

# 論文 パッシブサーモグラフィー法による降雨後のコンクリート診断への有効性に関する研究

金光 寿一\*1・柳内 睦人\*2・江藤 亮\*3

**要旨：**サーモグラフィー法から連続したコンクリートの内部診断を行う場合には、太陽光を利用したパッシブ法が効率的である。しかし、太陽エネルギーは季節や天候によって日射量が異なり、得られた熱画像が最適な診断結果であるのかという疑問が残る。そこで、本研究では実験及び熱伝導解析から有効な診断結果が得られる気象条件や撮影時間を明らかにした。その結果、日射積算量とコンクリートの温度上昇には相関性が認められ、特に降雨後に快晴となる気象条件の場合が内部変状の検出に適していることが分かった。

**キーワード：**サーモグラフィー法, コンクリート診断, 日射量, 降雨, 熱伝導解析

## 1. はじめに

サーモグラフィー法を適用したコンクリート内部の診断手法では、日射量及び外気温の変動を利用したパッシブ法や各種人為的な加熱及び冷却を利用するアクティブ法から温度計測され欠陥部の検出が試みられている<sup>1),2)</sup>。特に、パッシブサーモグラフィー法は加熱機器の必要もなく簡便で効率性も高く均一な熱量が供給されることから大規模構造物の診断に適している。ところが、日射面以外では内部欠陥の検出が困難となるように、入射する太陽エネルギー量は季節、天候、時間帯、方位で複雑に変化し、熱画像からの検出精度に影響を及ぼすことが考えられる。筆者らは、既に快晴日の場合には方位の異なるコンクリート壁面に季節によってどの程度の日射量が供給され、欠陥部にはどの程度の温度差が得られるのかを熱伝導解析から明らかにしている<sup>3)</sup>。しかし、天候は全日快晴ばかりではなく、日射量は雲量によって日射波形が時々刻々変化するものと思われ、また、降雨後にはコンクリートへの吸水が温度上昇量や内部診断に影響を及ぼすことが予測される。

そこで、本研究では横浜市港北区役所から入手した日射量とコンクリート温度のデータから両者の関係を整理し、その日射波形の特徴から最大温度となる時刻の相違を明らかにした。また、降雨後の診断への影響についてはハログランプによる室内実験及び屋外実験から検討した。さらに、熱伝導解析では計測されたコンクリート温度との比較を行い、降雨後の温度変化の再現性について検討した。

## 2. 日射量とコンクリート温度

横浜市港北区役所屋上ではヒートアイランド現象の緩和や省エネ対策に繋がる事業として日射量、雨量、風速、気温とともに緑化内部温度及びコンクリート表面温度(水平面)が時系列(1分間隔)で計測されている。

## 2.1 日射量とコンクリートの温度上昇との関係

図-1は2006年8月1日から31日までのコンクリート表面の最大温度上昇とその最大温度までの日射積算量との関係である。なお、この最大温度上昇は最大表面温度から日の出時刻の温度を減算したものである。また、図-2にはその最大温度までの日射積算量と最大温度上昇との相関関係を示す。

その結果、図-1及び図-2に示すようにコンクリートの最大温度上昇量は日射積算量とほぼ比例関係にあり、日射積算量から最大温度上昇量が推定可能であると思われるが、図-2では17日、31日、14日及び10日が特異な温度上昇を示している。これらの特異な温度上昇を示した

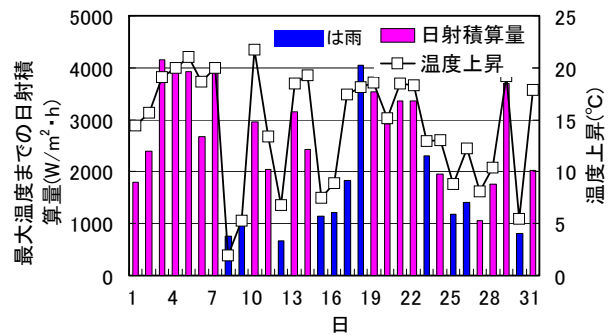


図-1 コンクリート温度の上昇と日射積算量

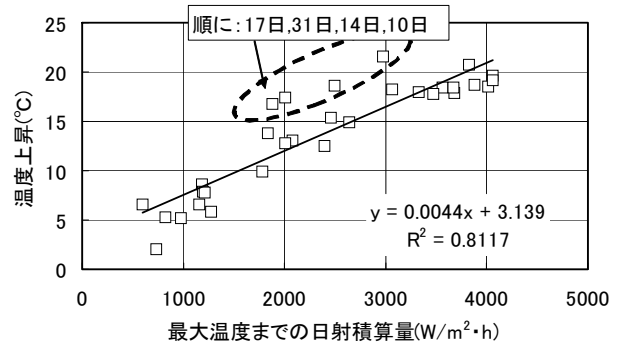


図-2 温度上昇と日射積算量の関係

\*1 中央工学校 土木測量科講師 博(工) (正会員)

