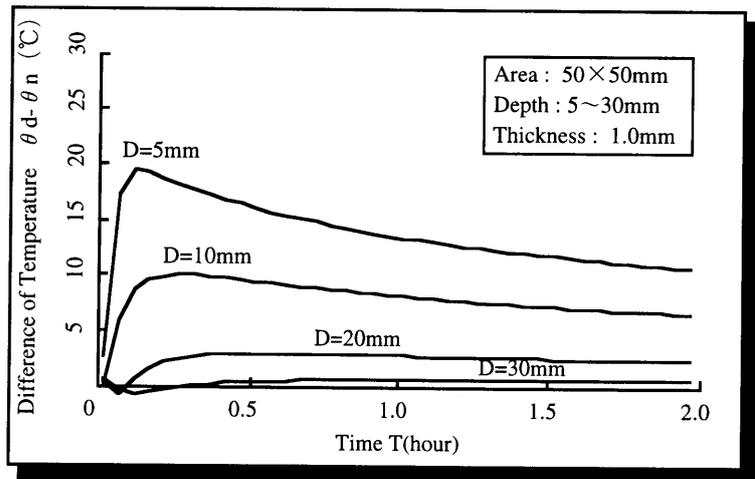
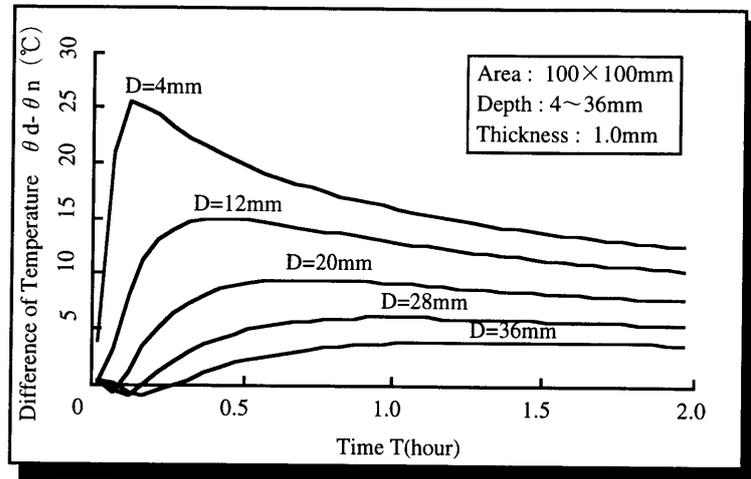
(a) 欠陥部の深さ (D) による影響

図-1.2 欠陥部の温度 ( $\theta_d$ ) の経時変化



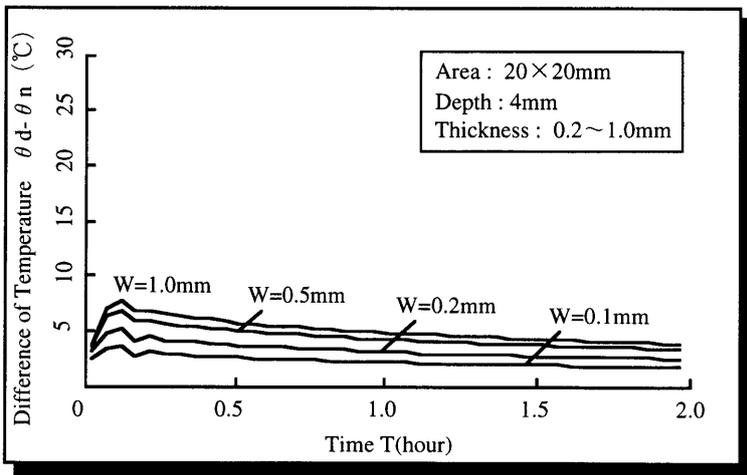
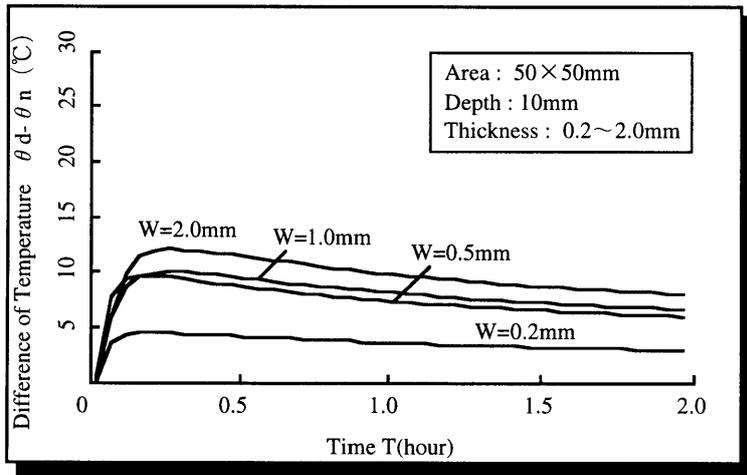
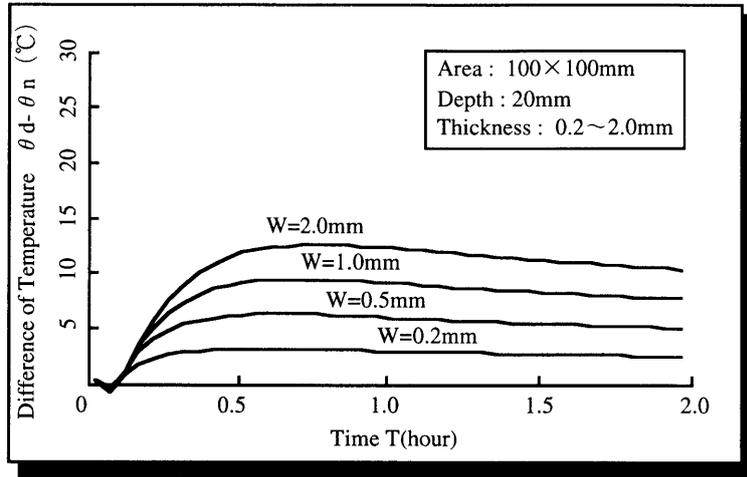
(b) 欠陥部の厚さ (W) による影響

図-1.2 欠陥部の温度 ( $\theta d$ ) の経時変化



(a) 欠陥部の深さ (D) による影響

図-1.3 欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) の経時変化



(b) 欠陥部の厚さ (W) による影響

図-1.3 欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta d - \theta n$ ) の経時変化

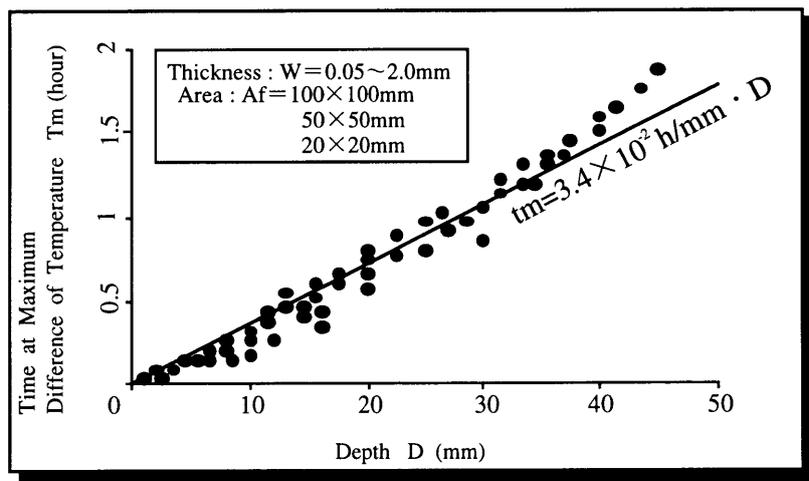


図-1.4 欠陥部と健全部の温度差が最大となるまでの時間 ( $T_m$ ) と欠陥部の深さ ( $D$ ) の関係

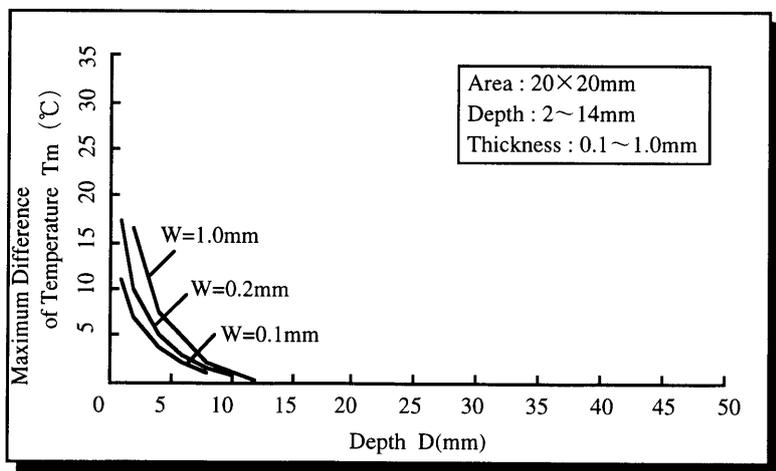
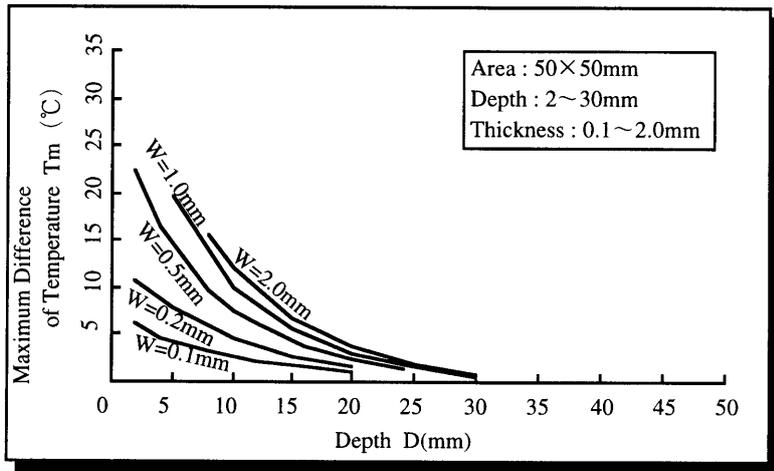
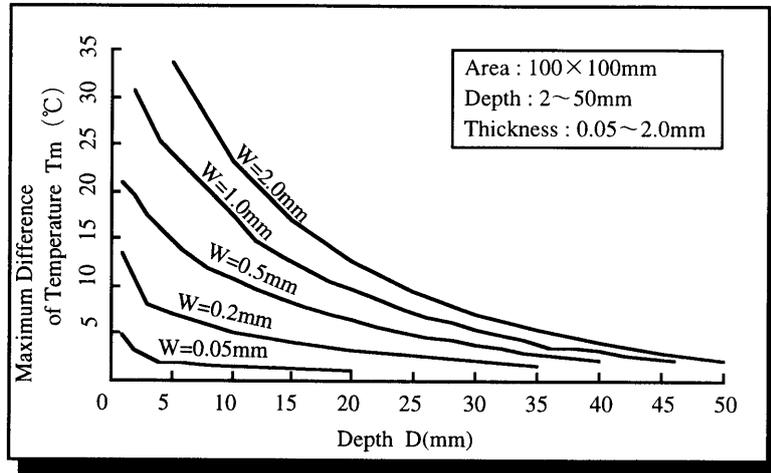


図-1.5 最大温度差 ( $\theta_m$ ) と欠陥部の深さ ( $D$ ) の関係に与える欠陥部の厚さ ( $W$ ) の影響

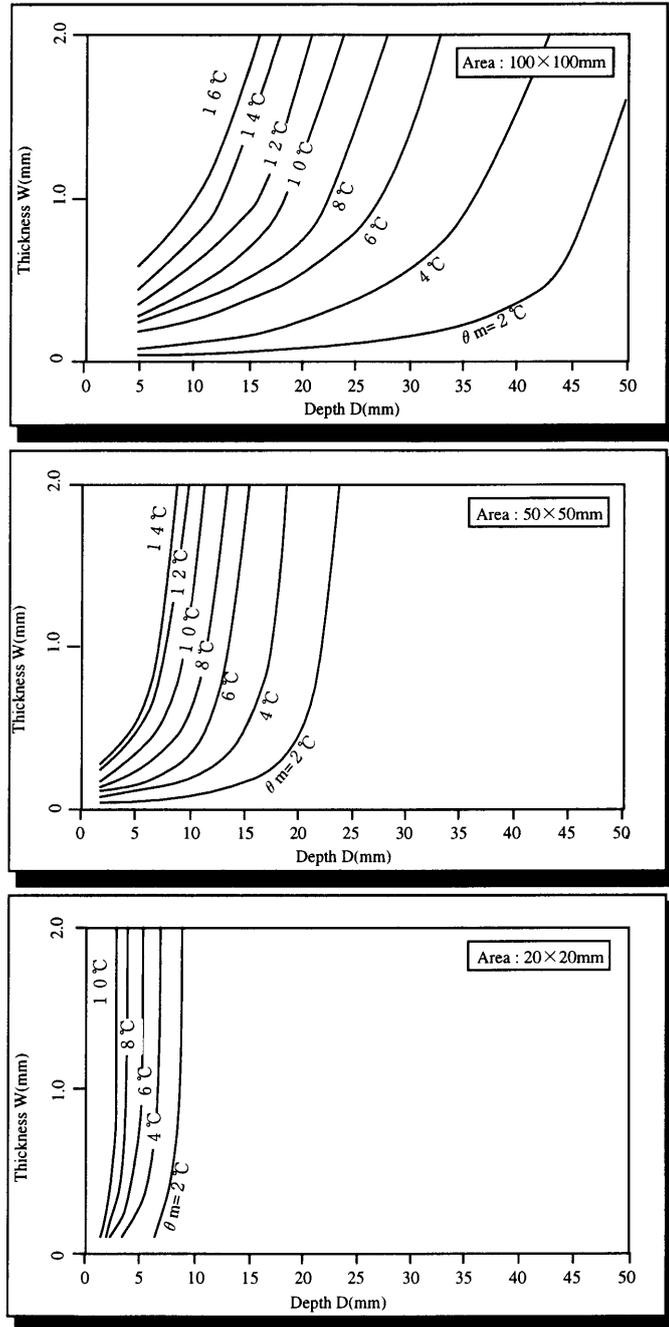


図-1.6 最大温度差 ( $\theta_m$ ) に与える欠陥部の厚さ (W) および深さ (D) の影響

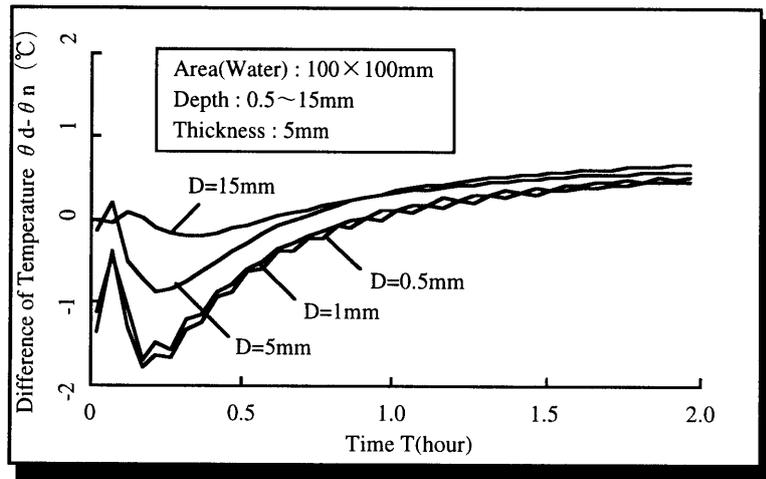
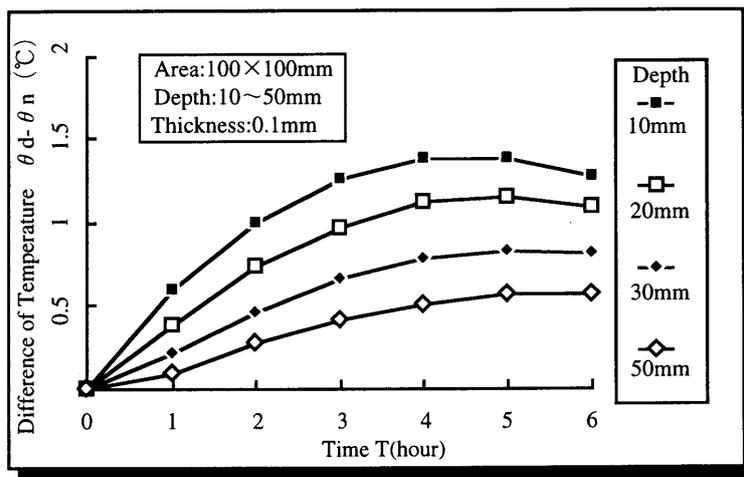
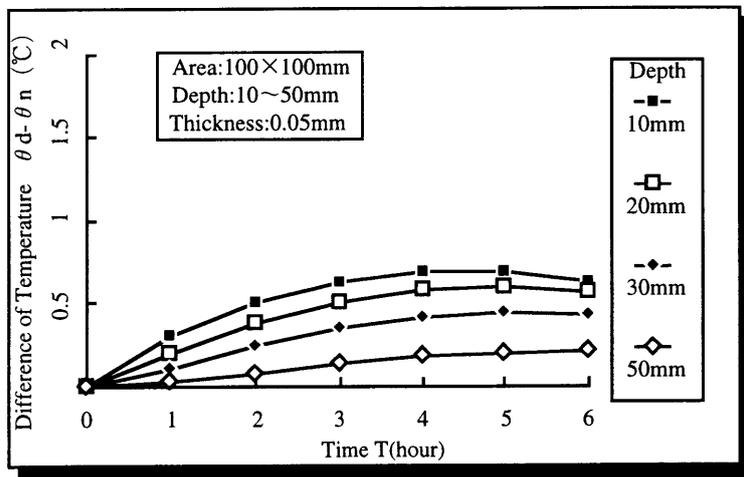
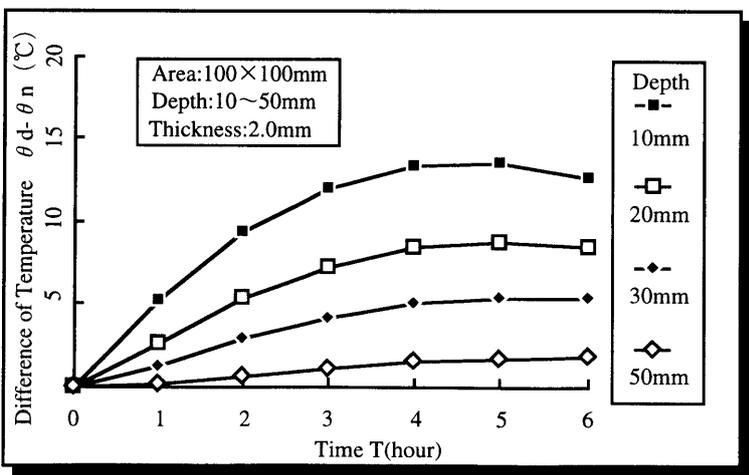
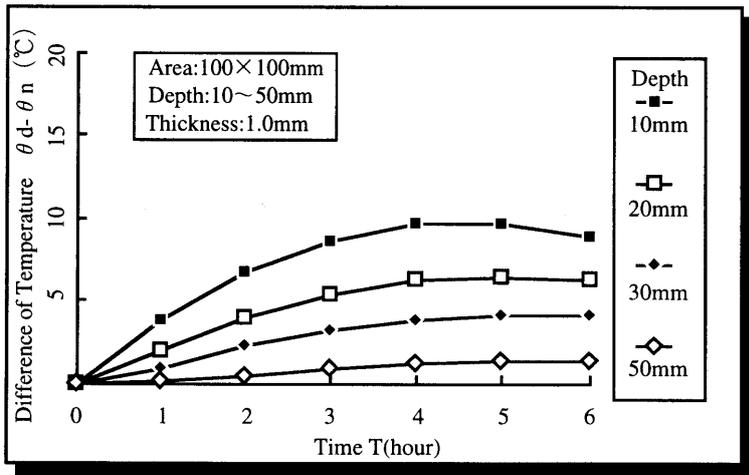
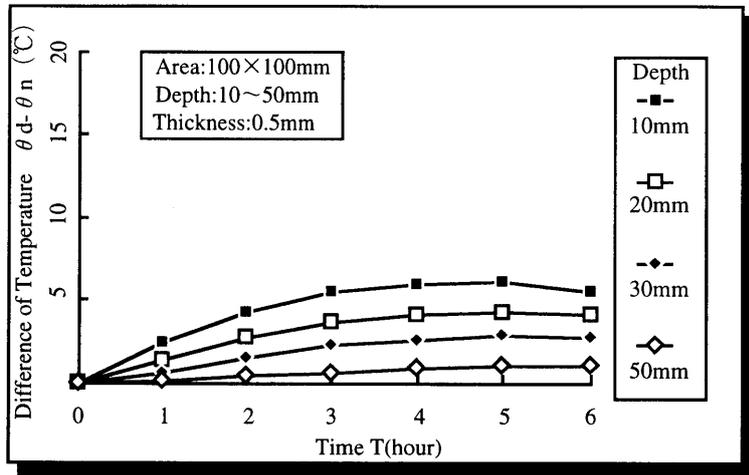


図-1.7 湿潤状態の欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) の経時変化



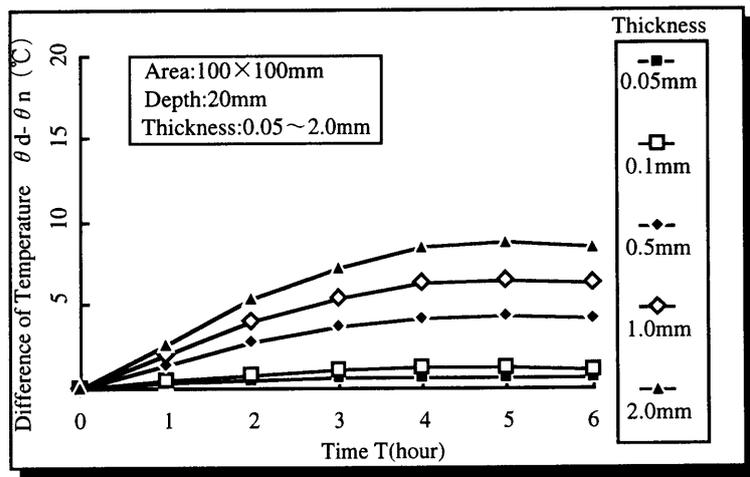
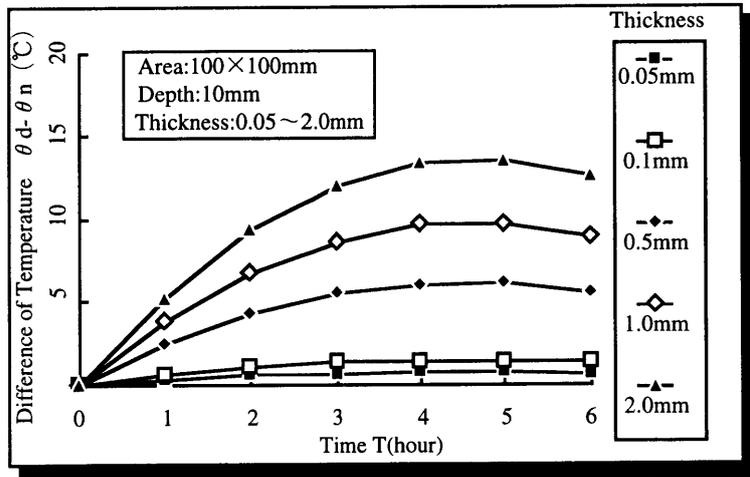
(a) 欠陥部の深さ (D) による影響

