

12. 赤外線放射温度計を用いた外壁剥離診断手法に関する実験報告

An Experimental Report on Diagnostic Method of External Wall Separation by Infrared Radiometer

恩村 定幸* 谷中 隆博*

谷沢 晋*²

要 旨

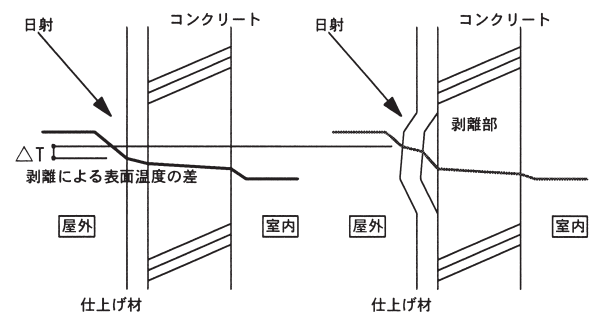
一般に、外壁仕上げ材の剥離診断には打音法が用いられている。今回、打音法に比べて作業能率が高い赤外線放射温度計を用いた外壁剥離診断法（以下、サーモグラフィー法と称す）の有効性を確認するために、屋外測定実験を行った。その結果、サーモグラフィー法は精度に関して未だ実用の域に達していないが、剥離の有無を確認するなどの概略診断の段階においては、作業能率が高く有効であることが分かった。さらに、サーモグラフィー法を採用する際の留意点を明確にした。

キーワード：非破壊検査法／外壁剥離診断／赤外線放射温度計／サーモグラフィー法／屋外測定実験

1. はじめに

建物の外壁は外気温変動、日射、降雨、降雪などの外界気象の影響を直接受けるため、外壁仕上げ材においては温度伸縮や雨水の浸食によって剥離やひび割れなどの現象が生じやすい。この現象は構造躯体の劣化を促進するうえ、外壁仕上げ材が重量物の場合、剥落等による人身および物損事故の危険性が心配される。したがって、正確で効率的な外壁剥離診断を行って、躯体の健全さを保ち事故を未然に防ぐことが重要となる。

現在、外壁仕上げ材を打撃したときの反射音から剥離部を判別する打音法が、外壁剥離診断の一般的な方法として広く採用されている。しかし、この方法は診断者が壁面を逐一打撃しなければならないために、足場の架設、天候、周囲の音環境、聴覚の持続時間などの制約を受け、非常に作業能率が低いという問題をかかえている。さらに、打音という感覚的な判断によって剥離の判定を行うために、判定者に高い熟練度が必要となる。そのため、非接触で作業能率が高い赤外線放射温度計を利用したサーモグラフィー法が実用化されている。サーモグラフィー法の場合、基本的に足場が不要であること、広範囲を短時間に診断できること、判定に用いられる画像がデジタル媒体なので測定自体に熟練度を必要としないこと等の長所を有している。しかしながら、その有効性に関する検証が十分になされる前に実務で多用されたため、これまでに数多くの誤診が発生し、広く採用されるまでに至らなかった。



【剥離がない場合の温度勾配】 【剥離がある場合の温度勾配】
図-1 サーマグラフィー法による剥離部分検出の原理

ところが、近年、サーモグラフィー法の研究^{1)~9)}が進み、計測機器自体の性能が向上したことと、外壁仕上げ材の剥落事故が多発するという社会情勢が相まって、サーモグラフィー法に対する関心が再び高まりつつある。

そこで、サーモグラフィー法の有効性を確認するために屋外測定実験を行った。本報ではその結果について報告する。

2. サーマグラフィー法の概要

2.1 原理

外壁に剥離部分がある場合、その空隙における空気層が断熱層となるため、日射の影響を受ける日中では、剥離部分は健全部に比べて表面温度が高くなる（図-1参照）。サーモグラフィー法は、この剥離部分と健全部に生じる表面温度の差を赤外線放射温度計によって可視化して剥離の有無を判別する手法である。