\*2 日本大学 生産工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

\*3 日本大学 生産工学部土木工学科 (正会員)

気象条件は、前日あるいは前々日が雨天となっている。その降雨量では、9日は103mm/日の大雨で、14日の前々日となる12日は20mm/日、16日は14mm/日、また17日は18.5mm/日で朝の8:00頃まで降っている。また、30日は時刻15:40~16:00まで0.5mm/日の降雨量であった。特に、10日は日射積算量が少ない割には8月で最も温度上昇量が大きくなっており、降雨後に晴天の場合には診断への有効性が認められる。

図-3にはこれらの日の全天日射量及び比較するために快晴日(気象庁提供の雲量から判断)である5日の全天日射量を示す。また、図-4には日射積算量に対する温度上昇の変化を示す。比較した5日の最大温度上昇量は2番目に大きい21°Cで、最大温度までの日射積算量は $3,927\text{W/m}^2\cdot\text{h}$ である。日射波形は、5日を除けば激しく変動しているが、図-4の両者の関係から $2,000\text{W/m}^2\cdot\text{h}$ までは同様の温度上昇を示している。一方、10日の温度変化では、 $2,000\text{W/m}^2\cdot\text{h}$ 以降(時刻は10:55)からの温度上昇の勾配に違いが現れており、日射量に乱れがなければさらに大きな温度上昇が期待できる。

## 2.2 日射量と最大温度時刻の関係

図-5は最大温度までの日射積算量と最大温度に達した時刻(以下、最大温度時刻と記す)を示したものである。図-6には両者の相関を示す。この両者の関係は図中に示すように日射積算量を $3,000\text{W/m}^2\cdot\text{h}$ 以上、 $2,000\sim 3,000\text{W/m}^2\cdot\text{h}$ 及び $2,000\text{W/m}^2\cdot\text{h}$ 未満に区分して検討した。

### (1) 日射積算量が $3,000\text{W/m}^2\cdot\text{h}$ 以上の場合

日射積算量が $3,000\text{W/m}^2\cdot\text{h}$ 以上の最大温度時刻は、13:30~14:26の範囲で平均は13:55分、また温度上昇量は $18.3^\circ\text{C}\sim 21.0^\circ\text{C}$ の範囲で平均は $19.13^\circ\text{C}$ の上昇であった。このように、図-3に示す5日のような乱れのない日射波形であれば精度良く日射量から時々刻々変化する温度上昇量及び最大温度時刻を推定することができる。

### (2) 日射積算量が $2,000\sim 3,000\text{W/m}^2\cdot\text{h}$ の場合

$2,000\sim 3,000\text{W/m}^2\cdot\text{h}$ の範囲では、日射波形に乱れが生じ、最大温度時刻及び温度上昇にばらつきが現れる。図中の特異な温度上昇日を除く日の最大温度時刻は12:11~14:41の範囲で平均が13:02、その温度上昇量は $12.9^\circ\text{C}\sim 18.7^\circ\text{C}$ の範囲で平均は $15.16^\circ\text{C}$ であった。特異な温度上昇となった31日、14日、10日の最大温度時刻の平均は11:51で、13:02と比較すると1時間程度、また日射積算量 $3,000\text{W/m}^2\cdot\text{h}$ 以上の13:55と比較すると2時間程度早くなっている。一方、図-7は最大温度時刻が11:54になった14日と14:41になった23日の日射量である。なお、図中には比較のためにBouguer式、Berlage式を用いて<sup>4)</sup>、実測値の最大日射量に合わせて算出した日射量を示す。また、図-8には図-7の日射量から算出した日射積算量と温度上昇との関係を示す。図-7に示す14日と23日の最大日