図-1.8 欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) の経時変化



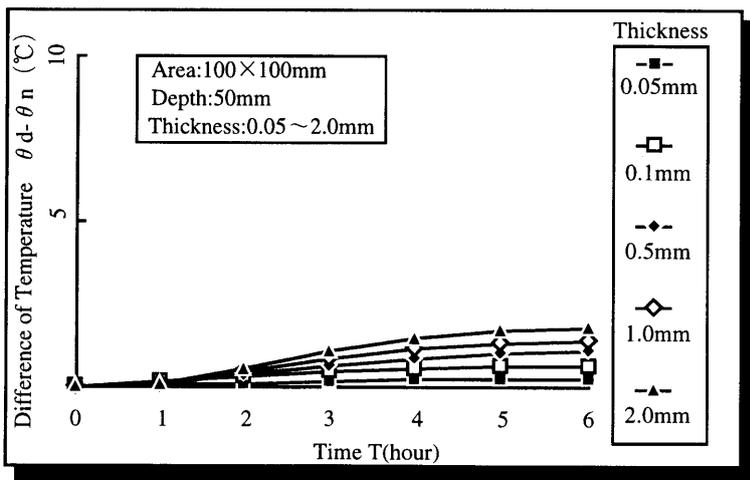
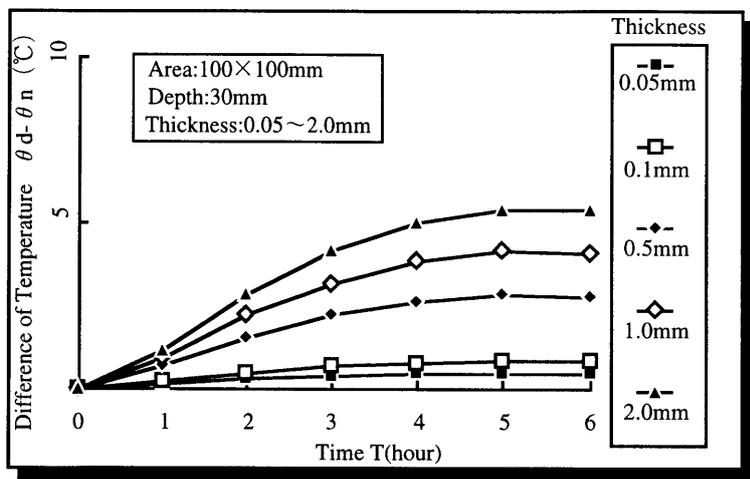
(a) 欠陥部の深さ (D) による影響

図-1.8 欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta d - \theta n$ ) の経時変化



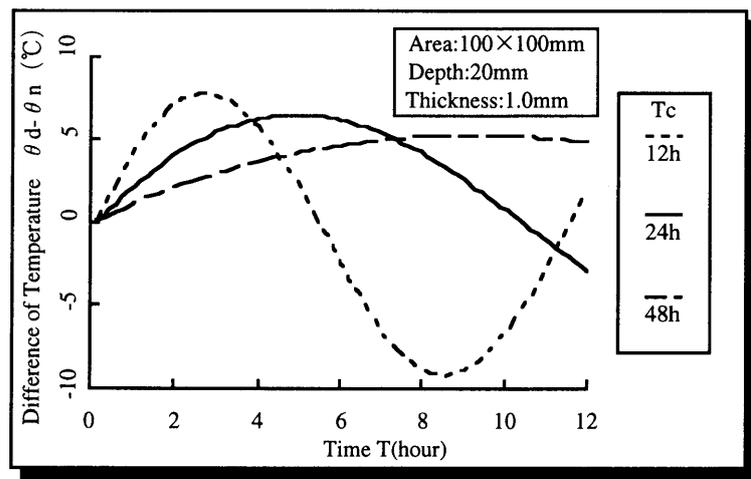
(b) 欠陥部の厚さ (W) による影響

図-1.8 欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) の経時変化



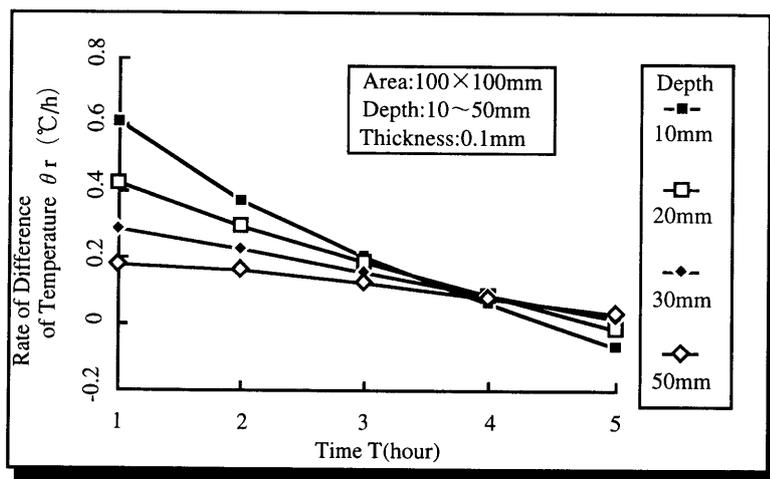
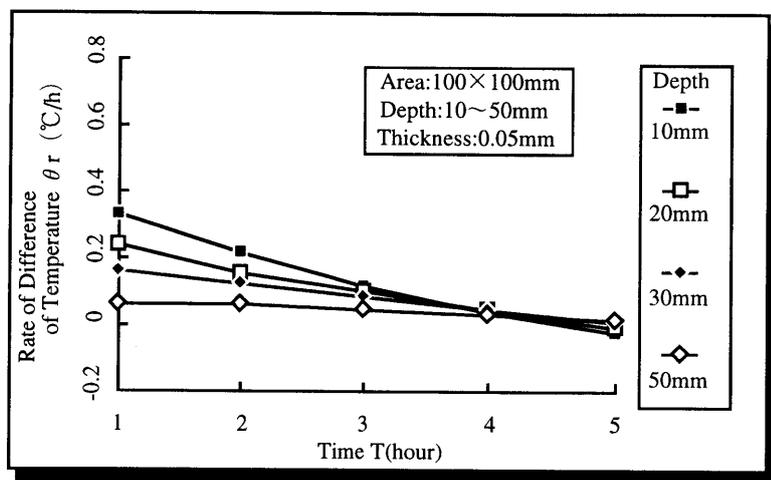
(b) 欠陥部の厚さ (W) による影響

図-1.8 欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) の経時変化



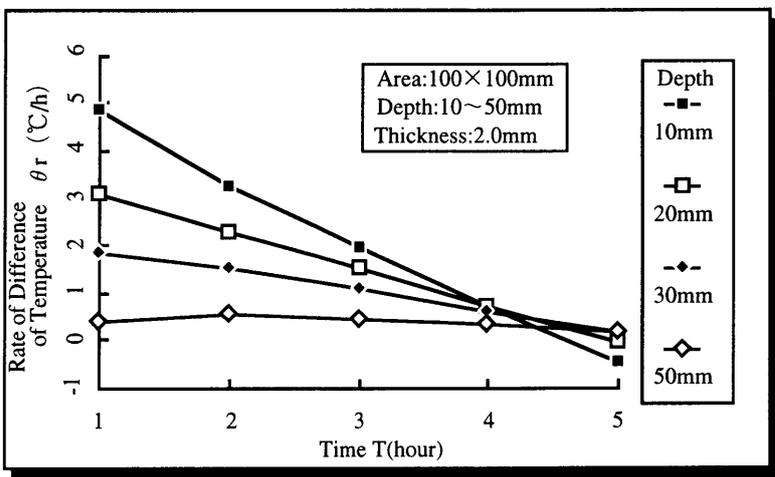
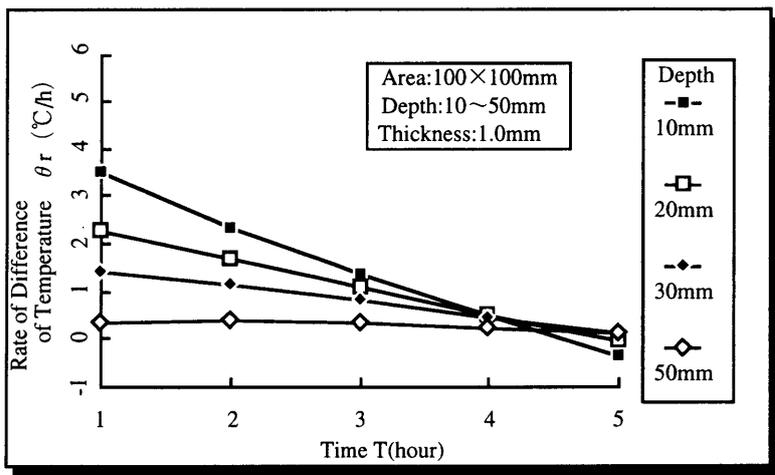
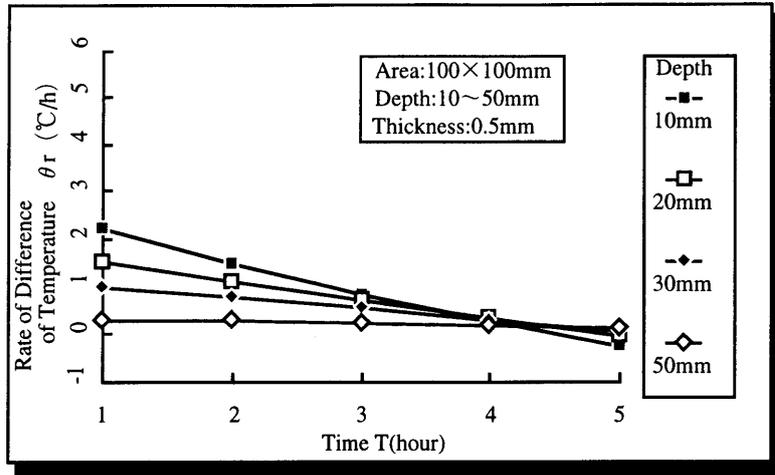
(c) 入力外気温の周期 (Tc) による影響

図-1.8 欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta d - \theta n$ ) の経時変化



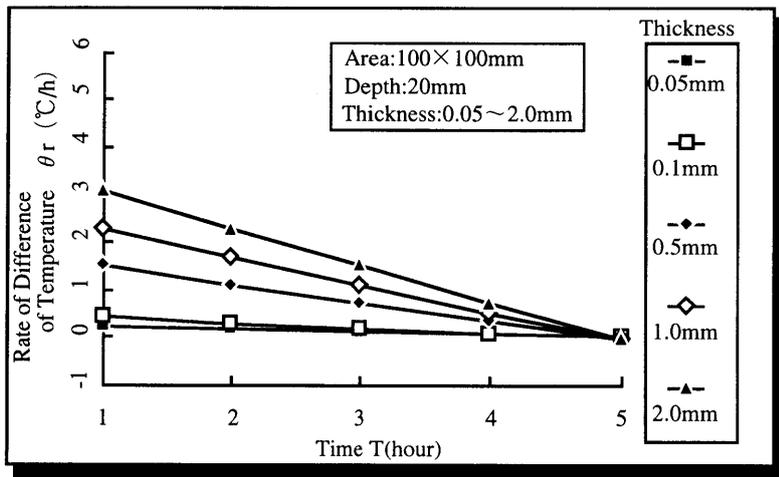
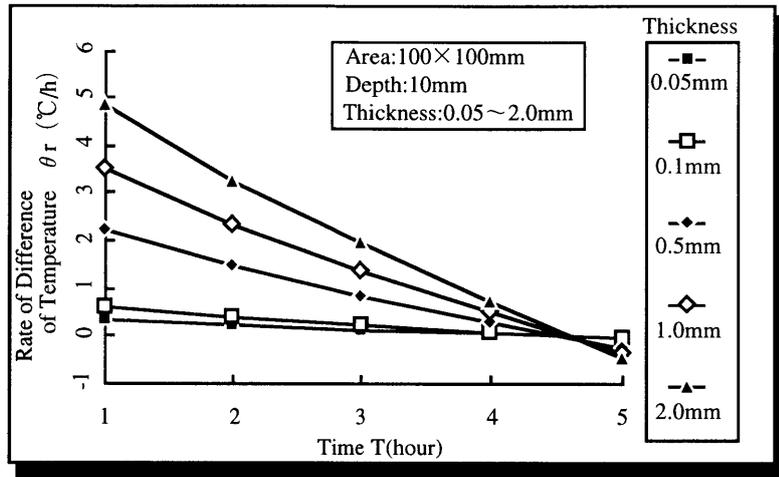
(a) 欠陥部の深さ (D) による影響

図-1.9 欠陥部と健全部の温度差の変化率 ( $\theta_r$ ) の経時変化



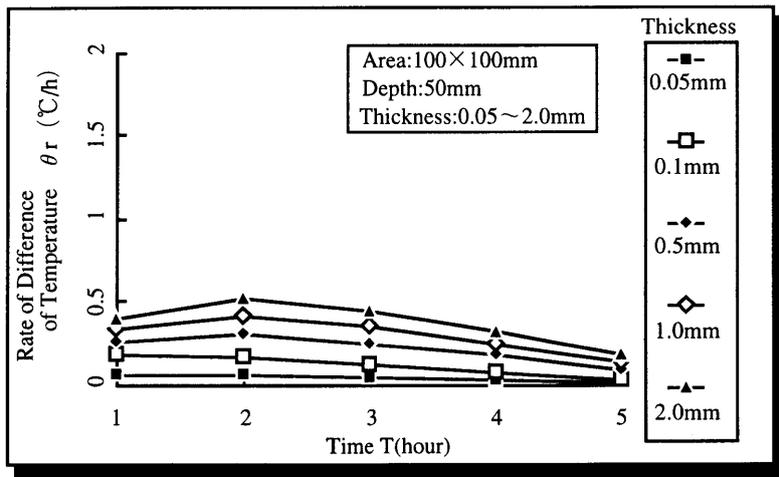
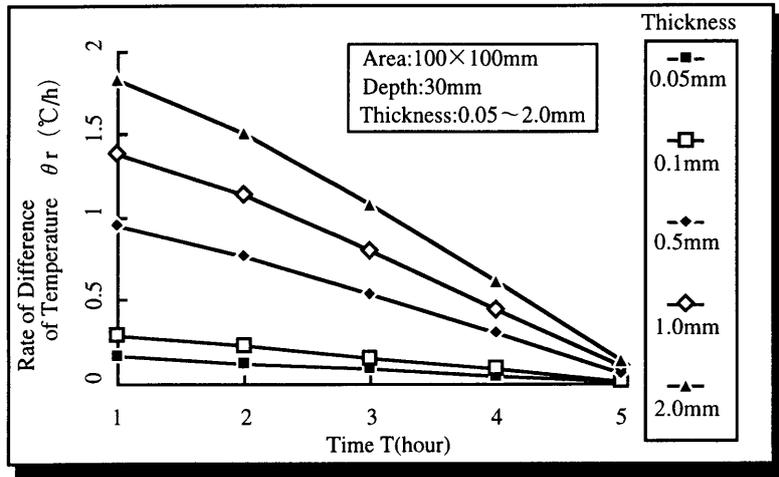
(a) 欠陥部の深さ (D) による影響

図-1.9 欠陥部と健全部の温度差の変化率 ( $\theta_r$ ) の経時変化



(b) 欠陥部の厚さ (W) による影響

図-1.9 欠陥部と健全部の温度差の変化率 ( $\theta_r$ ) の経時変化



(b) 欠陥部の厚さ (W) による影響

図-1.9 欠陥部と健全部の温度差の変化率 ( $\theta_r$ ) の経時変化

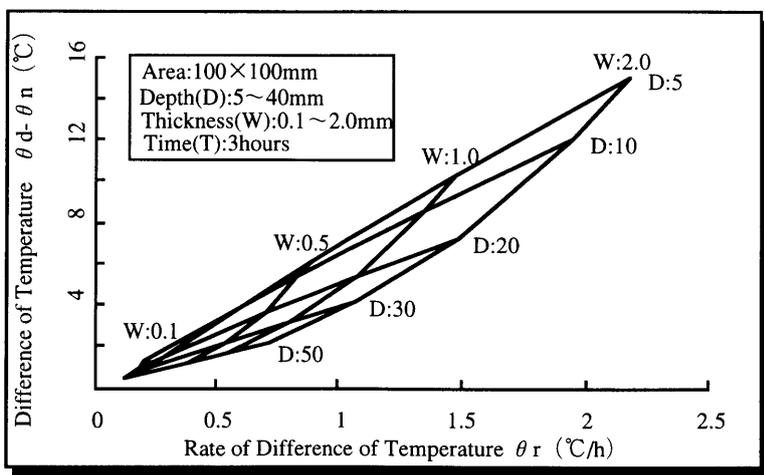
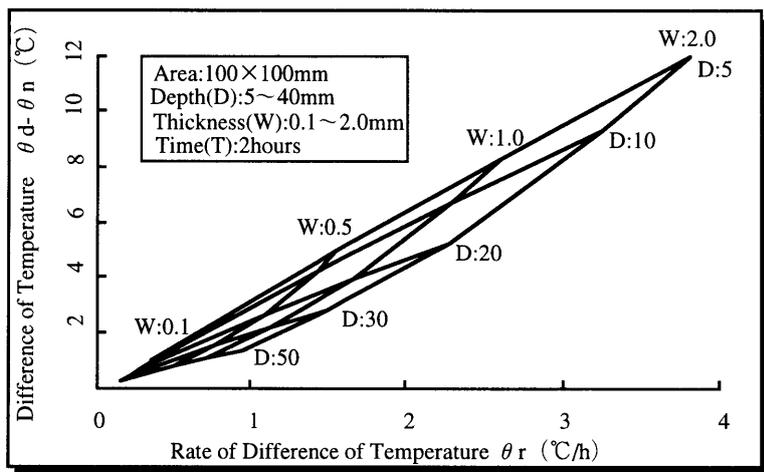
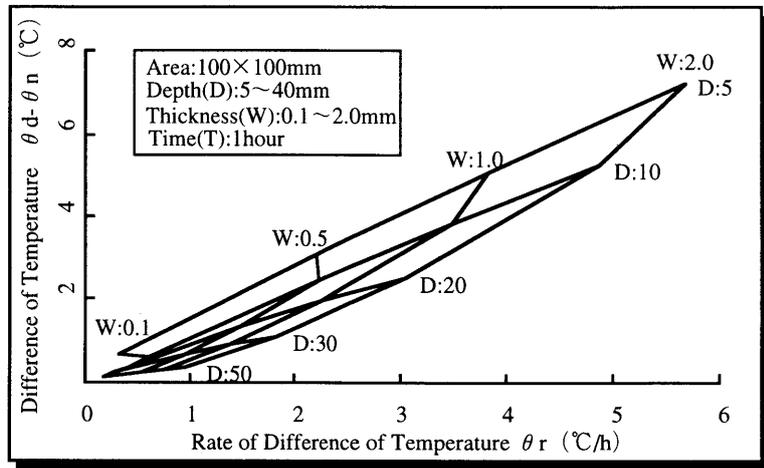


図-1.10 欠陥部と健全部の温度差の変化率 ( $\theta_r$ ) と温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) の関係に与える欠陥部の深さ (D) および厚さ (W) の影響

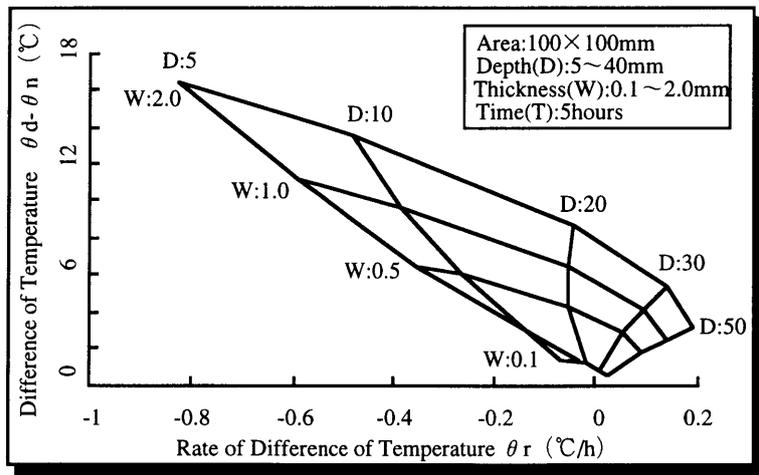
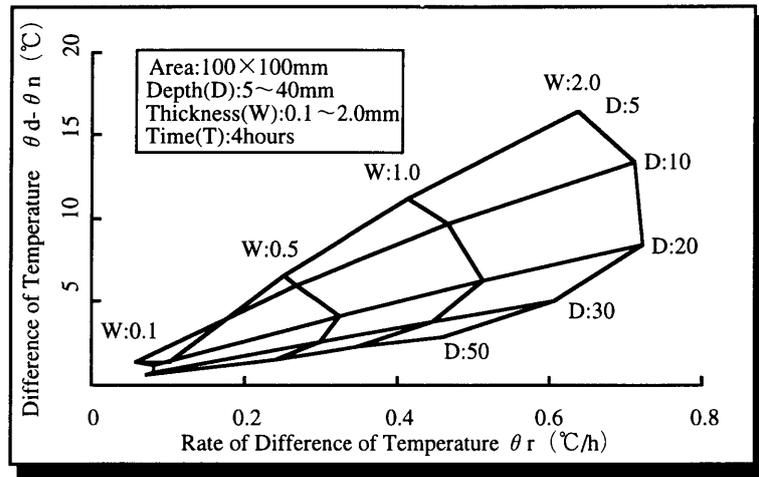


図-1.10 欠陥部と健全部の温度差の変化率 ( $\theta_r$ ) と温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) の関係に  
与える欠陥部の深さ (D) および厚さ (W) の影響