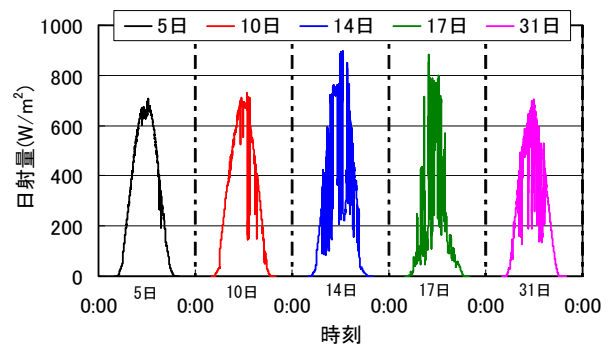


図-3 特異な温度上昇日の日射量の比較

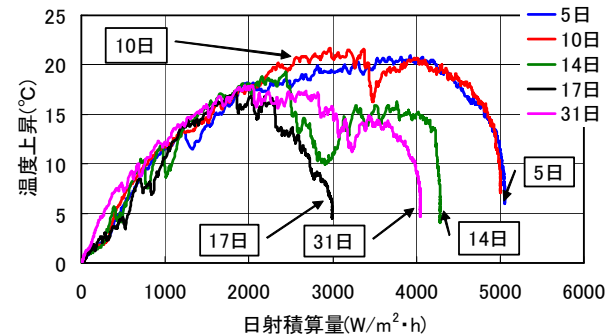


図-4 特異日の温度上昇と日射積算量

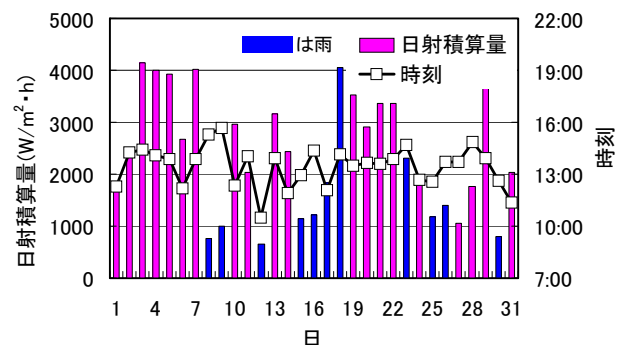


図-5 日射積算量と最大温度時刻

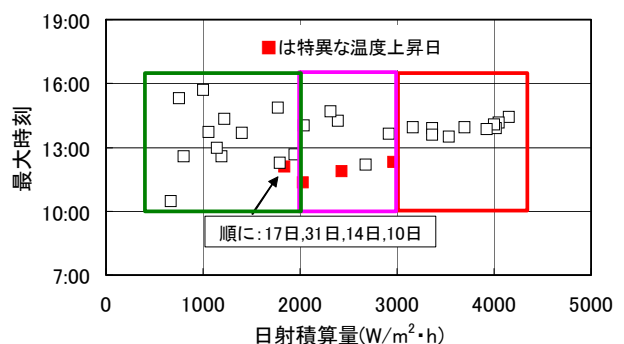


図-6 日射積算量と最大温度時刻の関係

射量や日射波形の相違は、雲量の違いによって日射が遮られたものと推察される。14日の午前中はある程度の日射を受けているが、23日は逆に日射が厚い雲に遮られていたものと思われる。図-8の日射積算量と温度上昇との関係では、23日の日射積算量は増加が緩やかで、13時以降の乱れの少ない日射波形から時刻14:41に最大温度を迎えている。日射波形からも快晴に近いなめらかな日射を受

ける場合には時刻 14:00 頃に、午前中が晴れに近く午後曇りには時刻 12:00 頃に、また、午前中曇りに近く午後晴れの場合には時刻 14:00 を大きく超える傾向がみられる。

### (3) 日射積算量が 2,000W/m<sup>2</sup>・h 未満の場合

日射積算量が 2,000W/m<sup>2</sup>・h 未満では、17 日の特異な温度上昇量は 17.4℃(1,848W/m<sup>2</sup>・h)、最大温度時刻は 12:05 であるが、それ以外の平均時刻は 13:20、平均温度上昇量が 8.57℃と極端に減少し診断に適した天候ではない。

## 3. コンクリートの含水実験による温度上昇

同日射積算量で比較すると温度上昇量が 5℃以上も大きい 10 日、14 日、17 日及び 31 日は、はたして降雨の影響であったのか室内及び屋外実験から検討した(図-2 参照)。

### 3.1 室内基礎実験

実験は気温、風速の変化などの影響を削除するために、まず室内での実験を行った。実験に供した試験体は、幅 300×300×高さ 210mm で、内部欠陥として幅 100×100×厚み 5mm の空洞を深さ 20, 30 及び 40mm の位置に設けたものである。表-1 に実験に供した試験体の種類を、また図-9 には試験体の断面を示す。コンクリートの配合(普通, 24, 8, 20, N)は、普通ポルトランドセメントを使用し、呼び強度 24N/mm<sup>2</sup>、スランプ 8cm、粗骨材の最大寸法は 20mm で W/C=57%, s/a=45.4%である。内部欠陥は予め発泡スチロールを所定の位置に埋め込み、硬化後に穴からアセトンを通し込み溶かして作製した。なお、試験体 No. 4 は欠陥のない標準試験体である。降雨を想定したコンクリートへの吸水は、打設後 28 日間水中養生し、その後 1 ヶ月間室内で気中養生を続けた後に、3 日間を測定面のみ水に浸した。ハロゲンランプ(800W)による加熱は、距離 50cm から 120 分間行い、含水率の測定はコンクリートモルタル接触型水分計〔(HI-520):高周波容量式、測定範囲 0~12%〕にて行った。赤外線カメラによる温度測定〔2 次元非冷却マイクロボロメータ型、波長領域 8.0~14.0 μm、感度 0.10℃(at30℃)〕は、測定距離 60cm の位置から時系列の熱画像を得ることとした(写真-1 参照)。なお、日射量の強弱を想定した加熱は、小さめのハロゲンランプを使用して中心を欠陥部に合わせて供給される熱量を調整した。実験は、試験体を水槽から取り出した直後に表面の水滴を拭き取り、その 15 分後から加熱実験を開始した。含水試験体と比較する通常の試験体(乾燥試験体と称する)は、ハロゲンランプでの実験後、7 日間室内に放置して同様に実験を行った。

#### (1) 室内実験の結果

写真-2 は含水試験体の 100 分経過後の熱画像である。小さめのハロゲンランプを欠陥部中心に合わせているために試験体端部に向かうほど温度上昇量が小さくなる温度分布状態となっている。含水試験体と乾燥試験体の温度

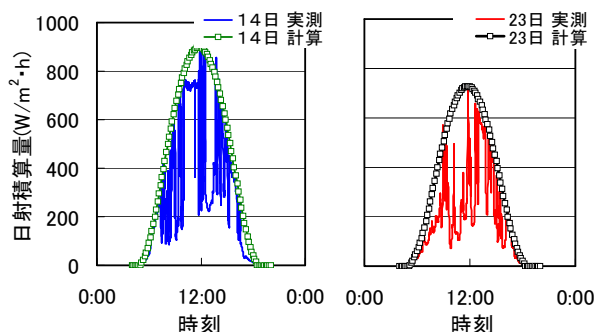


図-7 日射量の相違(2,000~3,000W/m<sup>2</sup>・h の場合)

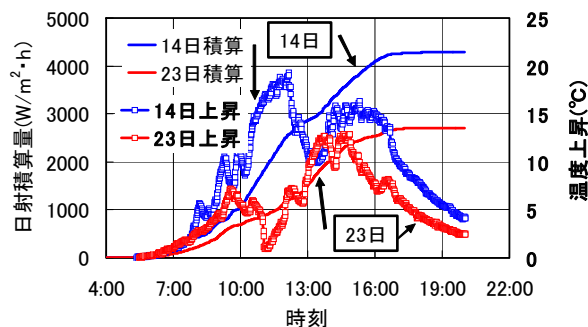


図-8 日射積算量と温度上昇の相違

表-1 試験体一覧

試験体 No.	欠陥の大きさ (mm)	深さ (mm)
1	100×100×5	20
2		30
3		40
4	-	-

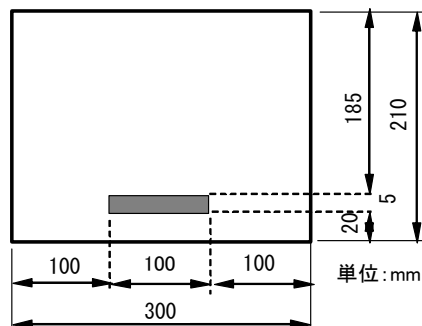


図-9 試験体(No. 1)



写真-1 実験状況

上昇は、写真-2 の試験体 No. 1 に示すように試験体中央の左端から 50mm、100mm 及び 150mm の位置(○印)の温度と比較した。図-10 には接触型水分計で測定した含水率の

変化を示す。この含水率は深さ 40mm までの平均値である。その含水率は各試験体を同条件で養生しているが、加熱開始前が 3 箇所の平均で 5.2%, 120 分経過後が 4.8%と 0.4%の減少であった。なお、含水実験後 7 日目に行った乾燥試験体の実験開始前の含水率の平均は 4.3%であった。表-2 に左端から 50mm の位置の温度上昇を示す。