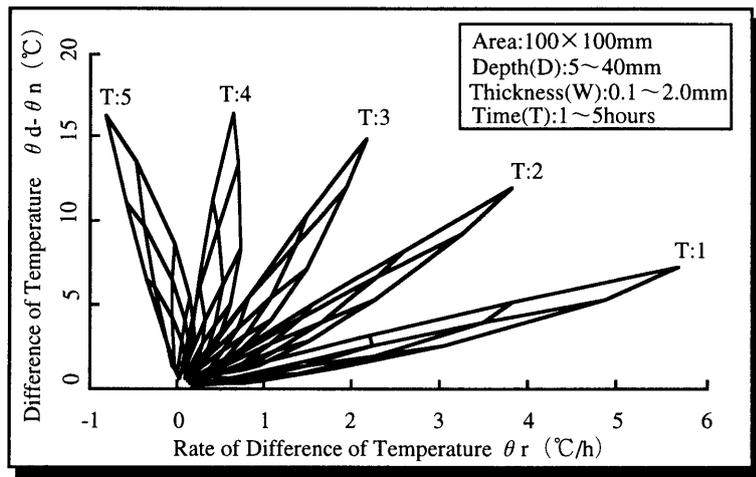


図-1.11 欠陥部と健全部の温度差の変化率 ( $\theta_r$ ) と温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ )  
 の関係に与える欠陥部の深さ (D)、厚さ (W)  
 および経過時間 (T) の影響



## 第2章 サーモグラフィー法による測定結果に関する解析的考察

### 2.1 概説

前章では、有限要素法に基づく数値解析によって、理想的な条件下において欠陥部の形状および規模が表面温度に及ぼす影響について理論的な検討を行い、欠陥部の形状および規模の推定手法を提案した。しかし、実際にサーモグラフィー法を用いて外壁の欠陥部を診断する場合には、表面温度が環境の変化による温度励振の影響を敏感に受けるために、必ずしも精度の良い診断が可能になるとは限らない。

本章では、先に提案した解析手法による計算結果と、人工的な欠陥を有する各種試験体の表面温度の測定結果を比較することによって、各種外乱の生じる環境条件下における表面温度の経時変化について検討し、欠陥部の形状および規模を精度良く推定する手法を確立するための基礎的な検討を行っている。また、解析手法の精度を高めるために、解析の境界条件として、前章で用いた境界条件（コンクリートおよび空気の材質間では熱伝導のみにより熱は伝えられる）に換えて、実現象に基づいた境界条件の設定を行っている。以下では、RC実物大試験体およびモルタル試験体に関する、サーモグラフィー法による表面温度の測定結果を用いて解析との比較および検討を行っている。

## 2.2 内部欠陥を有するモルタル試験体の表面温度の実測

本実験は、サーモグラフィー法によって得られた温度情報と有限要素法による解析結果を比較することにより、外壁面に生じる内部欠陥の形状および規模を精度良く推定する手法を確立することを目的としている。実験は、名古屋大学4号館の屋上において10月初旬に行われたものである。

### 2.2.1 試験体の作製方法

試験体の作製には、比較的欠陥部の形状の作製精度の高い、W/C=50%、S/C=2.5のモルタルを用いた。試験体は大きく分けて2つの工程から作製されている。まず、図-2.1 (a) のコア部は、あらかじめ作製しておいた2個のモルタル部材でプラスチックのチップをはさみ、その周囲を接着剤で塞ぎ、水分が間隙部に侵入しないように固定する。つぎに、作製したコア部を図-2.1 (b) に示すように、試験体の中心部となるように型枠に固定し、周囲にモルタルを打ち込む。以上の工程により各種人工欠陥部を内在する試験体を作製した。

### 2.2.2 試験体の形状

実験に用いた試験体の形状および寸法を、図-2.2に示す。欠陥部は、空気層としたが、発泡材を挿入した試験体 (D20W1S) も作成した。欠陥部の厚さおよび表面からの深さは、表-2.1に示す5種類とした。また、比較のために、欠陥を持たない試験体も作成した。

### 2.2.3 測定方法

本研究で用いた計測システムを図-2.3に示す。赤外線カメラは、試験体から3m離れた地点の高さ1mの位置に設置した。各試験体は、厚さ50mmの発泡材で周囲を断熱し、床上1mの位置に表面を真南の方角として図-2.4のように配置した。試験体中心部の表面温度 ( $\theta_d$ 、以下欠陥部の温度という)、左下端部の表面温度 ( $\theta_n$ 、以下健全部の温度という)、気温および水平面の日射量を30分おきに測定した。使用した赤外線カメラの性能を、表-2.2に示す。

## 2.2.4 測定結果

図-2.5に気温と日射量（鉛直面）の経時変化を示す。この日射量は、水平面で測定した日射量より南向き鉛直面の受ける日射量に換算したものである。

図-2.6に実験より得られた欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) の経時変化の測定結果を示す。なお、これらの測定データは、天候による若干のばらつきがあったため、前後の測定値で平均化を行っている。同図によれば、日射量が温度差に大きく影響を及ぼしていることがわかる。また、欠陥部の位置 (D) が浅いほど、あるいは、欠陥部の厚さ (W) が大きいほど温度差の増加率は大きくなっている。また、欠陥部に発泡材を挿入した場合は、空気層の場合に比べてかなり温度差が小さくなっている。

## 2.2.5 解析手法

解析は、図-2.7に示すような要素分割で、実験に用いた試験体の4分の1の縦150mm、横150mm、奥行き150mmの部分について行った。境界条件は、日射による熱流束の境界および外気温による熱伝達の境界を考慮した。周辺部は断熱とし、壁体の初期温度を0として計算した。日射量および気温は、実験によって測定されたデータを入力として用いた。材料定数値としては表-1.1に示す値を用いた。なお、壁面の日射吸収率を0.75とし、熱伝達率を $16.2\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ として計算を行った。

## 2.2.6 実験結果と解析結果の比較および考察

### (1) 表面温度の経時変化

解析および実験により得られた欠陥部と健全部の表面温度の経時変化を図-2.8に示す。図から明らかなように、解析と実験による温度曲線はほぼ一致している。

欠陥部の厚さが等しい場合、温度が上昇している初期の段階では、欠陥部の位置 (D) が浅くなるにつれて、解析結果は実験結果より温度の上昇率が若干大きくなっている。

欠陥部の深さ (D) が等しい場合には、温度が上昇する初期において、解析と実験による温度上昇率の差に対する欠陥部の厚さ (W) の影響は小さい。また、欠陥部の厚さ (W) が

最大温度に及ぼす影響は比較的大きい。

## (2) 欠陥部と健全部の温度差の経時変化

図-2.9に欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) の経時変化に関する実験結果と解析結果の比較を示す。同図によれば、両者は比較的良好一致している。

欠陥部の深さ (D) が浅くなるほど、または、厚さ (W) が大きくなるほど、最大温度差 ( $\theta_m$ ) が大きくなるため、設計仕様などによって、欠陥部の深さ (D) があらかじめわかっているような場合には、表面温度の最大温度差 ( $\theta_m$ ) から、欠陥部の厚さ (W) を推定することが可能である。

また、温度差のほぼ等しくなる、欠陥部の位置が浅くかつ厚さが小さい場合と、位置が深くかつ厚さが大きい場合は、前述の理想条件下の解析によれば、温度差が最大になる時間 ( $T_m$ ) から両者を識別することができるが、実条件に近い解析では、壁面の温度が環境の変化に大きく影響を受け、両者を判別することは現実的には非常に難しくなる。

なお、欠陥部として発泡材を挿入した場合には、空気を欠陥部とした場合に比べて、欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) は小さくなる。

欠陥部の深さが20mm、厚さが0.1mmの場合に、解析による温度差が実験値より小さくなっているが、これは試験体製作時の精度上の問題であり、作製した試験体の欠陥部が実際には0.1mmよりも厚くなっていたためと思われる。

## 2.3 まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 壁面に加えられる日射の強さによって、欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) は大きく影響を受ける。
- 2) 欠陥部の深さ (D) の大きいコンクリート内不充填部では、欠陥部の存在は検知できても欠陥部の厚さ (W) の推定精度が悪く、欠陥部の規模を推定することが難しい。
- 3) 欠陥の生じる深さ (D) が既知の場合には、解析と実測によって得られた温度情報を比較することによって、欠陥部の厚さ (W) を推定することができる。
- 4) 温度差のほぼ等しくなる、欠陥部の位置が浅くかつ厚さが小さい場合と、位置が深くかつ厚さが大きい場合を判別することは理論的には可能であるが、壁面の温度が環境の変化に大きく影響を受けるため、実際の条件下で両者を判別することは非常に難しい。
- 5) 試験体の欠陥部に発泡材を挿入した場合には、欠陥部が空気層の場合に比べて、欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) が小さくなる。

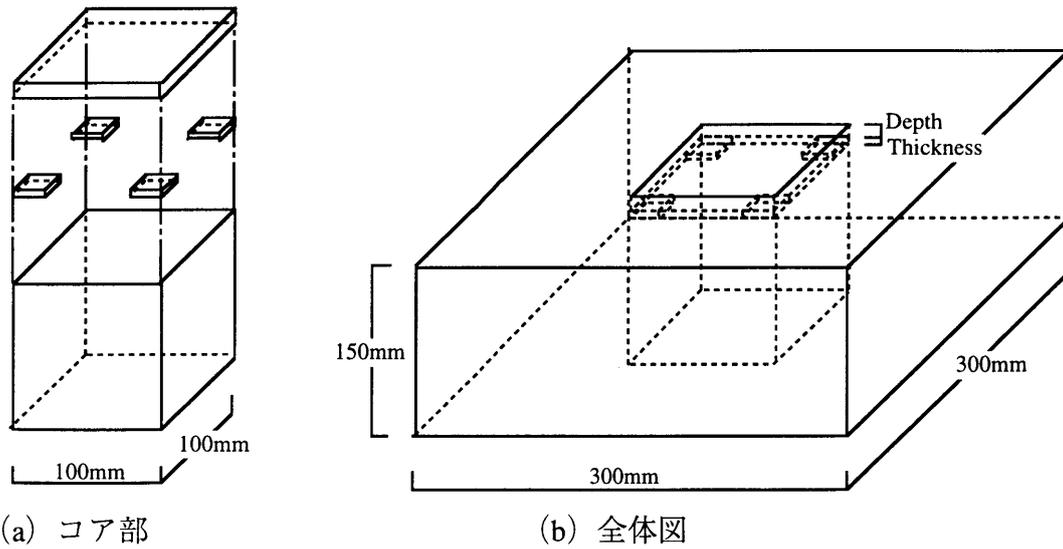


図-2.1 試験体の作製方法

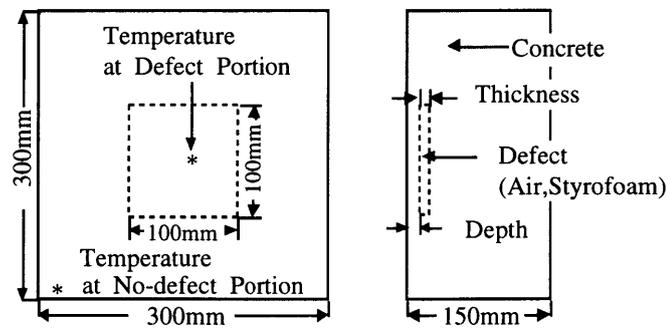


図-2.2 試験体の形状および寸法

表-2.1 欠陥部の形状および寸法と試験体名

Depth Thickness	5mm	20mm	40mm
0.1mm	/	D20W01	/
1.0mm	D5W1	D20W1 D20W1S*	D40W1
3.0mm	/	D20W3	/

[NOTE] \*S Means Styrofoam.

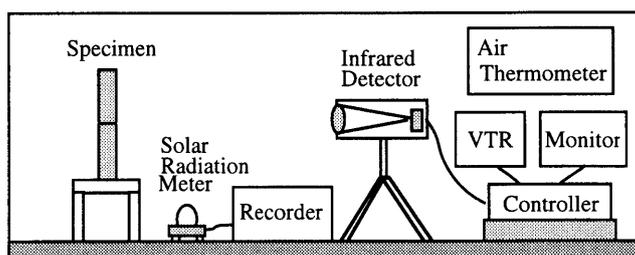


図-2.3 計測システム

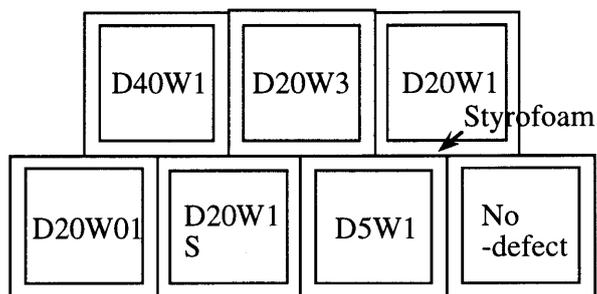


図-2.4 試験体の配置

表-2.2 使用した赤外線カメラの性能

測定温度範囲	0~1500℃
赤外線検出器	電子冷却型HgCdTe素子
温度ステップ	0.1℃
瞬時視野	2mrad
フレームタイム	0.05秒

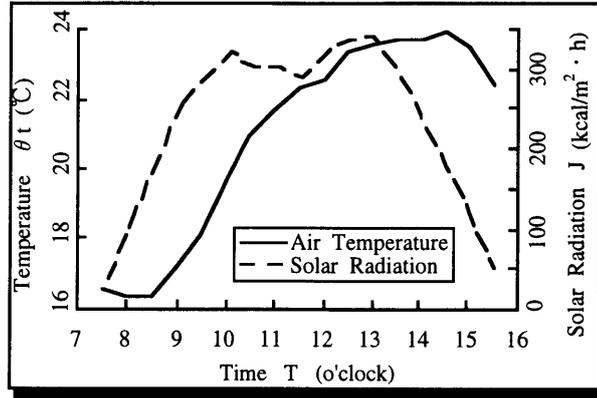
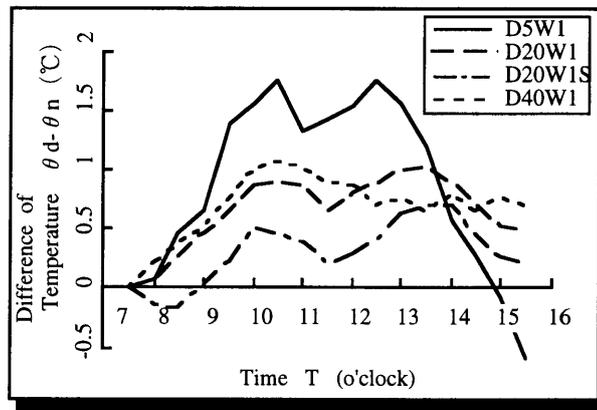
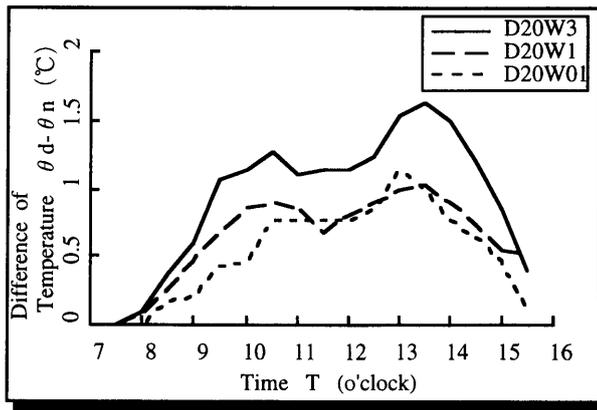


図-2.5 気温と日射量（鉛直面）の経時変化



(a) 深さによる影響



(b) 厚さによる影響

図-2.6 欠陥部と健全部の温度差（ $\theta_d - \theta_n$ ）の経時変化の測定結果

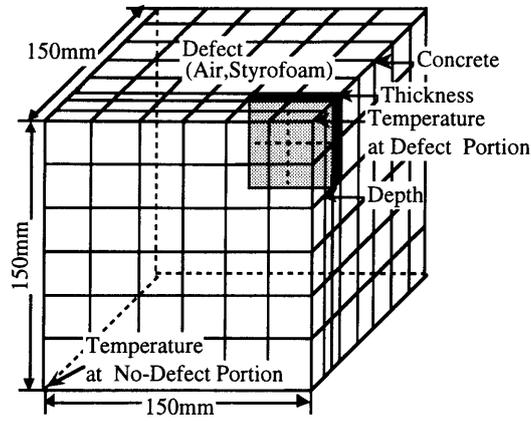


図-2.7 解析モデルの要素分割

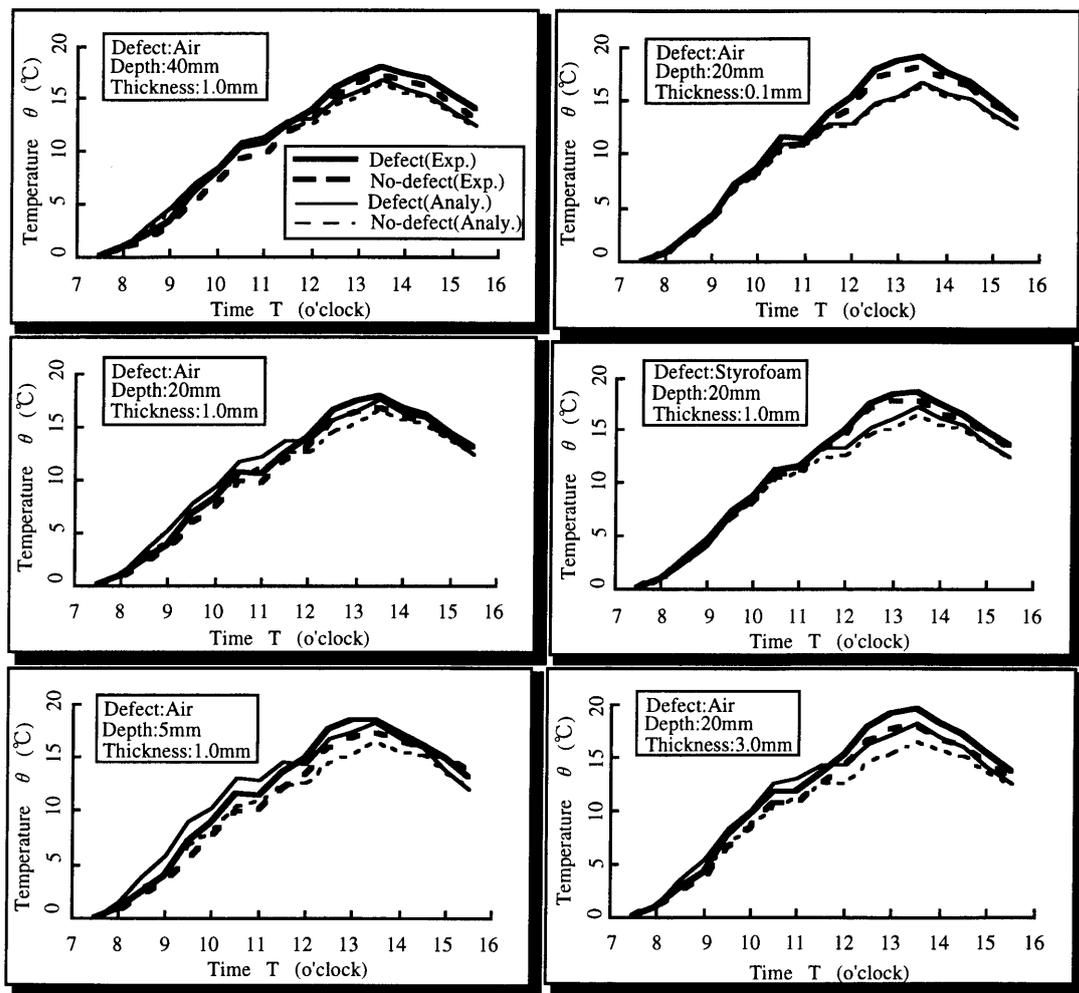


図-2.8 欠陥部と健全部の表面温度の経時変化

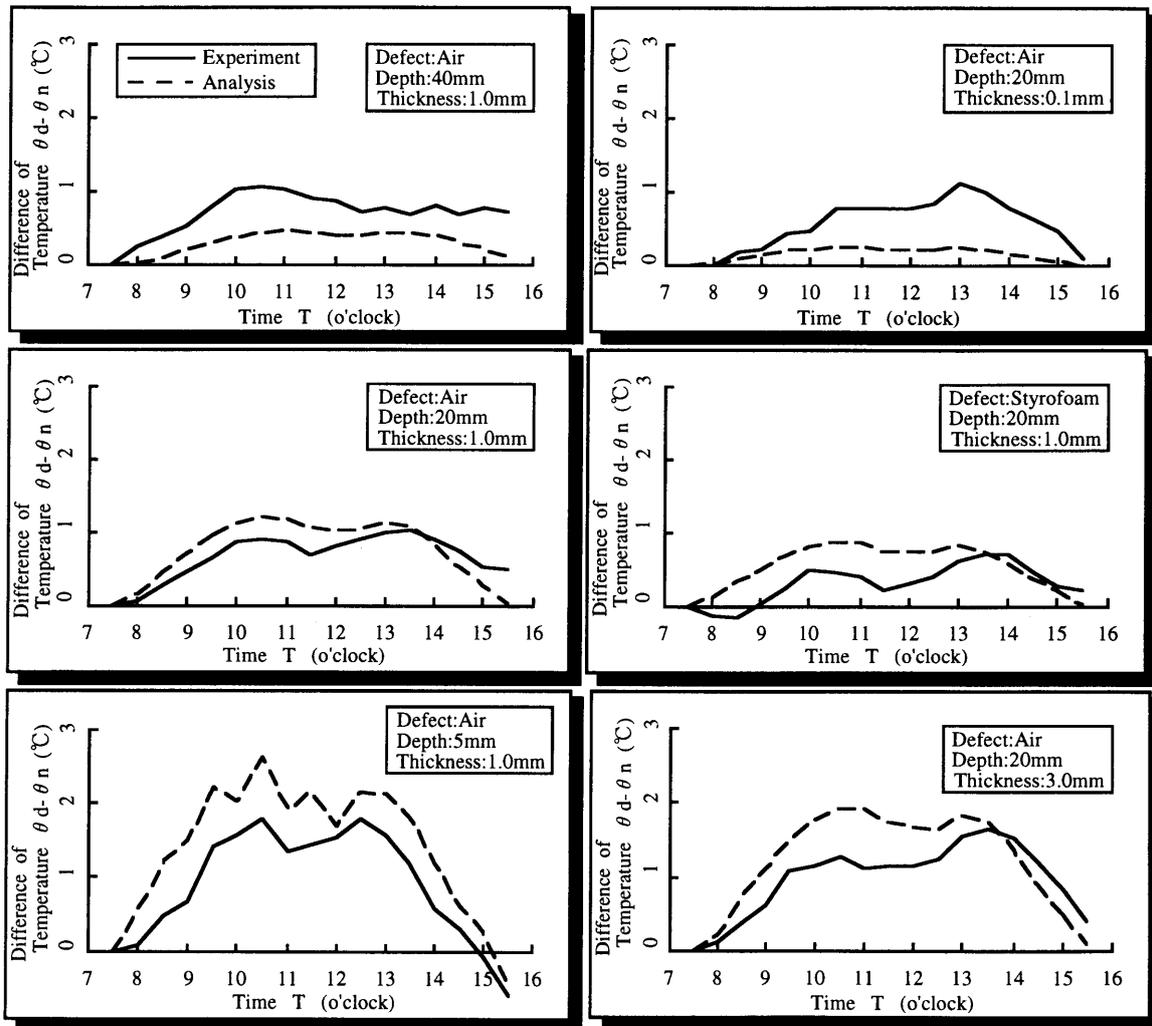


図-2.9 欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) の経時変化に関する実験結果と解析結果の比較

## 第3章 サーモグラフィー法による内部欠陥の検出限界に関する解析的考察

### 3.1 概説

サーモグラフィー法は、外壁の剥離診断に導入され始めたばかりで、診断の手法、内容、技術および診断結果の判定基準の整備が立ち遅れている。また、診断者が高度な技術の進歩に対応できず、診断の質にバラツキが生じ易いのが実状である。同手法を用いて建築物外壁面の欠陥部を診断する場合には、特に欠陥部の深さおよび厚さに関する検知限界の詳細な情報、すなわちサーモグラフィー法の適用限界は非常に重要であり、適切な判定基準を設けることが急務とされている。

本章では、解析によって、各種欠陥部形状を有するコンクリート部材の表面温度を計算し、理想的環境下における欠陥部の深さおよび厚さの検知限界について整理し、考察を行った。

## 3.2 解析手法

### 3.2.1 解析モデルおよび境界条件

図-3.1に解析モデルを示す。解析は、図-3.1 (c) に示すような要素分割で、各種形状の欠陥（欠陥部の深さ：1～100mm、厚さ：0.05～40mm、面積：100×100mm）を有する解析モデルの、4分の1の縦150mm、横150mm、奥行き150mmの領域について行った。境界条件は前章と同様に、日射による熱流束の境界および外気温による熱伝達の境界を考慮した。また、周辺部は断熱とし、壁体の初期温度を0として計算した。材料定数値としては表-1.1に示す値を用いた。なお、壁面の日射吸収率を0.75とし、熱伝達率を $16.2\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{℃}$ として計算を行った。

解析結果の整理方法としては、各種形状の欠陥を内在する解析モデルごとに、欠陥部と健全部の表面温度差 ( $\theta_m$ ) の最大値を計算し、この結果を整理して検知限界を求めている。また、欠陥部の乾湿状態の判別の可能性を検討するために、欠陥部を水と仮定した場合の欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) の経時変化の計算を同様の手法を用いて行った。

### 3.2.2 入力の気温および日射量の設定

図-3.2に入力に用いた気温および日射の強さ（鉛直面）を示す。今回の解析では、欠陥部と健全部の温度差が最も大きくなる条件として、冬至・晴天日・南向き壁面、および、温度差が最も小さくなる条件として、曇天日（または北向き壁面）の2種類の両極端の環境を想定して計算を行った。

### 3.3 解析結果とその考察

#### 3.3.1 検知限界

検知限界を図-3.3に示す。検知限界を表す最大温度差 ( $\theta_m$ ) を示す時間帯は、1日のうちでわずかな数分間に過ぎないため、曲線より右下の部分は、実際には全く検知不可能な範囲である。いずれの曲線が検知限界になるかは、使用する測定装置の精度に依存する。また、壁面に与えられる日射の強さおよび日射量によって、欠陥部の深さ (D) の影響が大きく変化するために、検知可能な欠陥部の深さ (D) の範囲は、壁面に与えられる熱量によってほぼ決定される。欠陥部の厚さ (W) がある程度以上大きくなると、欠陥部の厚さ (W) が最大温度差 ( $\theta_m$ ) に与える影響は小さくなる。このように、検知限界は、日射の強さおよび日射量によってほぼ決定されることが確認された。

#### 3.3.2 欠陥部の乾湿状態の判別

図-3.4に、欠陥部を湿潤状態とした場合の、欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) の経時変化を示す。同図によれば、ほとんどの場合、解析の初期において、欠陥部の温度が健全部の温度よりも低くならない。欠陥部の乾湿状態の判別は、第1章の境界条件が熱伝導のみにより伝熱される場合の解析では可能であったが、本解析で用いた、実現象に基づく境界条件による解析結果によれば、検知はほとんど不可能である。欠陥部が湿潤状態の場合に、欠陥部の温度が健全部の温度よりも低く測定される場合があるが、これは、欠陥部の水分が入れ換わることが原因であると推測される。

### 3.4 まとめ

- 1) 検知限界は、日射の強さおよび日射量を用いて計算により求めることができるが、検知可能な欠陥部の深さ (D) は、これらの影響を大きく受ける。
- 2) 欠陥部の湿潤状態の判別は、境界条件が熱伝導のみにより伝熱される場合の解析では可能であったが、実現象に基づく境界条件による解析結果によれば、検出はほとんど不可能である。

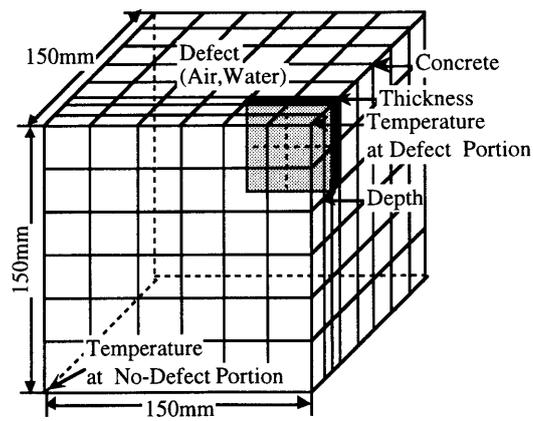
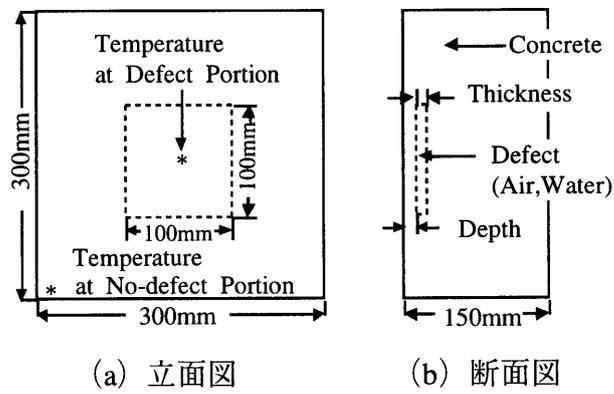
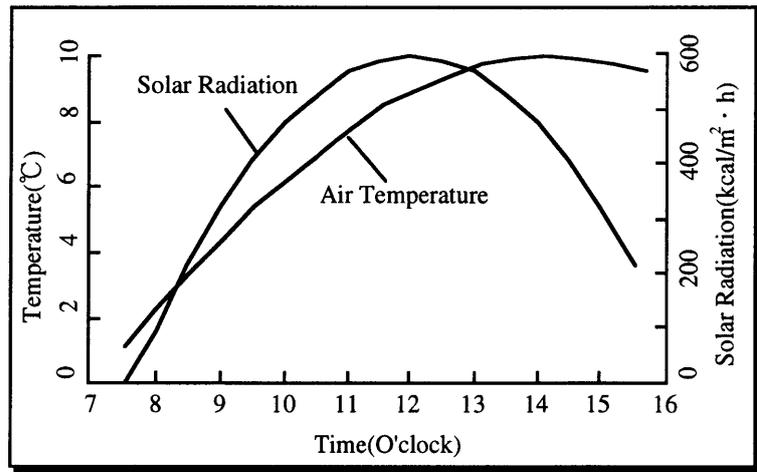
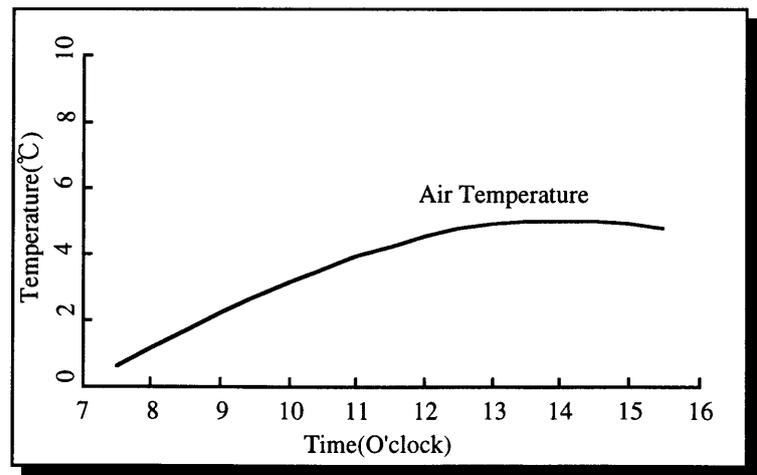


図-3.1 解析モデルの形状

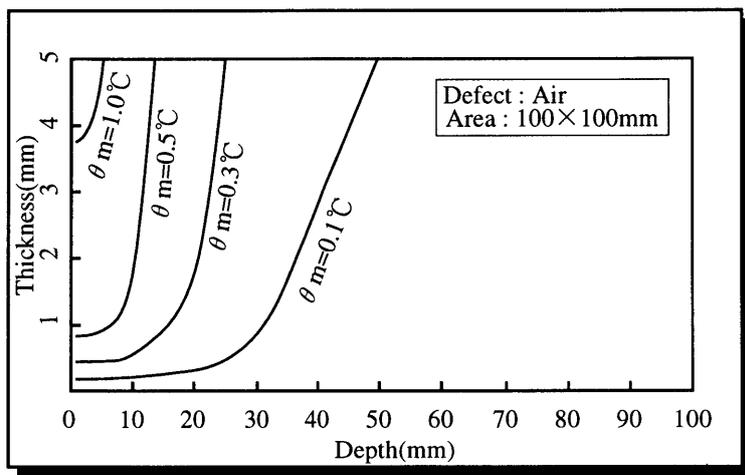
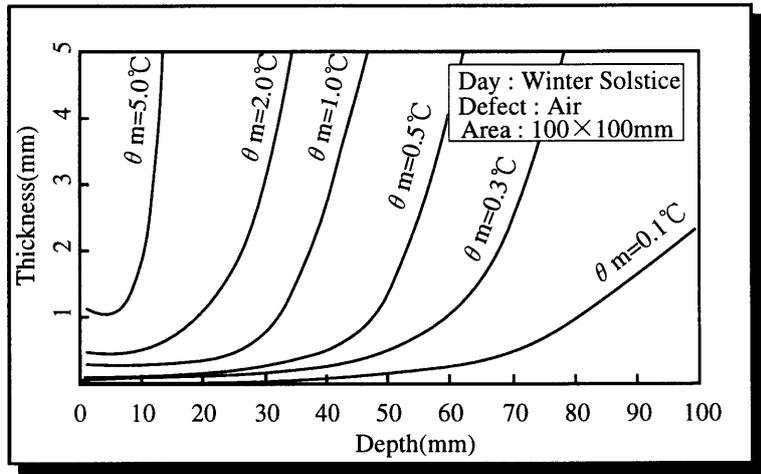


(a) 冬至・晴天日・南向き壁面



(b) 曇天日 (または北向き壁面)

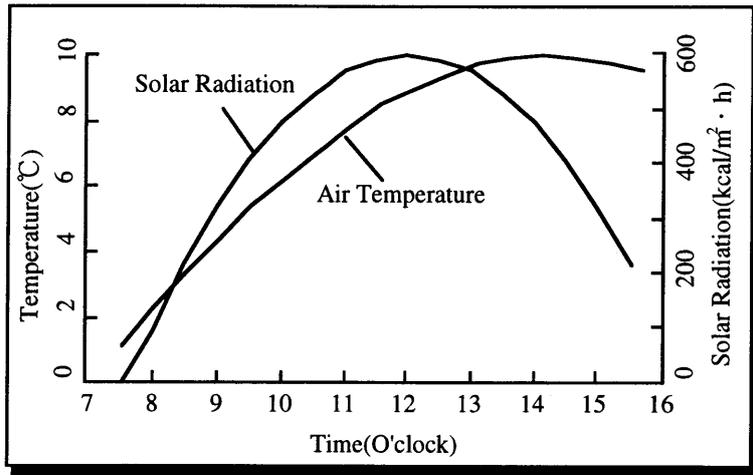
図-3.2 入力に用いた気温および日射の強さ



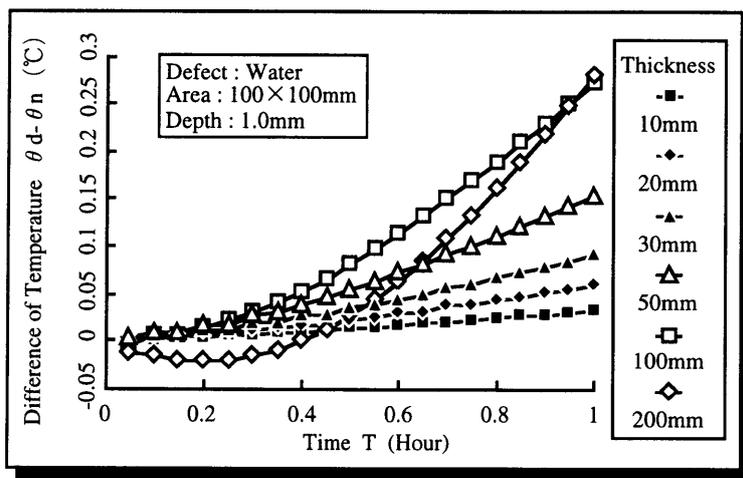
(a) 冬至・晴天日・南向き壁面

(b) 曇天日 (または北向き壁面)

図-3.3 検知限界



(a) 入力に用いた気温および日射の強さ



(b) 欠陥部と健全部の温度差 ( $\theta_d - \theta_n$ ) の経時変化

図-3.4 欠陥部が湿潤状態の場合の解析結果

## 第4章 内部欠陥を有する試験体の表面温度の実測

### 4.1 概説

赤外線サーモグラフィ法による外壁仕上げ材の深さ方向の検知限界についての屋外における実験では、気象条件の再現性がなく一般的な結論に達することが難しい。また、人工的な光線による加熱では壁面を均一に加熱することが難しい。そこで本章では、外壁が日射により受ける熱量に相当する熱量を気温変化で与えることにより、サーモグラフィ法の適用限界についての実験的検討を行う。

## 4.2 試験体の表面温度の実測

本実験は、サーモグラフィー法の各種条件下における適用範囲を検討するために1994年7月11日～22日に、(株)コンステックおよび大阪セメント技術研究所の協力のもとで行われたものである。

### 4.2.1 試験体の形状および寸法

試験体は、図-4.1 (a) に示すように幅300mm、高さ300mm、厚さ150mmのコンクリート製の前面に、表-4.1に示す寸法の人工空隙、およびモルタルを設けたものであり、計16体を製作した。ただし、本実験ではすべての試験体を使用したわけではない。

### 4.2.2 ソルエア気温の概念

日射などの輻射による熱量は、以下の式により、等価な熱量を与える空気温度に換算することが可能で、ソルエア気温 (SAT)、もしくは相当外気温度と呼ばれる。

$$\theta_{\text{solair}} = \theta_a + R_{\text{so}} (\epsilon_{\text{sun}} J_{\text{sun}} + \epsilon J_{\text{nit}}) \text{ (}^\circ\text{C)}$$

ここに、 $\theta_{\text{solair}}$  : ソルエア温度、 $\theta_a$  : 空気温度、  
 $J_{\text{sun}}$  : 日射量、 $J_{\text{nit}}$  : 夜間輻射量、  
 $\epsilon_{\text{sun}}$  : 外壁表面の日射吸収率、 $\epsilon$  : 外壁表面の放射率、  
 $R_{\text{so}}$  : 外壁表面の総合熱伝達抵抗

ソルエア気温の概念を用いれば、本来、気温変化と日射量および風速の三つのパラメータによって変化する外壁の表面温度を気温変化の影響のみで論ずることができる。すなわち、赤外線サーモグラフィー法の適用に最低限必要な気温の日較差および日射量は単独では求めることができないが、この手法を適用することによって必要なソルエア気温の日較差を計算により求めることが可能となる。

### 4.2.3 想定する気象条件およびソルエア気温

東西南北 (EWSN) のそれぞれの壁面の日射による日較差が最も大きくなるように南面は冬至、北面は夏至を想定し、また、春分の方が秋分より日射による熱量の比較差が大きくなる傾向があるため、東面および西面は春分を想定した。

#### 4.2.4 測定方法

図-4.1 (b) に計測システムおよび試験体の配置図を示す。計測の開始時刻は、9:00 (5:00 を想定) で、剥離部に現れる温度差が減少に転じた後、2時間経過した時点で計測を終了した。その間、10分毎に外壁表面温度を赤外線温度計および接触温度計を用いて計測、記録した。測定に使用した器材は、以下の通りである。

赤外線装置：サーモレーサTH1101 (8~13 $\mu$ m) (日本電気三栄 (株) 製)

温度、湿度、風速計：エアプロFC452 ((株) テストターム製)

接触温度計：表面温度計HL200 (アンリツ (株) 製)

また、室内側の気温は、想定した実際の外気温変化の最大と最小の平均の温度で一定になるように設定した。

## 4.3 赤外線サーモグラフィ法の適用限界に関する実験結果

### 4.3.1 南面への適用限界

#### (1) 概要

想定した気象条件および日射量を気温変化に換算した図-4.2に基づいて養生室内の気温を変化させ、冬至の快晴無風日という南面に関する理想的な気象条件下で、赤外線サーモグラフィ法で剥離の検知が可能なモルタル厚の限界を確認する実験を行った。なお、実験はD70W1, D70W0.5およびD100W1の3つの試験体について行った。その結果について以下に述べる。

#### (2) D70W1（モルタル厚70mm、剥離幅1mm）試験体の結果

##### (a) 気温および相対湿度の変化

実験時の気温および相対湿度の変化を図-4.3に示す。午前中（10:30前後：以下全て想定時間）に一時的に気温および相対湿度が急上昇しているのは、この時間帯に可変養生室に霜とり機能が自動的に働き、気温および相対湿度の制御が全くできなくなったためである。なお、実験時の平均風速は1.82m/sであった。

##### (b) 熱画像から得られた試験体表面温度分布の変化

実験開始時には剥離部と健全部との間には温度差は生じていないが、画像の左半分が右半分に比べて高温となっている傾向が見られた。この原因については可変養生室内の気温や気流の不均一、室内側に相当する可変養生器内の気温や気流の不均一などが考えられるが、気温や気流の測定においてもそのような不均一性は確認されておらず、この原因については最後まで特定することができなかった。この表面温度分布は実験開始後、約1時間で完全に消滅したが、その後の測定でも一時的に原因不明の温度分布が現れることがあった。8:00以降、剥離が存在する試験体中心部がその他の部分に比べて高温となる傾向が現れ始めた。この時刻の健全部と剥離部の表面温度差は約0.1℃である。しかしながら、その高温部は輪郭が明瞭ではなく、事前に剥離の存在についての情報がなければ、この熱画像から剥離の存在を確認することは困難であると思われる。その後、剥離が存在する試験体中心部のその他の部分に対する温度差は次第に拡大し、その輪郭も次第に剥離の形状と一致しはじめ、9:30にはほぼ剥離の大きさと一致する表面温度差が現れた。この時刻の健全部と剥離部の表面温度差は約0.2℃であった。表面温度差はその後もしつこく拡大する傾向が見られたが、12:00の撮影が終了した時点で養生室内の火災報知器が誤作動するというアクシデントがあり、この日の実験はやむなくこの時点で終了した。終了時の健全部

と剥離部の表面温度差は0.3℃であった。

### (3) D70W0.5 (モルタル厚70mm、剥離幅0.5mm) 試験体の結果

#### (a) 気温および相対湿度の変化

実験時の気温および相対湿度の変化を図-4.4に示す。やはり7:00頃に一時的に気温および相対湿度の制御が不可能となったが、それ以外の時間帯においてはほぼ計画した温度変化を再現することができた。なお、実験時の平均風速は2.04m/sであった。

#### (b) 熱画像から得られた試験体表面温度分布の変化

実験開始直後には剥離部と健全部との間には温度差は生じていないが、画像の上半分が下半分に比べて高温となっている傾向が見られる。この原因についても、先に述べたとおり特定することができなかつた。同様に、その後の撮影でも一時的に原因不明の温度分布が現れることがあった。10:00以降、剥離が存在する試験体中心部がその他の部分に比べて高温となる傾向が現れ始めた。この時刻の健全部と剥離部の表面温度差は約0.05℃である。しかしながら、その高温部は輪郭が明瞭ではなく、事前に剥離の存在についての情報がなければ、この熱画像から剥離の存在を確認することは困難であると思われる。その後、剥離が存在する試験体中心部のその他の部分に対する温度差は次第に拡大する傾向が見られたが、その輪郭形状については非常にぼんやりとしたものである。とくに急速な表面温度の上昇により、発泡スチロールで断熱した試験体の四隅からの熱の回り込みの影響が画像判読をより困難にしている。

### (4) D100W1 (モルタル厚100mm、剥離幅1mm) 試験体の結果

#### (a) 気温および相対湿度の変化

実験時の気温および相対湿度の変化を図-4.5に示す。この日は一時的に相対湿度の制御が不可能となったが、気温に関してはほぼ計画した温度変化を再現することができた。なお、実験時の平均風速は1.52m/sであった。

#### (b) 熱画像から得られた試験体表面温度分布の変化

実験開始直後には剥離部と健全部との間に温度差は生じていないが、画像の上半分が下半分に比べて高温となっている傾向がこの試験体にも見られる。この試験体でも一時的には健全部と剥離部との間に表面温度差が生じることがあったが、その表面温度差は出沒をくり返し、実験終了まで剥離を検知したといえるほどの安定した表面温度差が生じることはなく、むしろ試験体の四隅からの熱の回り込みの影響により、剥離が存在する試験体中央部が低温となる傾向が観測された。

## (5) 南面の検知限界に関する実験結果のまとめと考察

### (a) 表面温度変化

図-4.6～図-4.8に、D70W1、D70W0.5およびD100W1の表面温度変化を示す。表面温度は実験開始直後の時間帯に若干低下する傾向が見られるが、ほぼ実験開始時を最低温度、13:00前後を最高温度とする正弦波変動をしている。表面温度の最高値はいずれの場合も約30℃でモルタル厚の相違による影響は顕著には現れていない。南面は13:00前後にソルエア温度最大を迎えることから、ほぼソルエア温度の変化に比例し上昇していると考えられることができる。表面温度計による接触温度と赤外線映像装置による放射温度にかなりの相違があらわれている時間帯があるが、これは表面温度計による温度計測と赤外線映像装置による撮影を完全に同時には行うことができないためである。また、表面温度計による表面温度計測では、測定値が温度計そのものの温度による影響を受けることから、赤外線映像装置による測定値の方がより表面温度の真値に近いものと考えられる。したがって、以降は放射温度の変化について中心に述べる。