その結果、温度上昇は 120 分経過後の各試験体の含水と乾燥を比較すると、No. 1 以外は含水試験体が大きくなっている。その温度上昇の時系列変化の特徴では、一般に言われているように含水されたコンクリートの表面温度は、加熱によって急激に気化熱が発生し、その蒸発熱が放出されるために加熱初期の温度上昇変化は乾燥試験体より遅れてくる傾向が見受けられる。本実験は表面の水滴を拭き取っているため、加熱から 20 分後には表面が乾燥し乾燥試験体より温度上昇勾配が大きくなっている。図-11 には、左端より 150mm の位置(欠陥中心)の温度から 100mm の位置(欠陥端部)の温度を減算した欠陥部の温度差を示す。特に、試験体 No. 1 は健全部(50mm の位置)では乾燥試験体の方が大きな温度上昇となっているが、欠陥部の温度差は逆に含水試験体の方が明らかに大きくなっている。一般に吸水したコンクリートは熱伝導率が大きくなり<sup>5)</sup>、また水の比熱(4.2kJ/kgK)はコンクリートの比熱(0.88kJ/kgK)に比べて大きい。日射による蓄熱量は健全部では深さ方向にも熱拡散することになるが、欠陥部前面では空洞・空隙が熱移動を遮断して残留水分が熱媒となり、より蓄熱量が増大したものと考えられる。

### 3.2 屋外実験

同試験体を用いた屋外実験は、11 月 13 日と 14 日の両日で連続して行った。含水試験体は、室内実験と同様に 3 日間水中に浸漬し、赤外線カメラで測定を開始した時刻 7:00 の 15 分前に取り出した。実験状況を写真-3 に示す。

図-12 には 13 日及び 14 日の日射量と外気温を示す。最大日射量は、13 日が 573W/m<sup>2</sup>, 14 日が 552W/m<sup>2</sup> で、時刻 14:00 までの日射積算量は 13 日が 3,048W/m<sup>2</sup>・h, 14 日が 2,838W/m<sup>2</sup>・h であった。表-3 には測定開始時と終了時の含水率の変化を示す。また、測定時間の平均風速は 13 日及び 14 日ともに 1.3m/sec であった。相対湿度は 13 日の時刻 7:00 が 67.4%, 14 日が 88.2% であった。

#### (1) 屋外実験の結果

写真-4 及び写真-5 に 13 日及び 14 日の時刻 13:00 に得られた熱画像を示す。両日ともに欠陥深さが 20mm である試験体 No. 1 は、欠陥の位置に高温域を確認することができるが、深さ 40mm である試験体 No. 3 については視覚的に欠陥の位置を確認することは困難になっている。図-13 には日射積算量と欠陥中心位置の温度上昇の関係を示す。欠陥を設けていない試験体 No. 4 の両日と比較すると、13 日の温度上昇では気化熱によって実験開始時刻 7:00 から

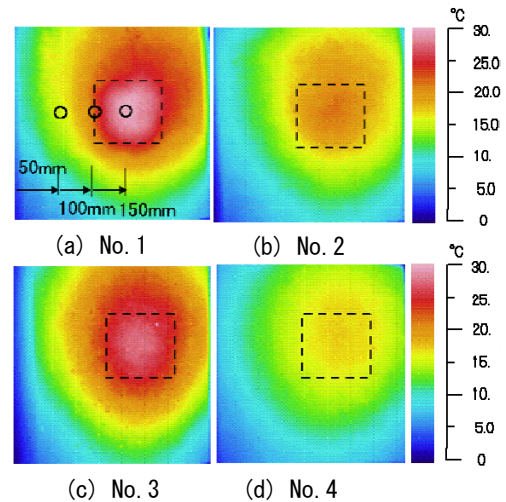


写真-2 熱画像(含水試験体)

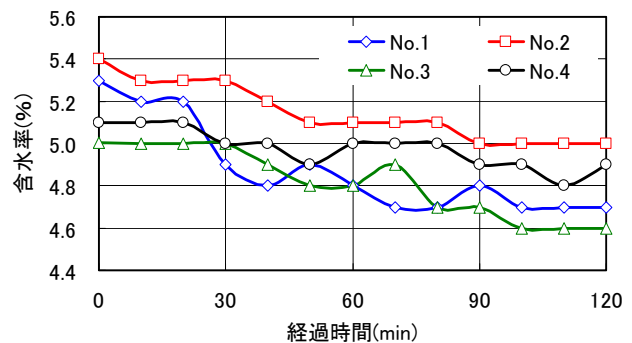


図-10 含水率の時系列変化(含水試験体)