### (b) 表面温度差（剥離部－健全部の変化）

図-4.9～図-4.11に、剥離部と健全部間の表面温度差の変化を示す。D70W1では8:00頃から剥離部の表面温度が健全部に対して高温を示すようになり、その後もかなり直線的に表面温度差は拡大していく傾向が読み取れる。一方、表面温度計による接触温度の差は健全部と剥離部の測定に時間差があることから、全く信用できない。D70W0.5に関しても10:00頃から0.1℃程度の表面温度差が現れているが、その後の表面温度差の拡大傾向はほとんど見受けられない。D100W1の場合は時間帯により、一時的に剥離部と健全部との間に温度差が現れているが、その温度差には全く安定性がなく、むしろ養生室内の気温や風速の不均一、あるいは試験体の四隅からの熱の進入により生じる表面温度差が支配的であった。

## 4.3.2 北面への適用限界

### (1) 概要

赤外線サーモグラフィ法による外壁仕上げ材の剥離検知はその原理上、日射による受熱を必要とするため、従来から日射をほとんど受けない北面への適用は難しいと考えられている。しかしながら、この手法の北面への適用例は決して皆無ではない。そこで、ここでは、北面の日射受熱量が年間で最大となる夏至の快晴日を想定し、その気象条件および日射量を気温変化に換算した図-4.12に基づいて養生室内の気温を変化させ、赤外線サー

モグラフィ法の北面への適用の可否について確認した。なお、実験にはD30W1試験体を使用した。その結果を以下に述べる。

## (2) 気温、相対湿度および風速の変化

実験時の養生室内の気温および相対湿度の変化を図-4.13に示す。この日はほぼ計画した気温および相対湿度を再現することができた。なお、実験時の平均風速は2.4m/sであった。

## (3) 熱画像から得られた試験体表面温度分布の変化

実験開始の画像上、微小な温度差ながら中央部の剥離が存在する部分が低温で現れた。これは実験開始時の室内側および屋外側の気温差（室内側24℃、屋外側20℃）により、健全部と剥離部の間に定常状態で表面温度差が生じたためである。この結果はモルタル厚が30mm程度であれば、気温変化や日射による受熱なしでも、室内外の気温差だけで剥離の検知が行えることを示唆している。この時刻での健全部、剥離部の表面温度差は約0.05℃で剥離部が低温であった。7:00以降、剥離が存在する試験体中心部がその他の部分に比べて高温となる傾向が現れ始めた。この時刻の健全部と剥離部の表面温度差は0.025℃前後である。このような微小な表面温度差でも剥離の検知ができるのは、北面の表面温度変化が他の壁面に比べてゆるやかで、四隅からの熱の回り込みや風速のムラの影響を受けにくいからである。しかしながら、その高温部は輪郭が明瞭ではなく、この熱画像から剥離の存在を確認することは困難であると思われる。その後、剥離が存在する試験体中心部のその他の部分に対する温度差は次第に拡大し、その輪郭も次第に人工欠陥の形状と一致しはじめ、8:00にはほぼ剥離の大きさと一致する表面温度差の分布が現れた。この時刻の健全部と剥離部の表面温度差は0.15℃前後であった。表面温度差はその後縮小し、9:30頃、一旦消滅したが、10:30前後に再び現れ、温度差はその後少しずつ拡大して、11:30前後には約0.2℃でピークに達し、その後はほぼ一定で推移した。

## (4) 北面の検知限界に関する実験結果のまとめと考察

図-4.14に表面温度変化を示す。表面温度は実験開始時を最低とし、8:00前後に一旦ピークとなり、その後9:30前後から再び上昇に転じ、13:00頃ほぼピークとなる。表面温度に2度のピークが現れるのは、北面にはソルエア温度ピークが朝方の直達日射と気温変化により2度現れるためである。一日の表面温度の上下動は5.4℃であり、この程度の表面温度変化でも、モルタル厚が薄く、かつ剥離幅が十分に大きければ赤外線サーモグラフィ法の適用が可能であることがわかる。また、図-4.15に剥離部と健全部間の表面温度差の変

化を示す。表面温度差は8:00前後に約0.15℃で一旦ピークを示し、その後縮小して9:30頃一旦消滅する。これはこの時間帯に北面への日射の直射がなくなるためである。その後気温の上昇により、表面温度差は再び現れ、11:30前後には0.2℃でほぼ最大となり、その後、実験終了時までほぼ一定で推移した。北面は壁面の表面温度変化がゆるやかに進行するため、接触温度と放射温度の測定値はほぼ一致した。

#### 4.3.3 赤外線サーモグラフィ法の検知限界に関する実験的研究のまとめ

本章では東西南北各方位の外壁に関して、赤外線サーモグラフィ法により剥離検知が可能な仕上げ材の厚さについての限界を実験的手法を用いて確認した。その結果を以下にまとめる。

##### (1) 表面温度変化

実験開始からの経過時間と表面温度変化の関係を図-4.16および図-4.17に示す。これらの図から、表面温度変化は東面が最も急激であり、南面はかなり緩やかな上昇を示している。また、西面は実験開始から270分までは最も緩やかな上昇を示すが、その後は急激に上昇している。表面温度変化の日積算値は南面で約22℃、東面で約16℃、西面で約17℃、北面で約5℃である。また、モルタル厚の違いや剥離幅の違いによる影響は顕著には現れていない。

図-4.18および図-4.19には、それぞれ健全部および剥離部の30分おきのソルエア気温変化量と表面温度変化量の関係を示す。両者の間にはかなり強い正の相関関係がある。外壁の表面温度変化は複雑な時間と空間の関数となるが、実験結果を極めて単純に解釈して回帰分析を行ったところ、ソルエア気温の変化量と表面温度の変化量の関係について下記の回帰式が得られた。

$$\text{健全部： } y=0.3765x+0.5371$$

$$\text{剥離部： } y=0.3782x+0.5433$$

ここで、  $y$ ：表面温度変化量 (℃)

$x$ ：ソルエア温度変化量 (℃)

なお、決定係数 $R^2$ は健全部で0.6227、剥離部で0.6199といずれも強い相関を示した。この結果から今回の実験に限っては、ソルエア温度1℃の上昇について試験体の屋外側表面温度は約0.38℃の上昇を示したと言える。

## (2) 表面温度差

図-4.20～図-4.23にそれぞれ南面、東面、西面および北面のソルエア温度変化積算値と表面温度差（剥離部－健全部）の関係を示す。南面についてはソルエア温度変化積算値が約5.67℃に達した時点で、D70W1に健全部と剥離部の間に表面温度差が生じはじめ、ソルエア温度変化積算値が約25.2℃の時点で、D70W0.5に表面温度差が現れている。また、東面についてはソルエア温度変化積算値が約12.1℃に達した時点で、D70W1に健全部と剥離部の間に表面温度差が生じはじめ、ソルエア温度変化積算値が約21.6℃の時点で、D70W0.5に表面温度差が現れている。そして、西面についてはソルエア温度変化積算値が約16.6℃に達した時点で、D70W1に健全部と剥離部の間に表面温度差が生じはじめ、ソルエア温度変化積算値が約32.0℃の時点で、D70W0.5に表面温度差が現れている。南面D70W1のみ非常に小さなソルエア温度積算値で表面温度差が現れているが、これはD70W1の実験時の午前中に働いた霜とり機能が他の試験体の実験時より長時間続いたために、この時間帯、表面温度が急上昇したためであり、これを除いて考えれば、東面、南面、西面の順に小さなソルエア温度変化で剥離が検知できることになる。しかしながら、これらの傾向は時間の関数として取り扱うべきものであるので、単純に数値だけで論じるべきではないと思われる。

#### 4.4 まとめ

今回の実験で得られた知見を以下に列記する。

- 1) 東京において理想的な気象条件下で測定を行ったと想定した場合、最小検知温度差が0.1℃以下の赤外線映像装置を用いれば、東面、西面および南面に関しては赤外線サーモグラフィー法による外壁仕上げ材の剥離検知はモルタル厚70mmまでの外壁に適用できる。ただし、今回の実験は、30cm×30cmと極めて小さな試験体を用いて行ったため、試験体四隅からの熱の回り込みの影響を受け画像判読が困難になった。十分に大きな試験体で実験をすれば、より深い位置に存在する剥離でも検知できる可能性は残る。しかしながら、実構造物の場合にも剥離の周囲にはベランダや窓わくなど熱の回り込みの原因となるものが存在するので、この実験の結果はかなり実態に添うものといえる。
- 2) 赤外線サーモグラフィー法の適用が困難であるとされてきた北面でも、モルタル厚が30mm以下であれば、剥離検知は可能である。
- 3) 赤外線映像装置の最小検知温度差は、そのまま人間がその装置を用いて剥離を検知できる最小検知温度差とはならない。つまり、赤外線映像装置が剥離部に生じた極めて微小な表面温度差を検知したとしても、人間がそれを剥離と認識するとは限らない。
- 4) 剥離部に表面温度差が生じてから、人間が剥離と認識できる輪郭形状が現れるまでには、数10分の時間差がある。この間、剥離部の表面温度差を持続させるだけの熱量が持続しなくては剥離は検知できない。

表-4.1 供試体

記号	モルタル厚 (mm)	剥離 (空隙) 幅 (mm)	備考
D30W1	30	1	
D30W0.5	30	0.5	
D30W0.3	30	0.3	
D30W0	30	0	剥離なし
D50W1	50	1	
D50W0.5	50	0.5	
D50W0.3	50	0.3	
D50W0	50	0	剥離なし
D70W1	70	1	
D70W0.5	70	0.5	
D70W0.3	70	0.3	
D70W0	70	0	剥離なし
D100W1	100	1	
D100W0.5	100	0.5	
D100W0.3	100	0.3	
D100W0	100	0	剥離なし

空隙作成用  
モルタルピース

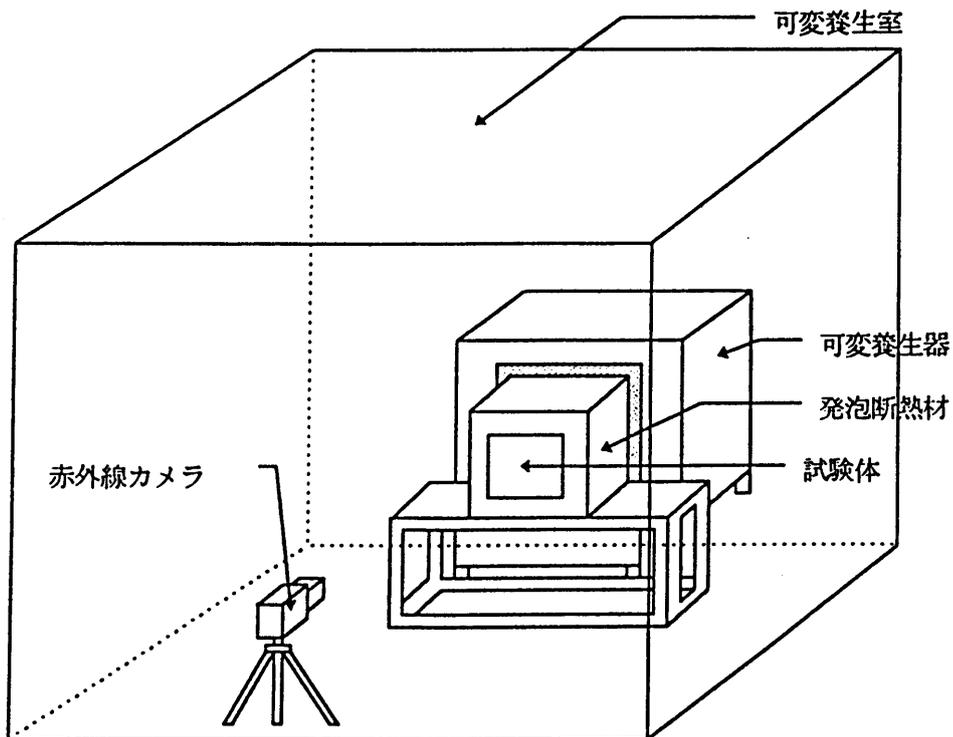
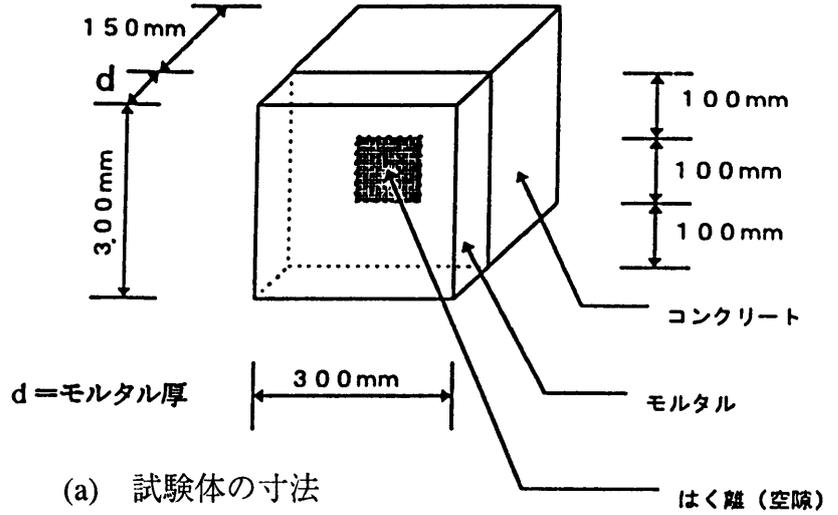
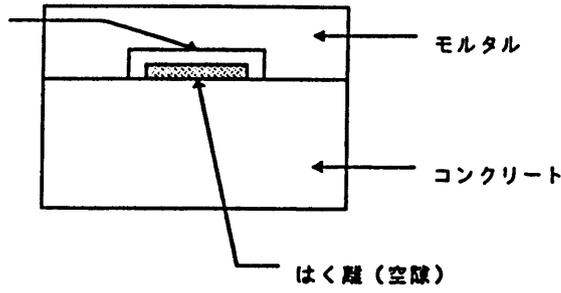


図-4.1 試験体

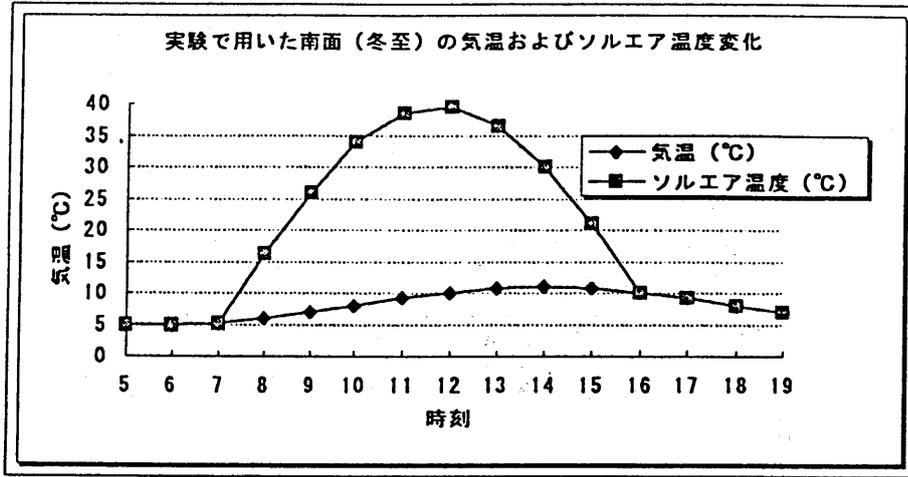


図-4.2 南面の気温変化の計画値

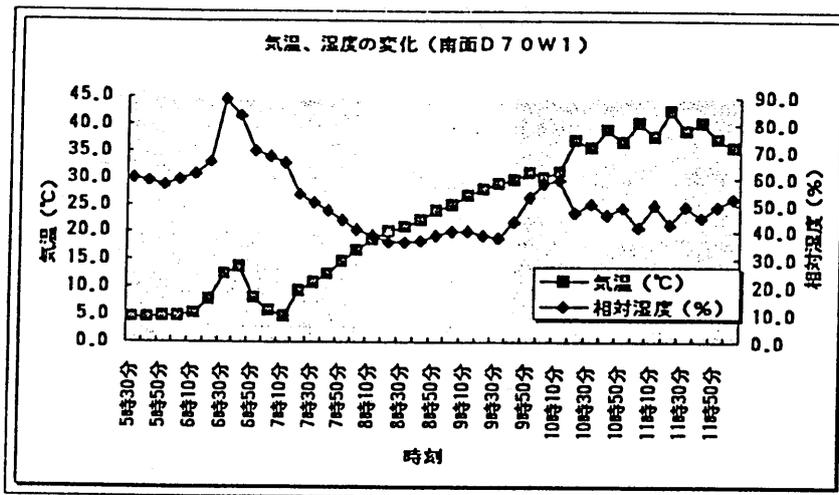


図-4.3 南面D70W1の実験時の気温および相対湿度の変化

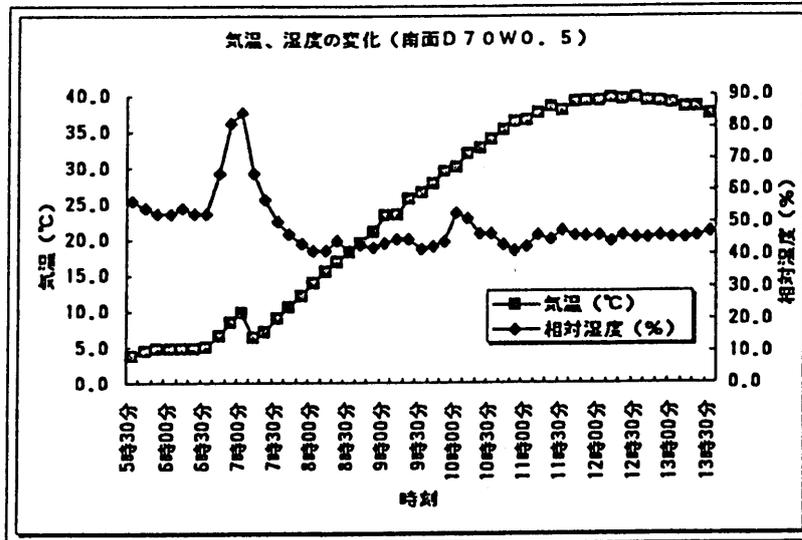


図-4.4 南面D70W0.5の実験時の気温および相対湿度の変化

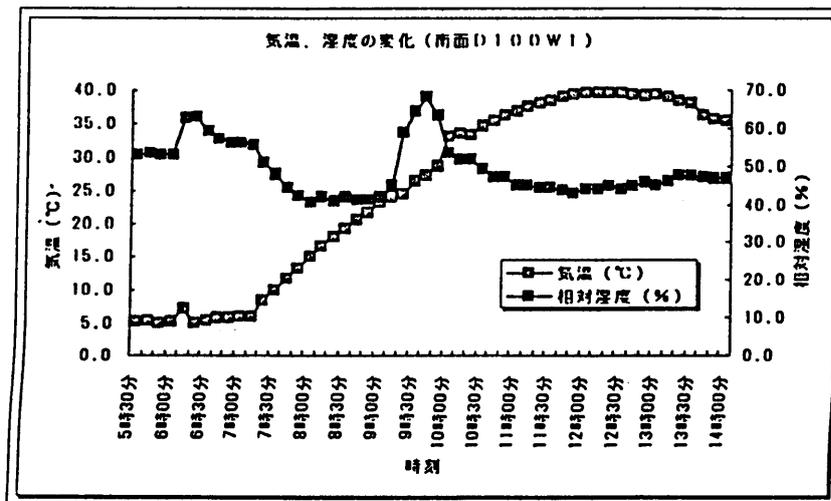


図-4.5 南面D100W1の実験時の気温および相対湿度の変化

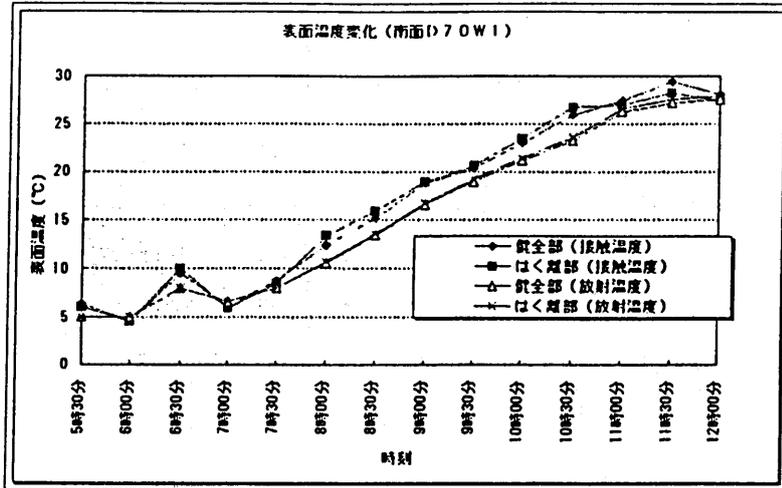


図-4.6 南面D70W1の表面温度変化

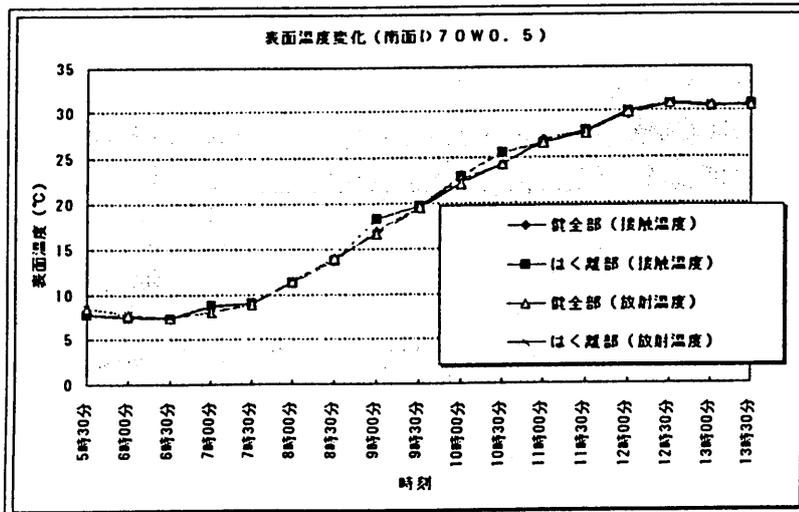


図-4.7 南面D70W0.5の表面温度変化

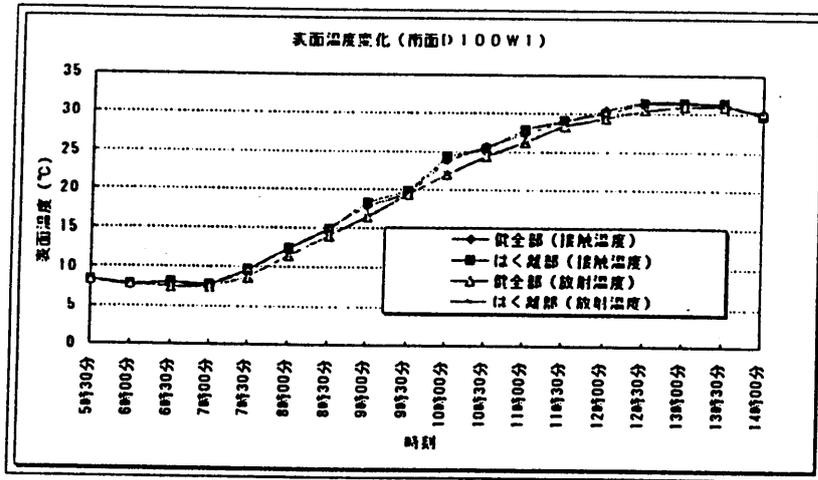


図-4.8 南面D100W1の表面温度変化

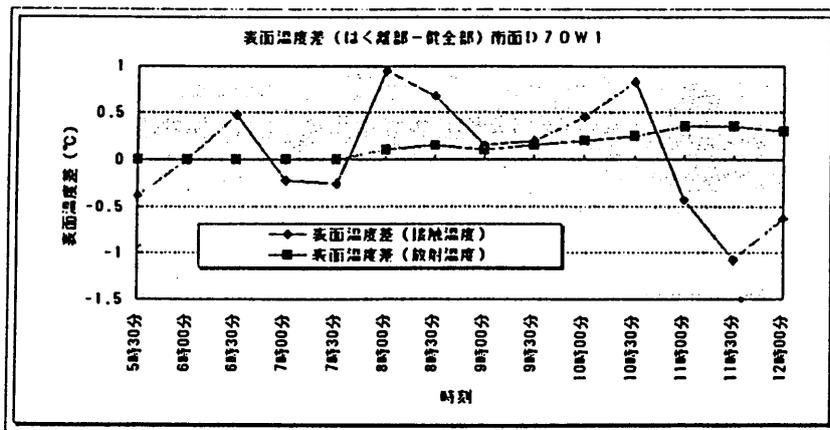


図-4.9 南面D70W1の表面温度差

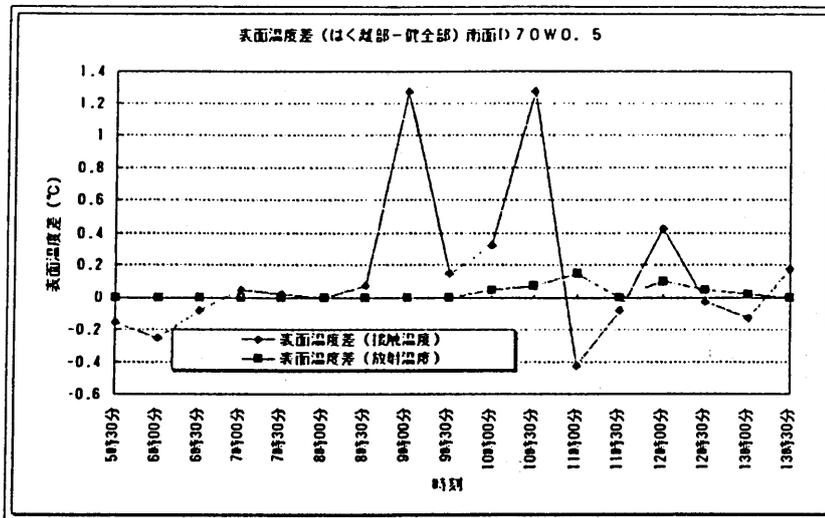


図-4.10 南面D70W0.5の表面温度差

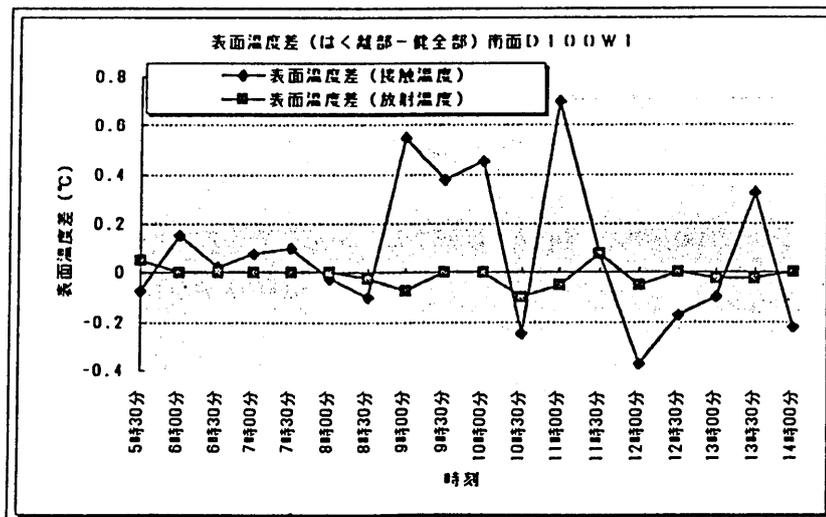


図-4.11 南面D100W1の表面温度差

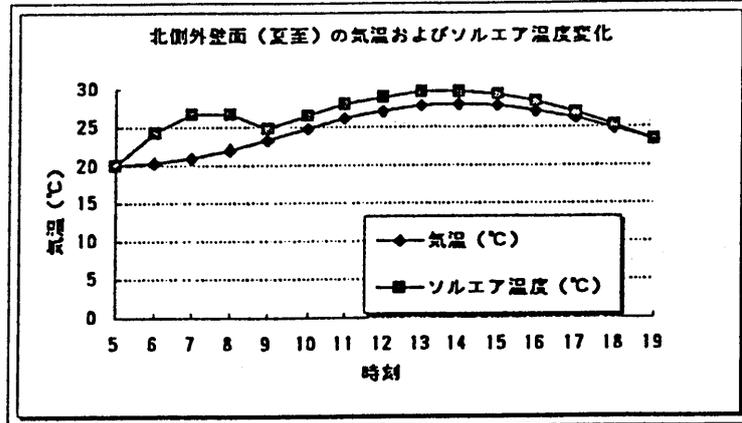


図-4.12 北面の気温変化の計画値

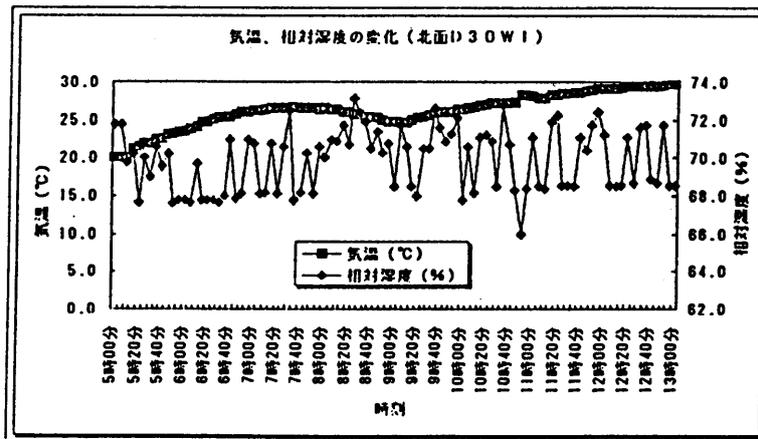


図-4.3 北面D30W1の実験時の気温および相対湿度の変化

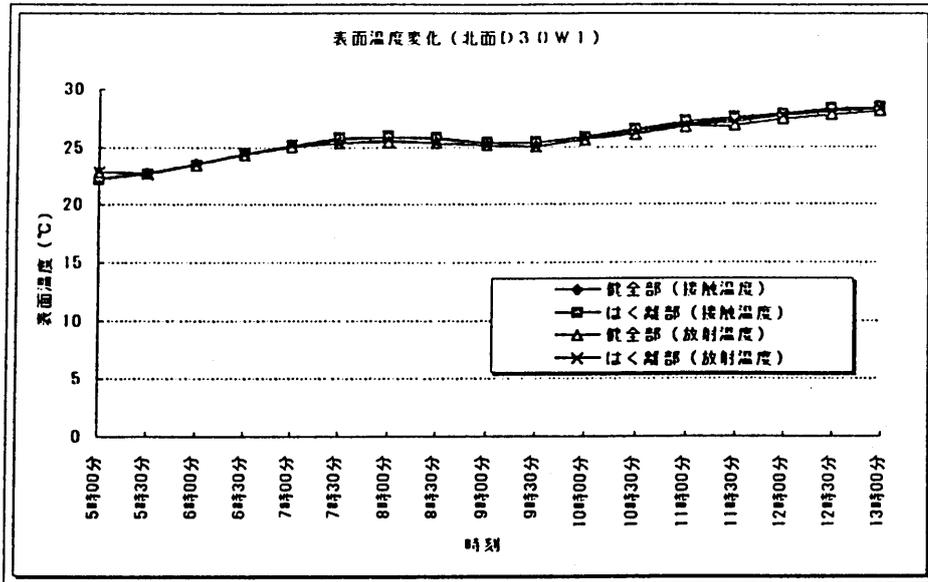


図-4.14 北面D30W1の表面温度変化

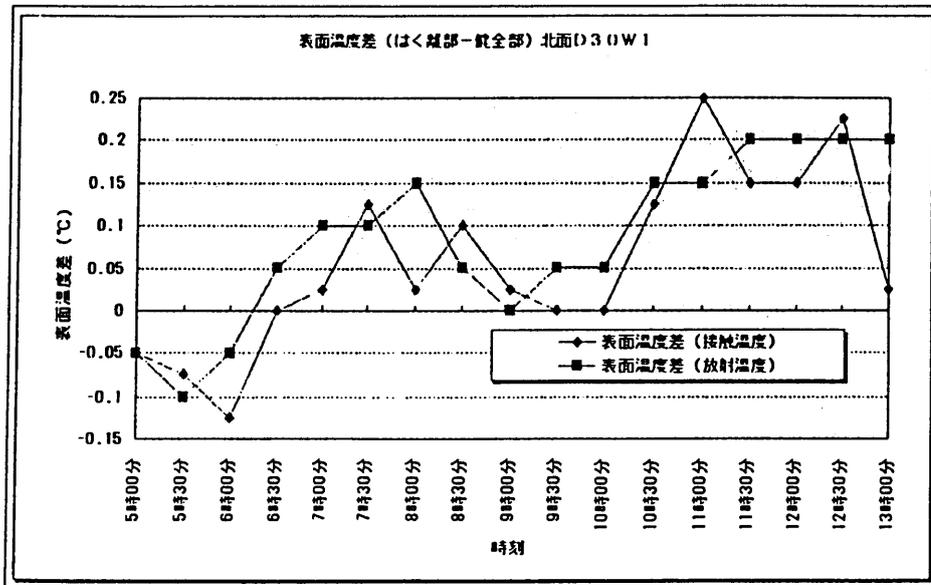


図-4.15 北面D30W1の表面温度差

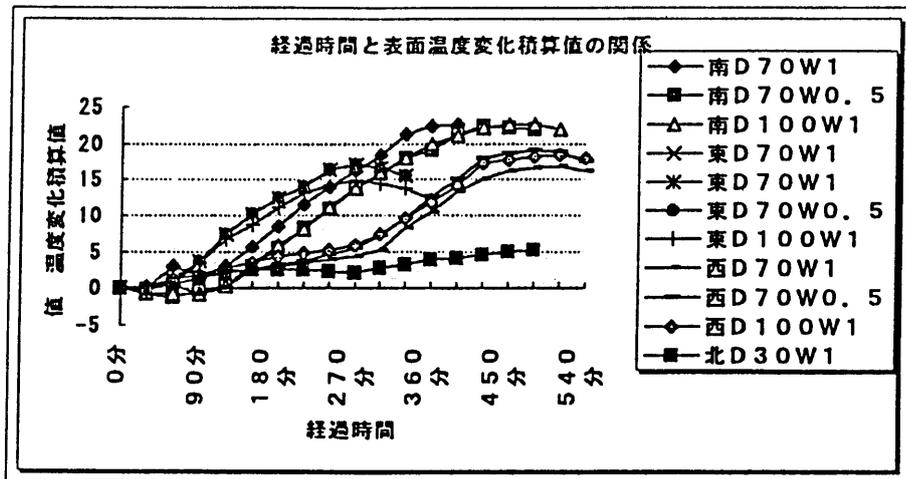


図-4.16 経過時間と表面温度の関係 (健全部)

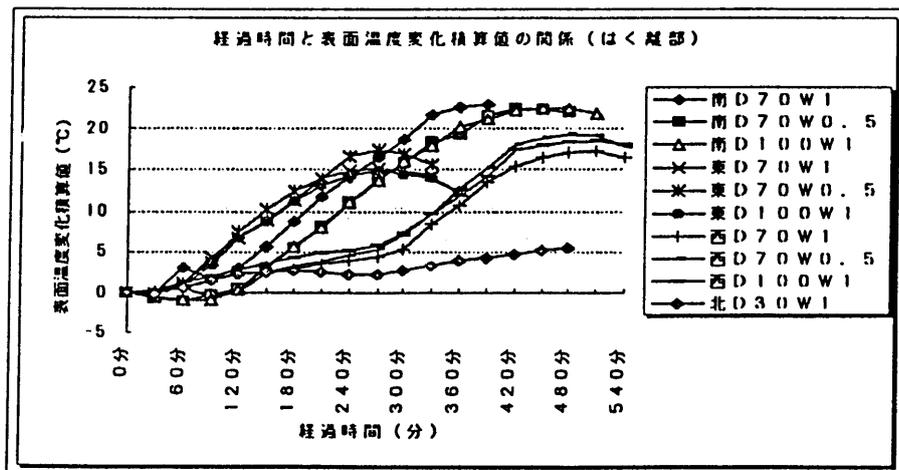


図-4.17 経過時間と表面温度の関係 (剥離部)

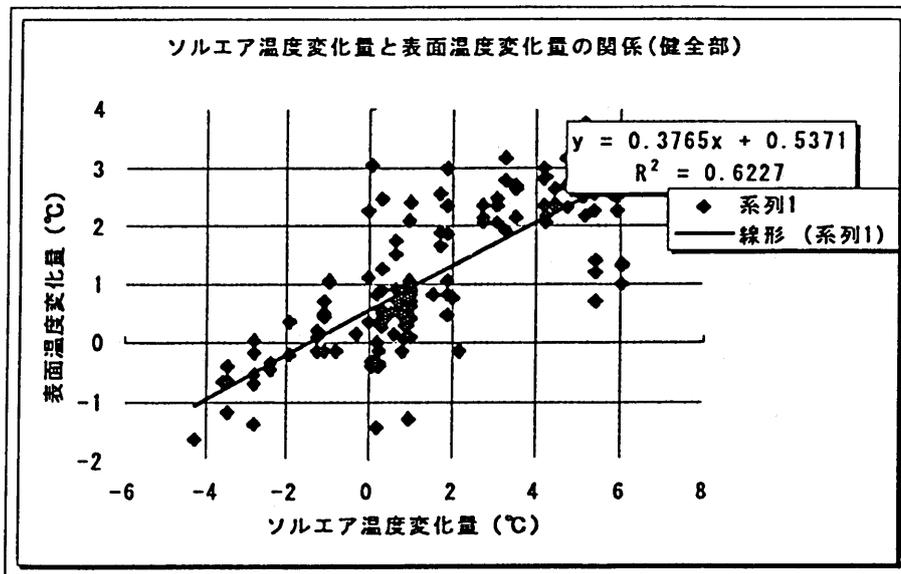


図-4.18 ソルエア気温変化量と表面温度変化量の関係 (健全部)

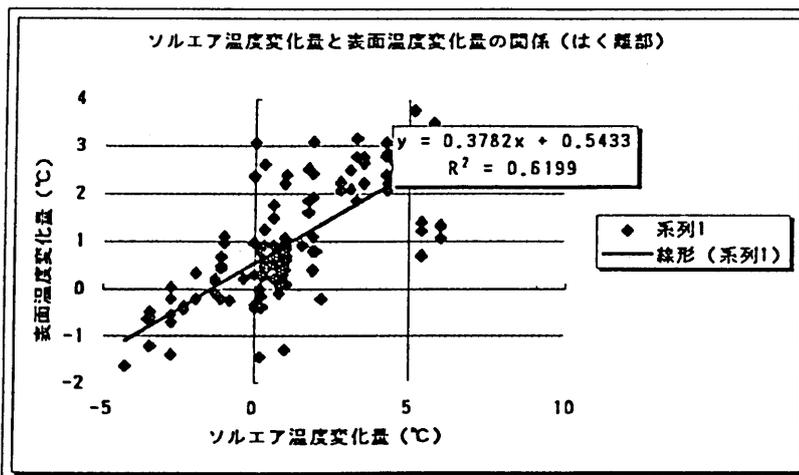


図-4.18 ソルエア気温変化量と表面温度変化量の関係 (剥離部)

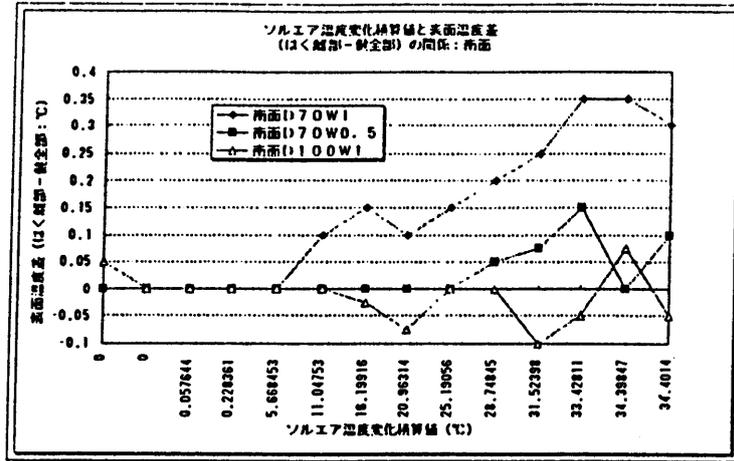


図-4.20 ソルエア温度変化積算値と表面温度差（剥離部－健全部）の関係（南面）

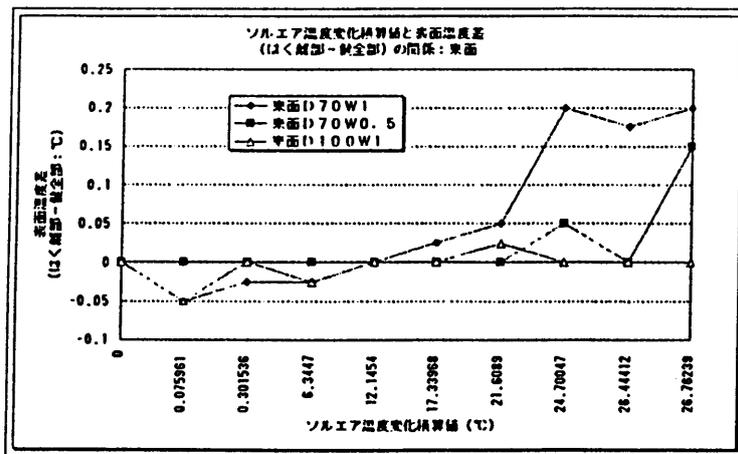


図-4.21 ソルエア温度変化積算値と表面温度差（剥離部－健全部）の関係（東面）

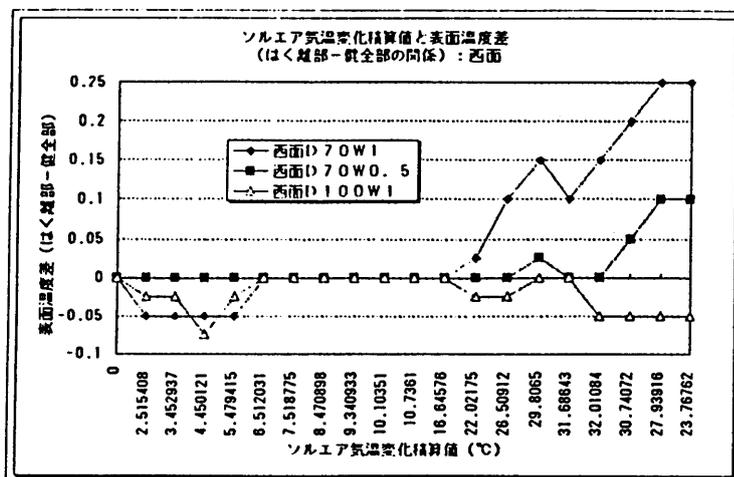


図-4.22 ソルエア温度変化積算値と表面温度差（剥離部－健全部）の関係（西面）

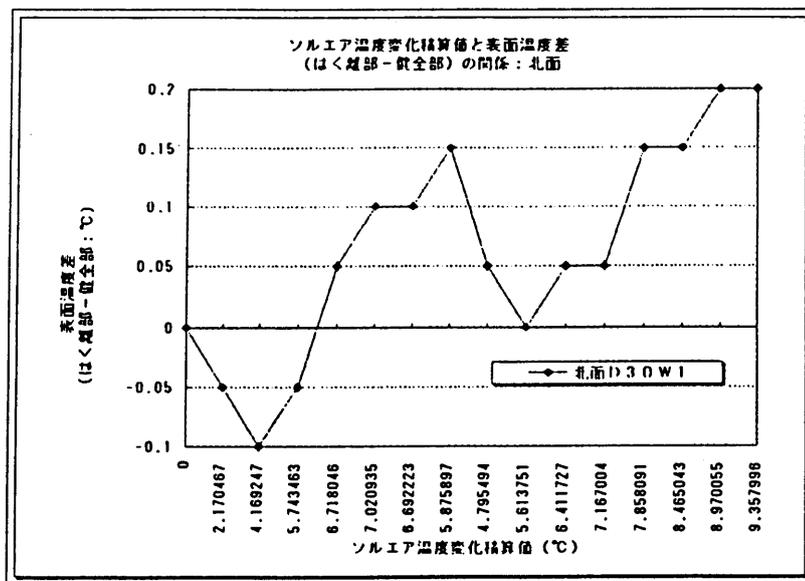


図-4.23 ソルエア温度変化積算値と表面温度差（剥離部－健全部）の関係（北面）



## 第5章 サーモグラフィ法による欠陥部検出に関する解析的研究

### 5.1 概説

本章では、前章に示した実験結果について検討するために、第1章と同様の有限要素法 (FEM) による解析を行った。

解析モデルは、図-5.1 (a) に示すように、前章で使用した試験体と同じ寸法、形状とし、解析では、図-5.1 (b) に示した $3 \times 3 \times 7$ の63個の要素分割で、対称性を考慮して解析モデルの4分の1の部分について計算を行った。解析に用いた材料定数の値を表-5.1に示す。なお、各要素の大きさはモルタル厚および欠陥部厚により任意に設定した。

境界条件としては、側面周辺部を断熱とし、内壁面を熱伝達の境界とした。外壁面も、入力値として日射による熱量を温度変化に換算したソルエア気温を用いたため、熱伝達のみ境界とした。また、壁中は欠陥部の要素も含めて全て熱伝導により伝熱されるものとした。一方、内壁面側の気温は、前章の実験と同様に想定した気温変化の最大値と最小値を平均した温度で一定とした。