表-2 健全部の温度上昇変化

経過時間 (min)	左端より50mmの温度上昇(°C)							
	No.1		No.2		No.3		No.4	
	含水	乾燥	含水	乾燥	含水	乾燥	含水	乾燥
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1.2	11.0	6.4	6.2	0.7	4.4	7.7	8.4
20	8.1	14.9	9.1	8.6	9.2	7.2	11.1	11.2
40	13.4	19.8	14.1	11.4	13.8	11.3	15.5	14.7
60	17.1	21.3	17.1	13.4	17.1	14.3	19.6	17.5
80	19.0	24.1	19.3	15.5	19.2	16.3	21.5	19.2
100	21.7	25.0	21.1	17.0	19.9	18.0	22.8	21.0
120	24.1	25.7	22.8	18.6	20.6	18.9	24.3	22.4

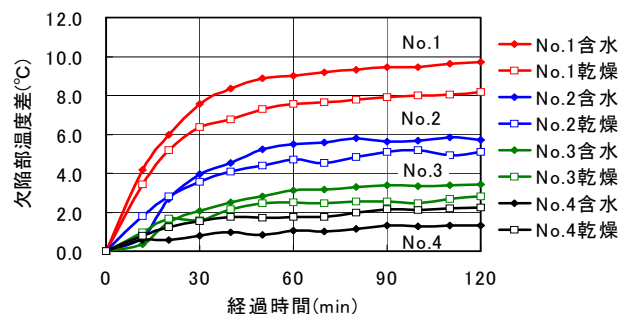


図-11 欠陥部温度差の時系列変化(150mm-100mm)

の温度上昇勾配は緩やかに変化し、800W/m<sup>2</sup>・h(時刻 9:40)以降から 14 日に比べて大きくなっていることが分かる。最大温度時刻は、図-6 に示す特異な温度上昇日と同様に 13 日が時刻 12:10, 14 日が時刻 12:40 と早く現れている。図-14 に最大温度となった試験体 No. 1 の試験体中央のラ



写真-3 屋外での実験状況

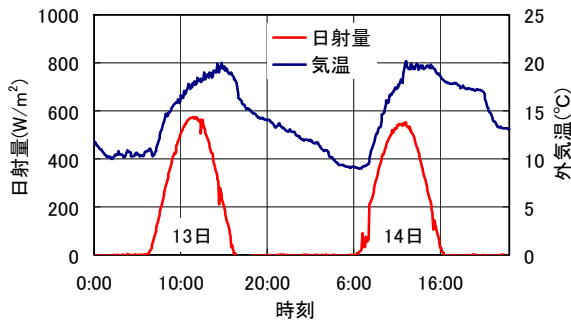


図-12 日射量と外気温

表-3 含水率の変化

試験体 No.	時刻別の含水率(%)			
	13日		14日	
	7:00	17:00	7:00	17:00
1	5.4	4.9	4.8	4.7
2	5.1	4.7	4.8	4.8
3	4.8	4	4.1	4.1
4	5.3	4.7	4.7	4.7

インプロファイルで得られた温度差分布変化を示す。このように、欠陥部の温度差は13日の方が1.0°C程度大きくなっており、降雨後に晴れの場合の診断が欠陥部の検出に有効であることが確認できる。

#### 4. 熱伝導解析による温度変化の再現性

二次元非定常熱伝導シミュレーションは、汎用 FEM プログラム COSMOS/M Ver2.7 を使用して、降雨後の温度変化の再現性について検討した。日射量及び外気温は前述の横浜市港北区役所のデータである。図-15 は図-9 の試験体 No.1 を要素分割したもので、表-4 は解析に用いた熱特性である。なお、解析モデルは深さ 50mm まで（色分け区間）の熱特性の変化が時系列に設定できるものであるが、今回の解析は熱伝達係数を含め一定としている。

##### 4.1 解析結果

図-16 は31日間の実測と解析の健全部の温度上昇及び欠陥部で得られた最大温度差を比較したものである。この解析温度は、実測値の時系列な温度変化に一致するように繰り返し計算を行い熱伝達係数及び吸収日射量(入力日射量)を同定したもので、熱伝達係数は  $14\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 、入力日射量は実測された最大日射量の57%である。健全部の実測

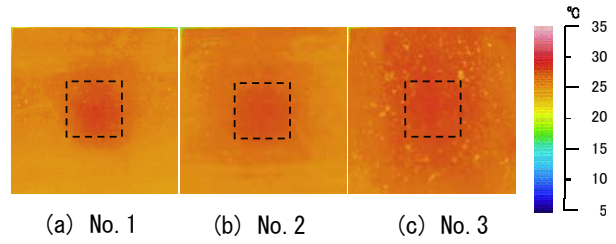


写真-4 13日の熱画像(13:00)