なお、本解析では、最初の入力値で定常計算を行って各節点の初期温度を求めた後に非定常計算を行った。

## 5.2 実験結果と解析結果の比較および考察

### 5.2.1 解析結果の比較に用いた実験結果

解析結果との比較の対象とした数値は、図-5.1 (c) に示すように赤外線温度計の画像データから得られた表面温度とし、欠陥部は中央の1点、健全部は4点の平均値を用いた。なお、接触温度計による数値は、その検知可能な最小測定温度差が $0.5^{\circ}\text{C}$ と大きいことと、接触温度計で同時に複数の点の温度を測ることは不可能であり、測定の時間差による誤差が生じやすいことから、信頼性に欠けるため比較の対象とはしなかった。

### 5.2.2 南面の実験結果と解析結果の比較

#### (1) 表面温度の経時変化

図-5.2に入力値である実測のソルエア気温と、実験および解析によって得られた欠陥部と健全部の表面温度の経時変化を示す。図から明らかなように、実験と解析による温度曲線は似通った形状であるが、解析による温度が常に実験による温度よりも低い値となっている。この原因として、解析を行う際に設定した熱伝達率が実際よりも低い値であったと予想される。

#### (2) 欠陥部と健全部の表面温度差の経時変化

図-5.3に欠陥部と健全部の表面温度差の経時変化に関する実験結果と解析結果の比較を示す。図-5.3 (a) では、実測値の最小二乗法による回帰直線と解析結果は比較的同じ傾向にある。しかし、図-5.3 (b) および図-5.3 (c) では一致しない。この原因として、実験に用いた放射温度計の最小検知温度差が $0.1^{\circ}\text{C}$ に設定されており誤差が大きいことと、実験時に側面の断熱が不完全だったため、急激な温度上昇の際に側面からの熱の回り込みが起これ、外壁表面の温度分布が不均一となったことが考えられる。

### 5.2.3 東面の実験結果と解析結果の比較

#### (1) 表面温度の経時変化

図-5.4に入力値である実測のソルエア気温と、実験および解析によって得られた欠陥部と健全部の表面温度の経時変化を示す。傾向は、南面の場合と同様である。

## (2) 欠陥部と健全部の表面温度差の経時変化

図-5.5に欠陥部と健全部の表面温度差の経時変化に関する実験結果と解析結果の比較を示す。実測値の最小二乗法による回帰直線と解析結果は比較的同じ傾向にある。しかし、図-5.5 (b) および (c) においては、実測値の最小二乗法による回帰直線と解析結果の差は概ね  $0.1^{\circ}\text{C}$  の範囲に収まっており、また、実験に用いた放射温度計の最小検知温度差が  $0.1^{\circ}\text{C}$  に設定されていたことから、結果の信頼性は低い。

### 5.2.4 西面の実験結果と解析結果の比較

#### (1) 表面温度の経時変化

図-5.6に入力値である実測のソルエア気温と、実験および解析によって得られた欠陥部と健全部の表面温度の経時変化を示す。

#### (2) 欠陥部と健全部の表面温度差の経時変化

図-5.7に欠陥部と健全部の表面温度差の経時変化に関する実験結果と解析結果の比較を示す。傾向は、他の例と同様である。

### 5.2.5 北面の実験結果と解析結果の比較

#### (1) 表面温度の経時変化

図-5.8に入力値である実測のソルエア気温と、実験および解析によって得られた欠陥部と健全部の表面温度の経時変化を示す。図から明らかなように、ソルエア気温と実験および解析による温度曲線は、解析による温度が実験による温度よりも低い値となる傾向はあるもののほぼ一致している。この原因として、ソルエア気温の変化が少なく、気温の上昇と表面温度の上昇に時間的なずれが生じにくいこと、実験の際の断熱面からの熱の回り込みが少ないことが考えられる。

#### (2) 欠陥部と健全部の表面温度差の経時変化

図-5.9に欠陥部と健全部の表面温度差の経時変化に関する実験結果と解析結果の比較を示す。図から明らかなように、実験による測定値と解析による曲線は比較的一致している。サーモグラフィ法では不利といわれている北面の測定も条件次第で可能であるといえる。

## 5.2.6 表面温度差

南面、東面、西面それぞれの入力値である実測のソルエア気温が最大になったときの欠陥部と健全部の表面温度差の解析値と、欠陥部と健全部の最大の表面温度差の解析値をその時間とともに図-5.10に示す。図から明らかなように、欠陥部が深くなるほど、また欠陥部が薄くなるほど気温が最大となってから温度差が最大となるまでに時間を要する傾向にあり、かつ剥離の検知が難しくなる。また、赤外線温度計の最小検知温度差が $0.1^{\circ}\text{C}$ である場合、モルタル厚が $100\text{mm}$ 以上になると検知できない。

なお、北面は、図5.10 (d) に示すように、欠陥部と健全部の表面温度差が最大となるときとソルエア気温が最大となる時間はほぼ一致している。この原因として、北面は温度変化が少なく気温の上昇と表面温度の上昇に時間的なずれが生じにくいことが考えられる。

### 5.3 まとめ

本章で得られた知見を以下に示す。

- 1) 有限要素法を用いた熱伝導解析により、ソルエア気温の変動による欠陥部を有する試験体の表面温度の時刻変動をシミュレートすることができる。解析結果は実験結果と同様の傾向を示すが、両者の値を一致させるには材料定数を同定する必要がある。
- 2) 解析結果によれば、欠陥部が深くなるほど、また欠陥部が薄くなるほど、気温が最大となってから欠陥部と健全部の温度差が最大となるまでに時間を要し、かつ剥離の検知が難しくなる。
- 3) 気温の上昇が急激になるほど、実験の際に側面からの熱の回り込みが起こりやすいが、解析に用いた境界条件ではそのような現象は起こらないため、両者の間に大きな差が生じる。

表-5.1 材料定数

材料	熱伝導係数 (W/mK)	比熱 (J/kgK)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	熱伝達係数 (W/m <sup>2</sup> K)	日射吸収率
モルタル	1.2	0.19	2000	8	0.75
コンクリート	1.4	0.21	2200	8	0.75
空気層	0.019	0.24	1.3	0	0

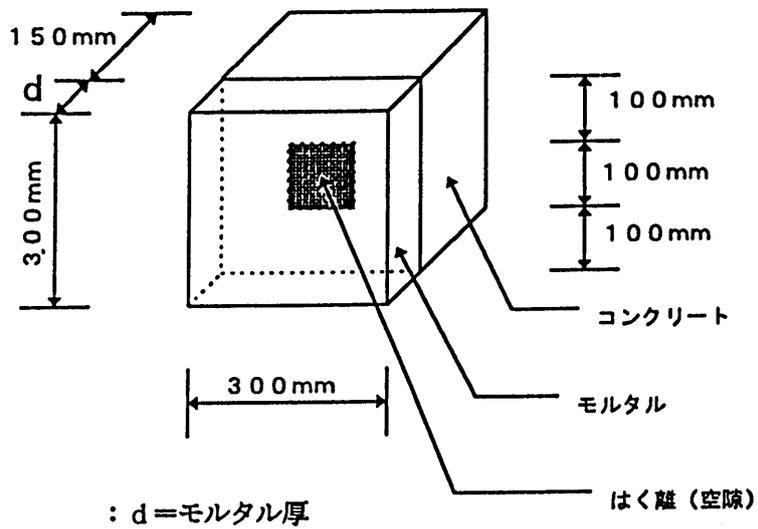


図-5.1(a) 解析モデル

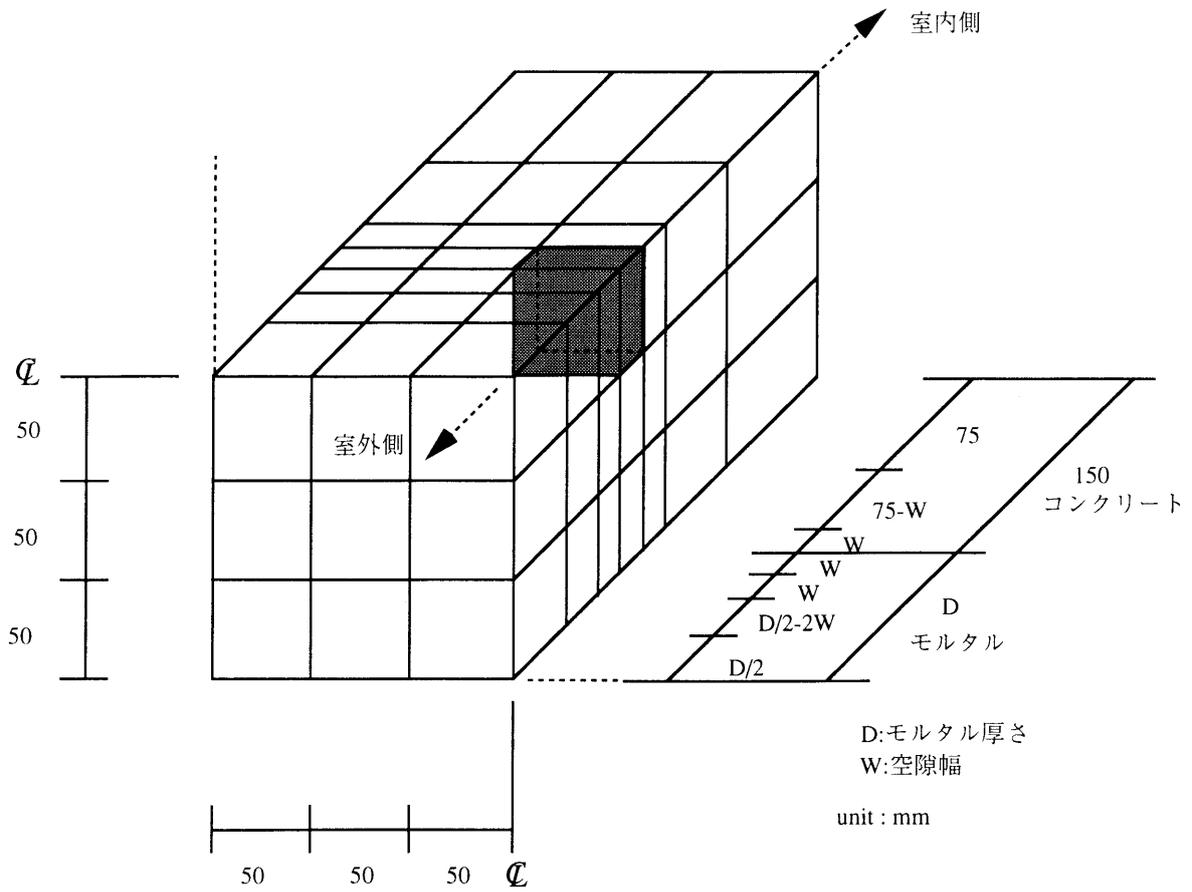


図-5.1(b) 要素分割

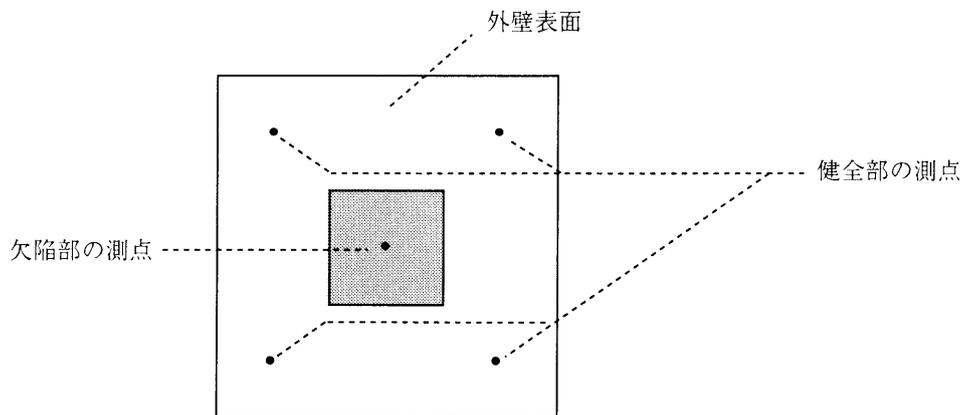
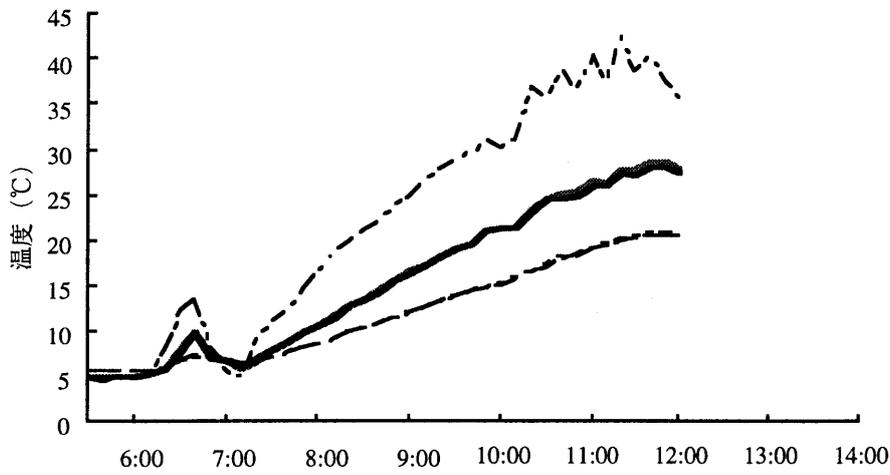
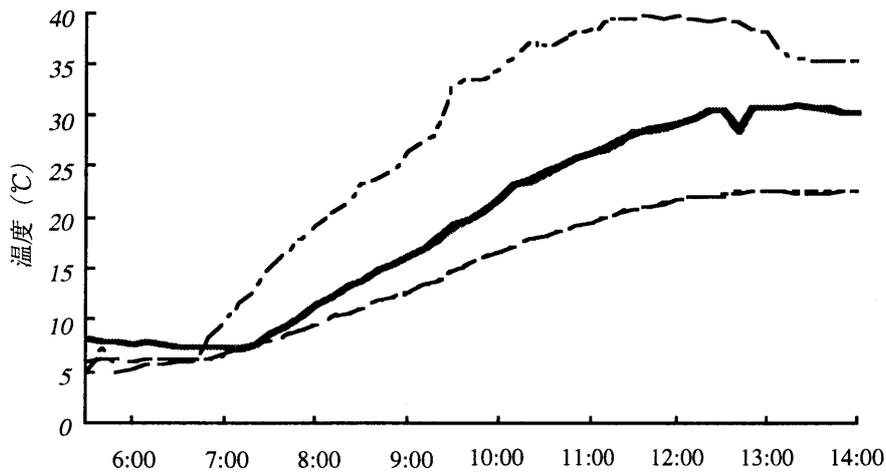


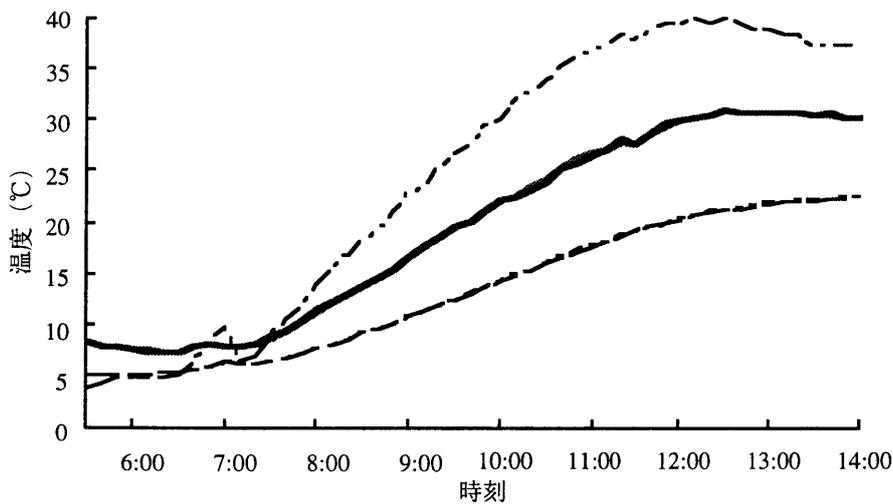
図-5.1(c) 表面温度の測点



(a)D70W1



(b)D100W1



(c)D70W05

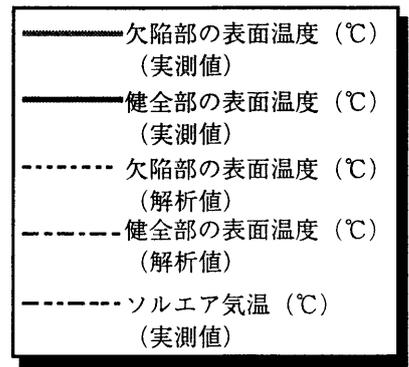
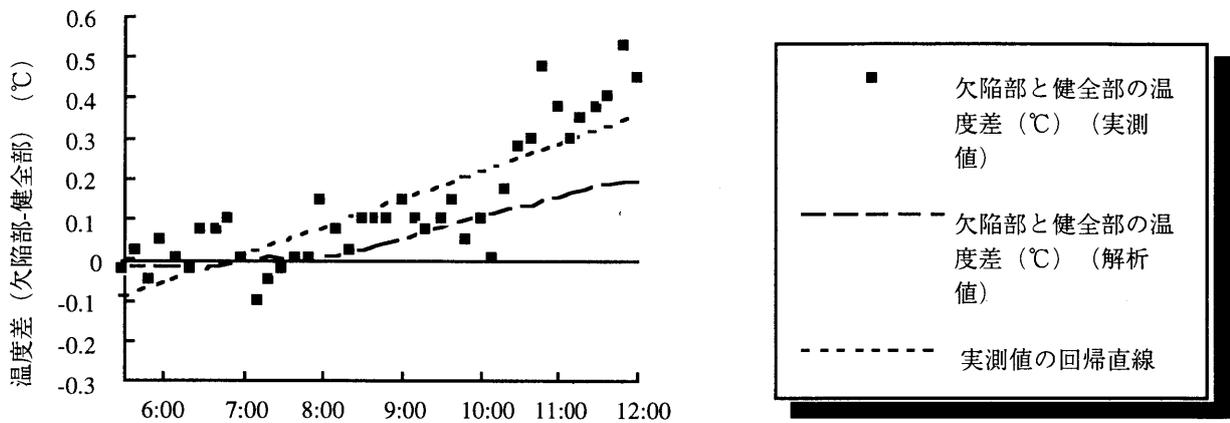
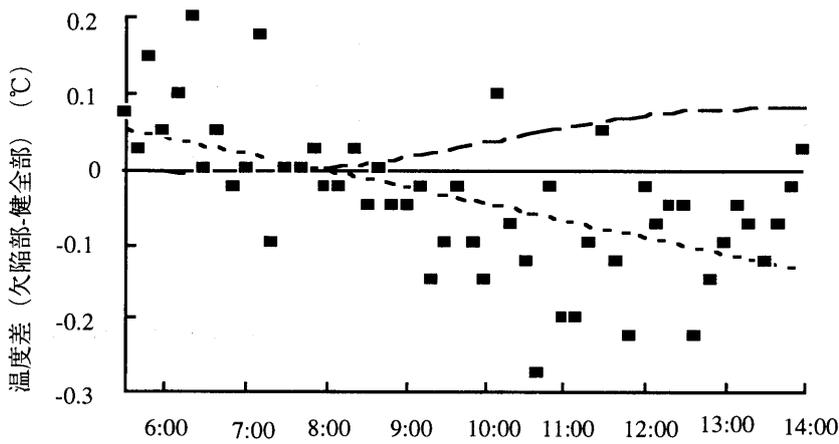