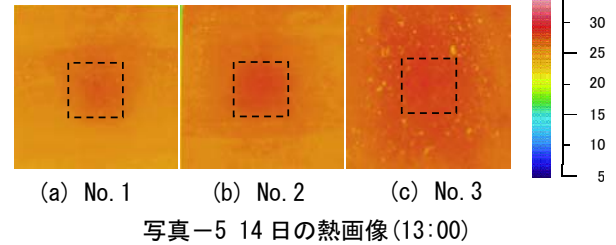


写真-5 14日の熱画像(13:00)

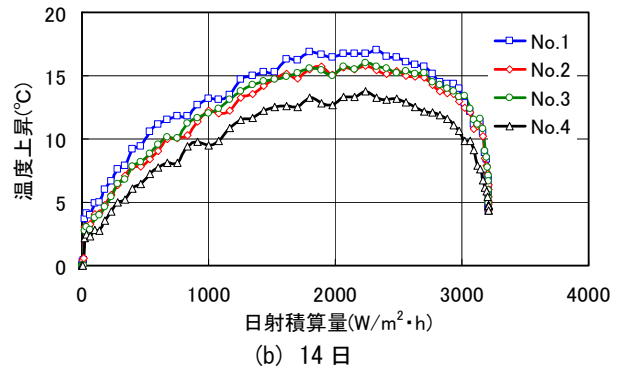
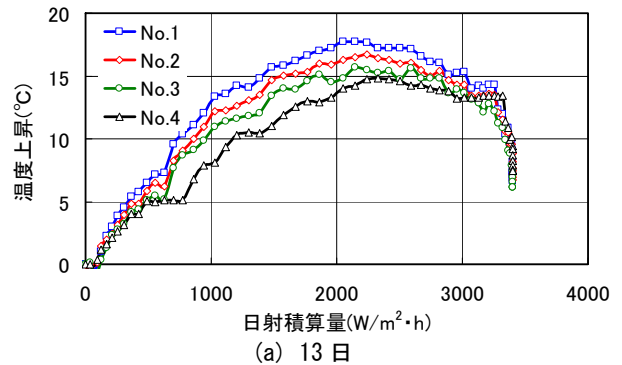


図-13 日射積算量と温度上昇量(欠陥部)

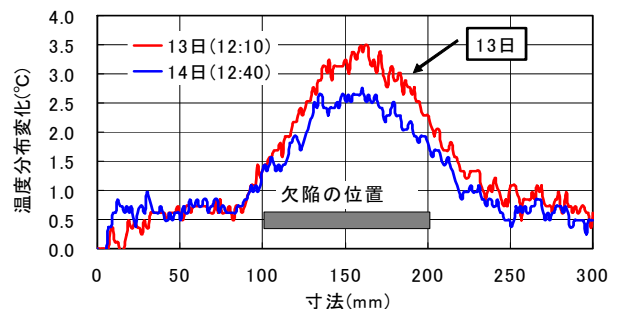


図-14 試験体 No.1 の温度分布変化

及び解析の温度上昇を比較すると、18日は解析温度の方が2.4°C大きくなっているものの、31日間の両者の平均差は0.4°Cとほぼ一致している。また、温度上昇と欠陥部温度差では良好な比例関係が成立していることが分かる。

図-17 は、9日～11日の健全部の実測値と解析結果と

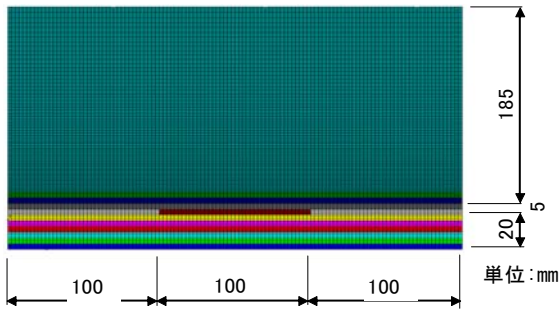


図-15 解析モデル(試験体 No. 1)

表-4 解析に用いた熱特性

材料	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比熱 [kJ/(kg·K)]	熱伝導率 [W/(m·K)]	熱伝達係数 [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
コンクリート	2200	0.876	1.4	14
欠陥(空気)	1.161	1.009	0.0256	

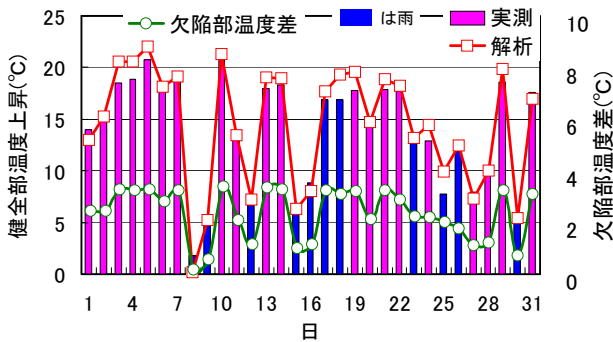


図-16 解析と実測温度及び欠陥部温度差

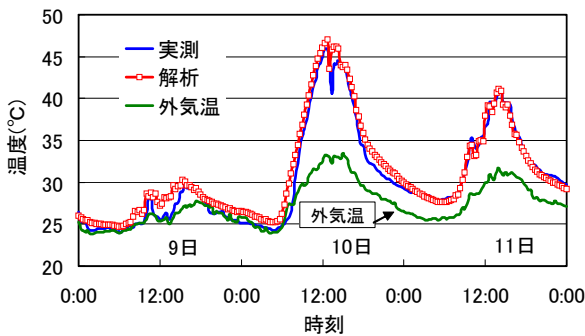


図-17 実測温度と解析温度の比較

を比較したものである。その温度変化では、9日は103mm/日の大雨で実測値と解析値に相違が見られるが、特異な温度上昇となった10日は日の出時刻の温度に若干の差は見られるものの推移は良く一致していることが分かる。最大温度時刻は実測値が12:20、解析値が12:40で最大温度の差は約0.9°Cである。含水率の時系列変化を考慮していないにも拘わらず両者の温度変化が良く一致している理由は、図-4に示す快晴日ではほぼ同日射量である5日及び10日の温度上昇変化にも現れているように、降雨後では最大温度となる時刻が早まり日射積算量に対する温度上昇量は大きくなるものの、健全部の温度変化は熱拡散によって欠陥部前面より大きな温度差にならないものと考えられる。このことは、図-13及び図-14に示す欠陥部の温度からも健全部との相違を確認することができる。

[謝辞]

本研究は、平成19年度科学研究費補助金[基盤研究(c)課題番号:19560487]を受けて行った一部である。また、気象データを提供して頂いた横浜市港北区役所及び横浜市環境創造局環境科学研究所の佐俣満夫博士ならびに福田亜佐子氏に深く感謝の意を表します。

## 5. まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

- (1) コンクリート表面の温度上昇は、日射積算量が3,000W/m<sup>2</sup>・h以上の場合には日射積算量と比例関係にあり、温度上昇量及び最大温度となる時刻が日射積算量から精度良く推定できる。
- (2) 診断に適した気象条件では、降雨後に晴天の場合が最も温度上昇が大きくなっており、その有効性については室内及び屋外実験からも確認できた。
- (3) 最大温度を迎える時刻は、日射積算量が3,000W/m<sup>2</sup>・h以上の場合には13:30~14:26の範囲、2,000~3,000W/m<sup>2</sup>・hの場合には12:11~14:41の範囲、また2,000W/m<sup>2</sup>・h未満では10:28~15:42の範囲と日射量が弱くなるほどばらつきが大きくなる。また、降雨後では同日射積算量に対して1時間ほど早くなる。
- (4) 含水試験体と乾燥試験体との温度上昇の比較では、健全部の温度上昇差よりも空洞・空隙を有する欠陥部の温度上昇差の方が大きくなり、降雨後の診断が特に欠陥検出に有効であることが分かった。
- (5) 熱伝導解析で得られた健全部の温度変化は、雨天日では実測との間に温度差が生じるものの、降雨後では熱特性が一定にも拘わらず最大温度及び温度変化ともに良く一致した。

## 参考文献

- 1) 谷川恭雄, 森博嗣, 安龍男: サーモグラフィによるRC構造物の内部欠陥探査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 10, pp. 349-354, 1998. 10
- 2) 大屋戸理明, 田中年志, 鳥取誠一, 栗田耕一: 強制加熱によるコンクリート剥離検知手法における照射出力と画像解析法の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 3, pp. 37-46, 2007. 9.
- 3) 江藤 亮, 柳内睦人, 金光寿一: 熱伝導解析によるコンクリート壁面の方位別診断予測, 土木学会第62回学術講演会, pp. 65-66, 2007. 9
- 4) 田中俊六, 武田仁, 足立哲夫: 最新建築環境工学, 井上書店, pp. 76-84, 1985
- 5) 長尾覚博, 中根 淳: 高温加熱されるコンクリートの熱伝導率, コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, pp. 395-400, 1990