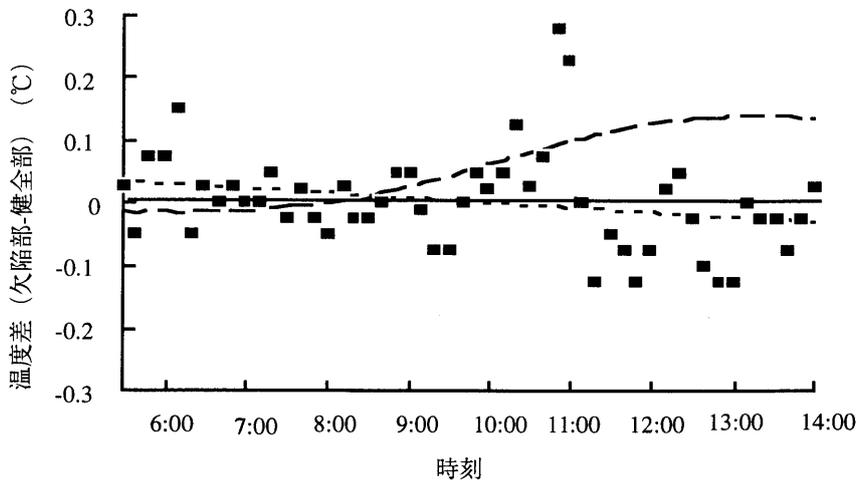
図-5.2 南面の表面温度の経時変化



(a)D70W1

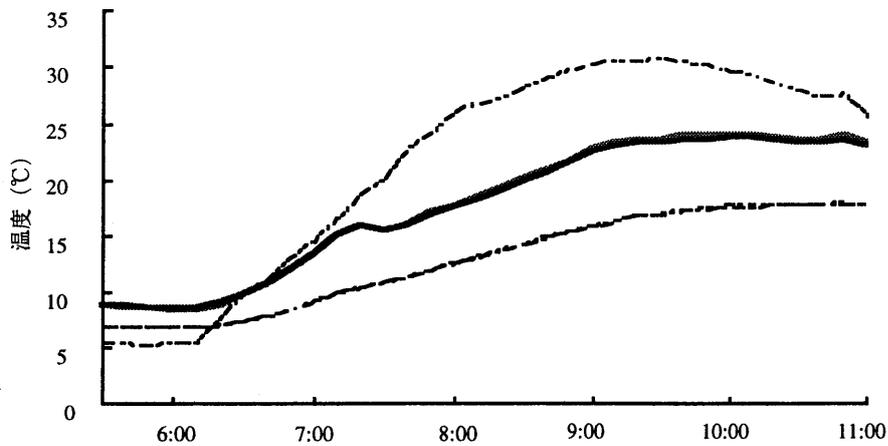


(b)D100W1

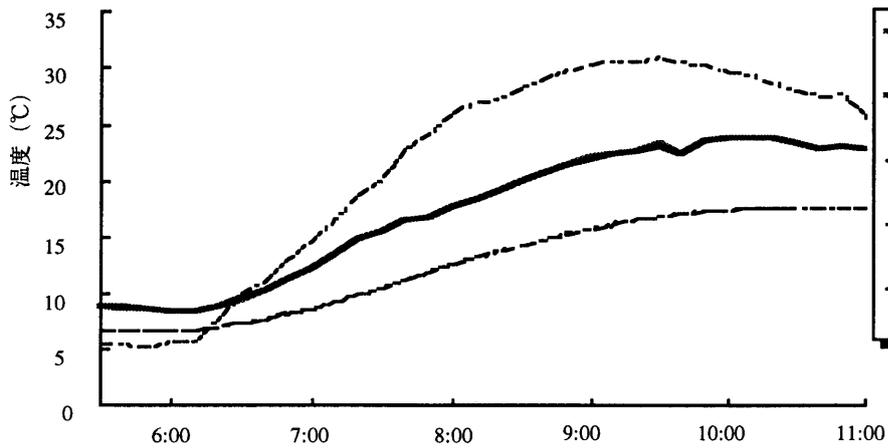


(c)D70W05

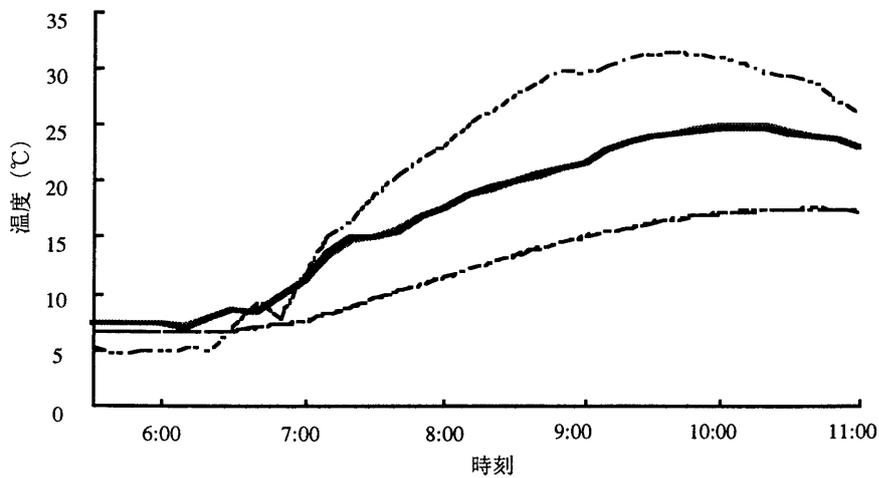
図-5.3 南面の欠陥部と健全部の温度差



(a)D70W1

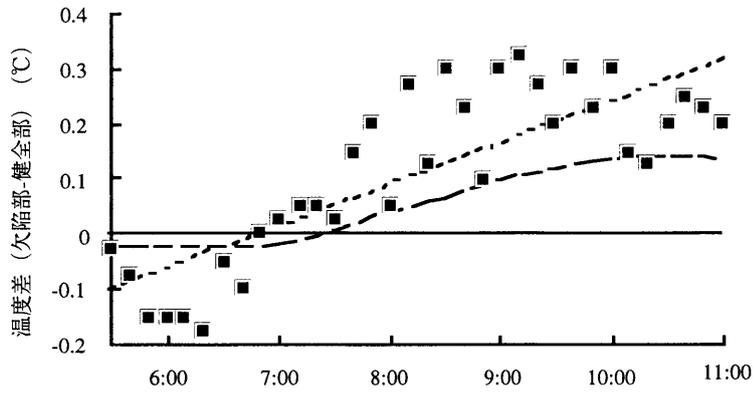


(b)D100W1

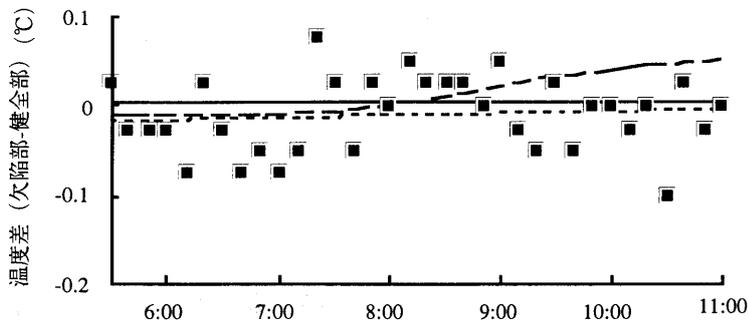
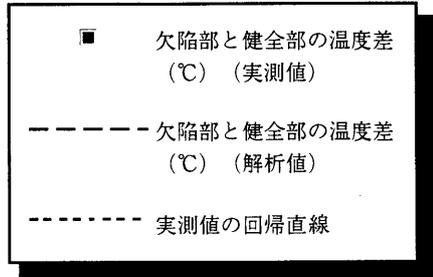


(c)D70W05

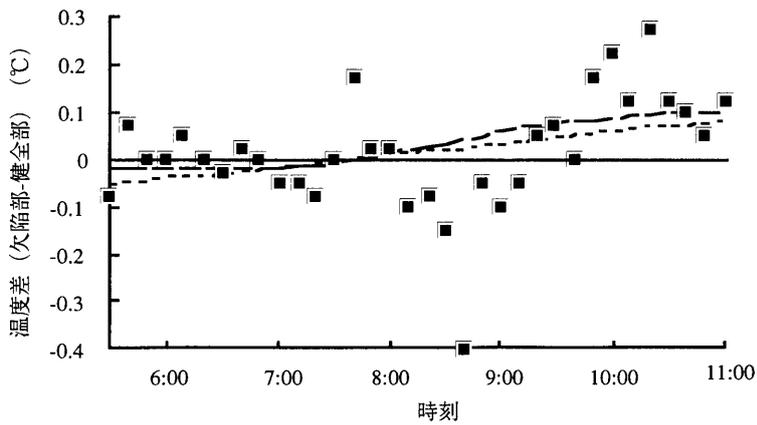
図-5.4 東面の表面温度の経時変化



(a)D70W1

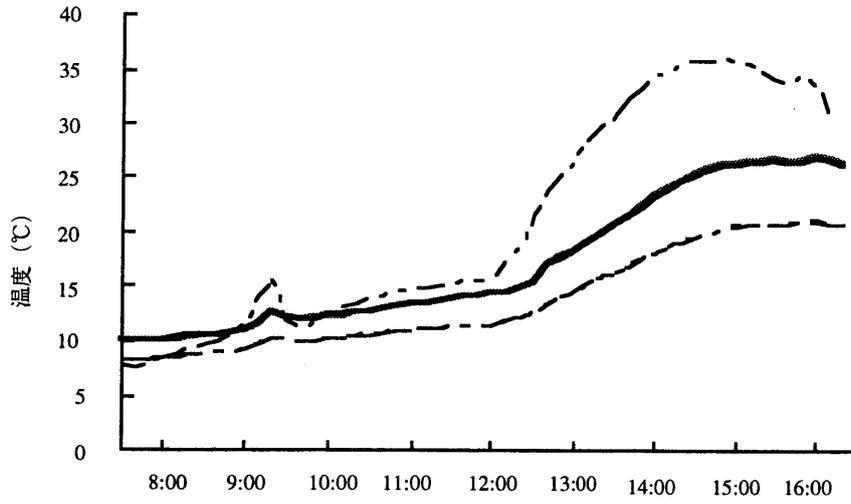


(b)D100W1

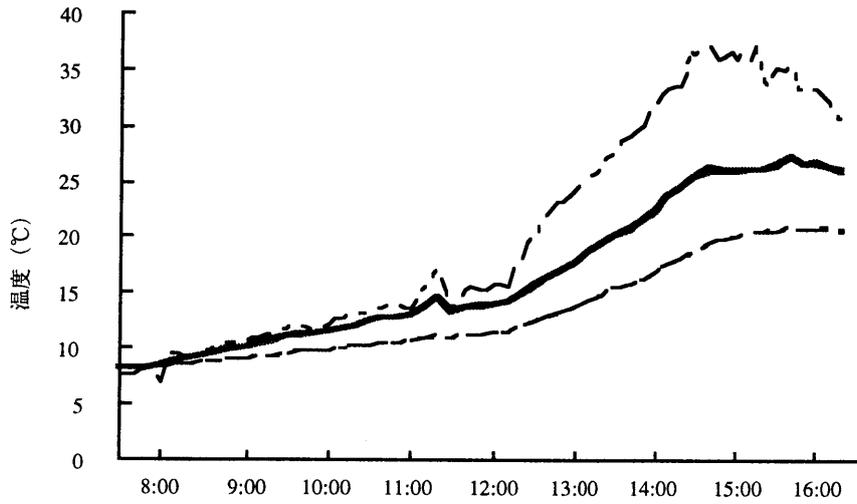


(c)D70W05

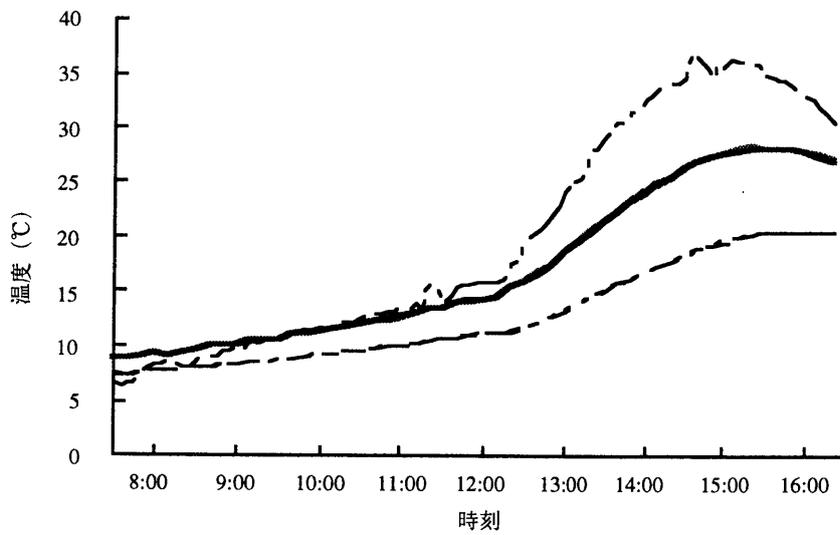
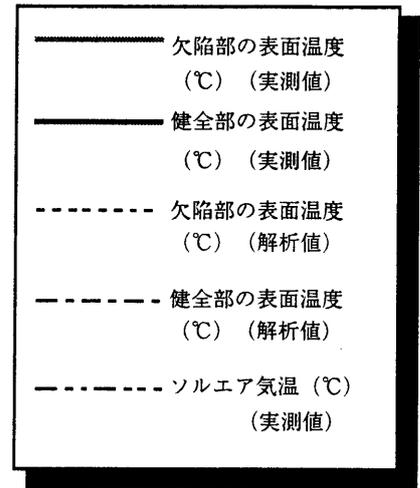
図-5.5 東面の欠陥部と健全部の温度差



(a)D70W1

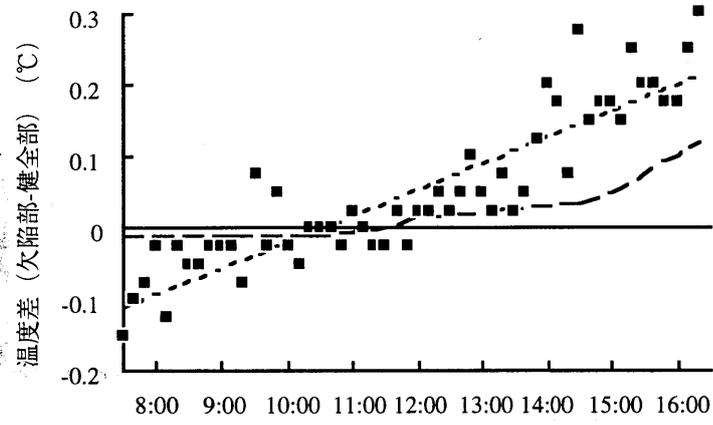


(b)D100W1

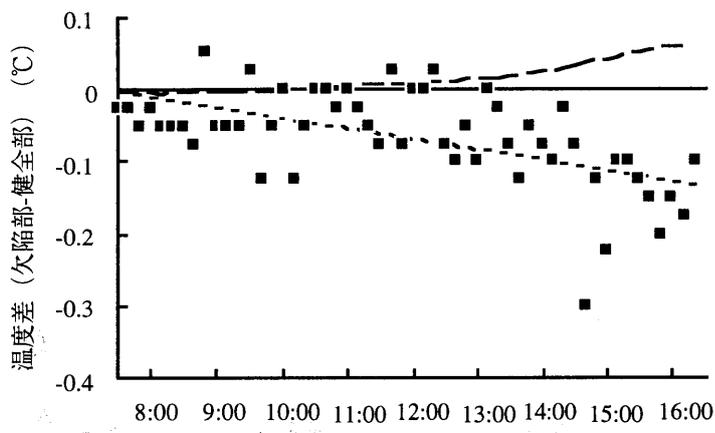


(c)D70W05

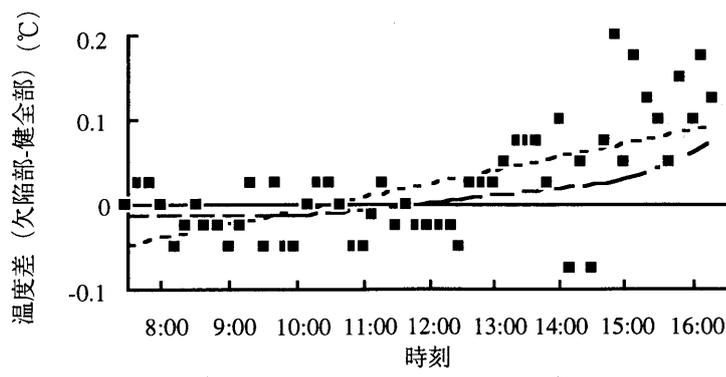
図-5.6 西面の表面温度の経時変化



(a)D70W1



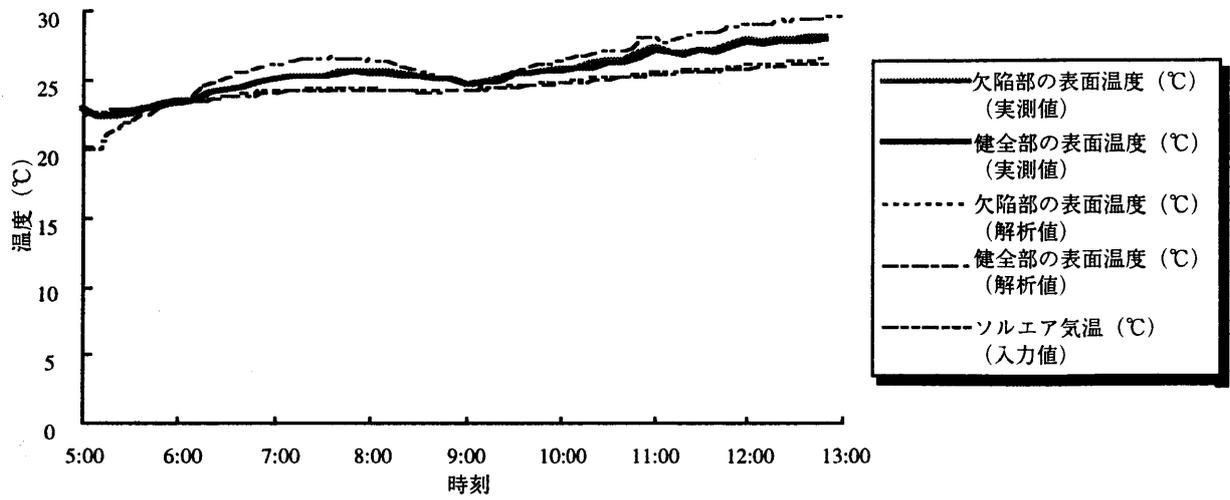
(b)D100W1



(c)D70W05

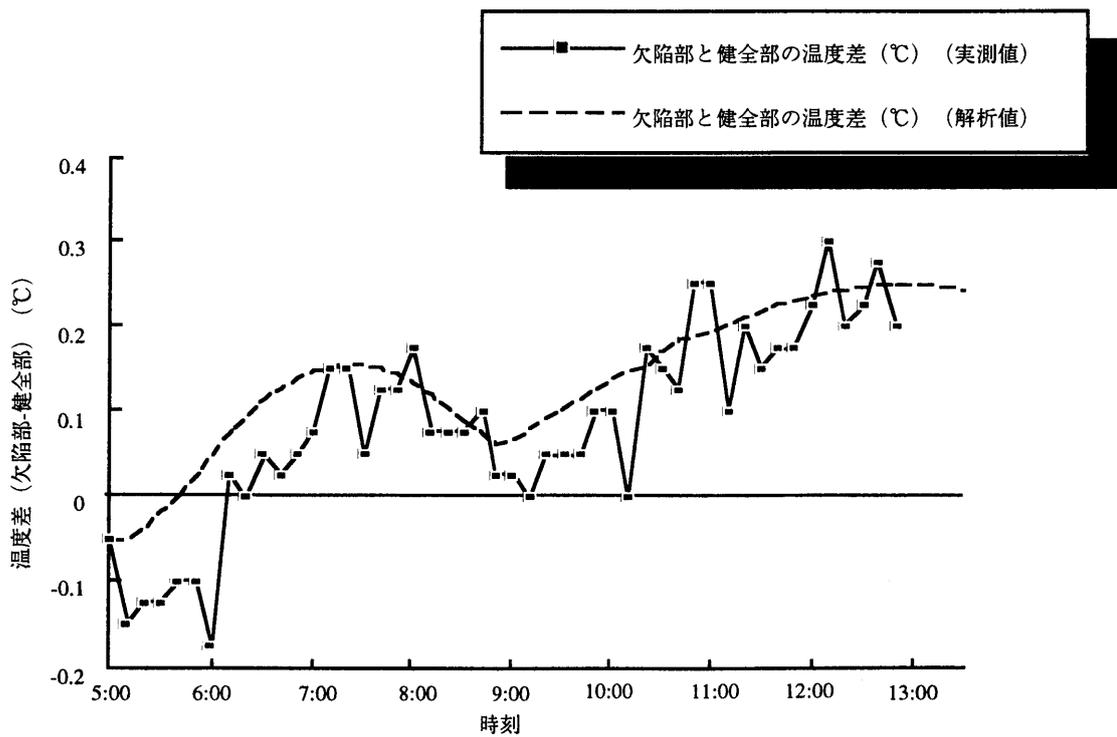
■	欠陥部と健全部の温度差 (°C) (実測値)
---	欠陥部と健全部の温度差 (°C) (解析値)
- - -	実測値の回帰直線

図-5.7 西面の欠陥部と健全部の表面温度差



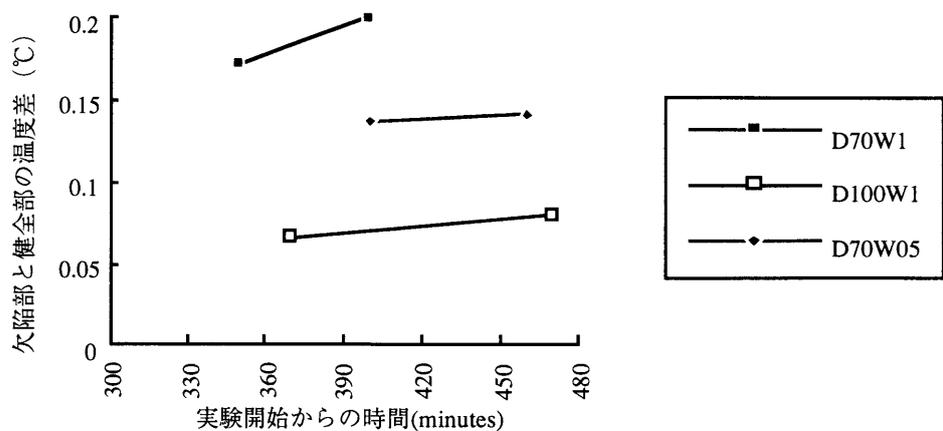
D30W1

図-5.8 北面の表面温度の経時変化

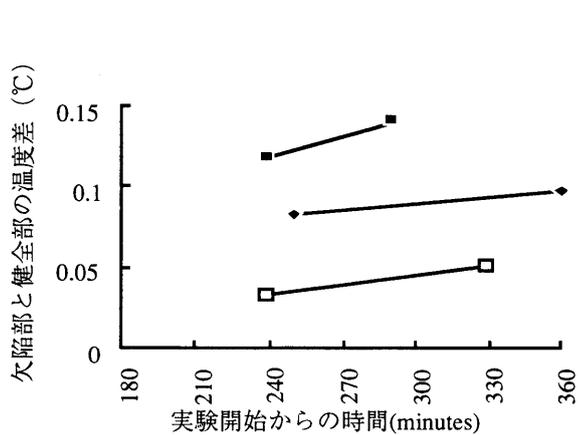


D30W1

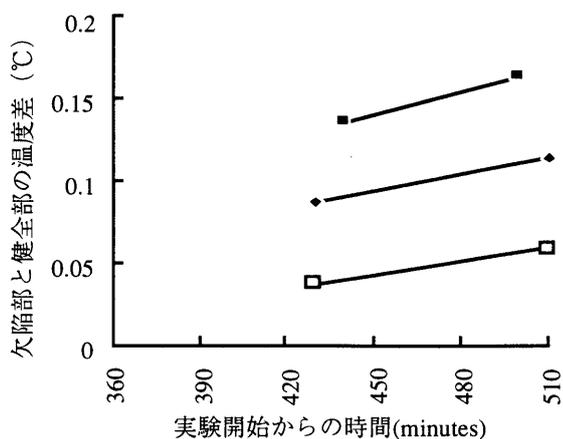
図-5.9 北面の欠陥部と健全部の温度差



(a)南面

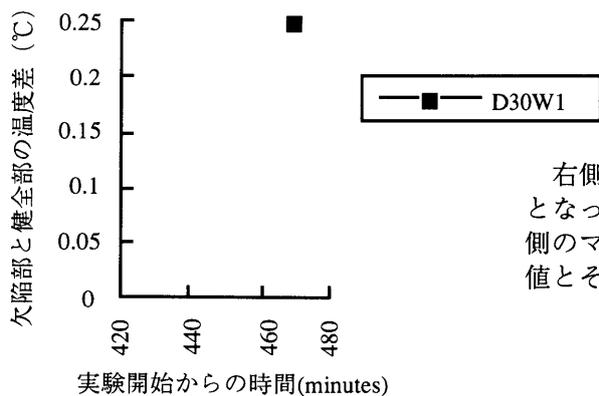


(b)東面



(c)西面

各図の左側のマーカーは、入力値であるソルエア気温が最大となったときの欠陥部と健全部の温度差の解析値を、右側のマーカーは、欠陥部と健全部の最大の温度差の解析値を表す。



(d)北面

右側のマーカーは、入力値であるソルエア気温が最大となったときの欠陥部と健全部の温度差の解析値を、左側のマーカーは、欠陥部と健全部の最大の温度差の解析値とその時間を表すが、ほぼ同じ値になっている。

図-5.10