*建築工法・材料研究室 *²元企画管理室（2001.6に退社）

2.2 赤外線放射温度計

赤外線放射温度計は、非接触で測定した観測対象物の表面各部から放射される赤外線エネルギーを温度に換算し、その温度分布像を擬似カラーで内臓モニターに熱画像として表示する装置である。

2.3 サーモグラフィー法の現状分析

外壁の剥離や漏水の診断に用いるサーモグラフィー法について、現在の採用状況や問題点などをヒアリング調査した結果、以下の問題点が認められた。

- ・測定は季節や天候等の外界条件の影響を大きく受ける。
 - ・サーモグラフィー法だけで判定すると誤診が起きる。
- 実際には、打音法やコア抜き等を同時に行い、総合的に剥離や漏水を判定している。
- ・現状では、剥離よりも漏水判定に用いることが多い。
 - ・熱画像の処理や剥離であることの判定等には十分な経験が必要である。

3. 屋外測定実験

サーモグラフィー法に関する調査研究は多数報告されているが、前述の問題点などから測定精度に関する検証が十分になされているとはいえない。そこで、サーモグラフィー法による屋外測定実験を行い、その結果について分析、評価を行い、採用するにあたっての留意点を把握した。

3.1 測定概要

(1) 測定場所

大阪府高槻市

(2) 測定年月日

平成12年 7月3日～8月2日（夏期）

平成12年11月7日～11月9日（中間期－秋）

平成13年 2月23日、2月26日～2月27日（冬期）

(3) 測定時刻

測定は午前 8 時30分から午後5時00分までの時間帯において30分毎に行った。

(4) 測定器

測定器にはコンパクトサーモTVS-2200ST（日本アビオニクス㈱社製、仕様は表－1のとおり）を使用した。

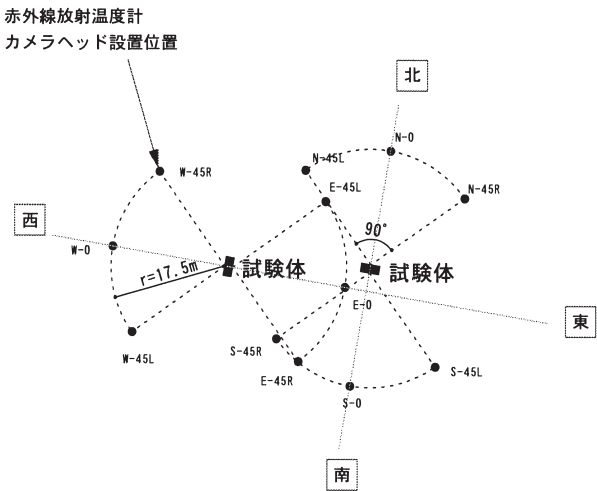
(5) 試験体

試験体の設置状況とその詳細を図－2、図－3に示す。試験体は壁面の仕上げにモルタル仕上げ（リシン塗布）をしたタイプとタイル仕上げ（45×95、磁器タイル）をしたタイプの2種類とし、それぞれについて、クラック（キズ）が有るものと無いものを作製した。クラックを有する試験体は剥離厚さを3mmとし、クラック幅が0.3

mmと0.5mmのものを、クラックを有しない試験体は、剥離厚さが1mmと3mmのものを作製した。剥離部は仕上げ材とコンクリート面との間にウレタンシートを挿入することで代用し、その大きさはいずれも300mm角、200mm角、100mm角の3種類とした。なお、試験体の小口面は日射の影響を避けるためにアルミ箔を張り付けた。図－2に示すように各試験体は測定面を東西南北の方位に向け、それぞれを垂直になるよう架台上に設置し、試験体の背面および上部は日射の影響を防ぐために、白色のビニルシートで養生した。試験体設置状況を写真－1に示す。

(6) 測定方法

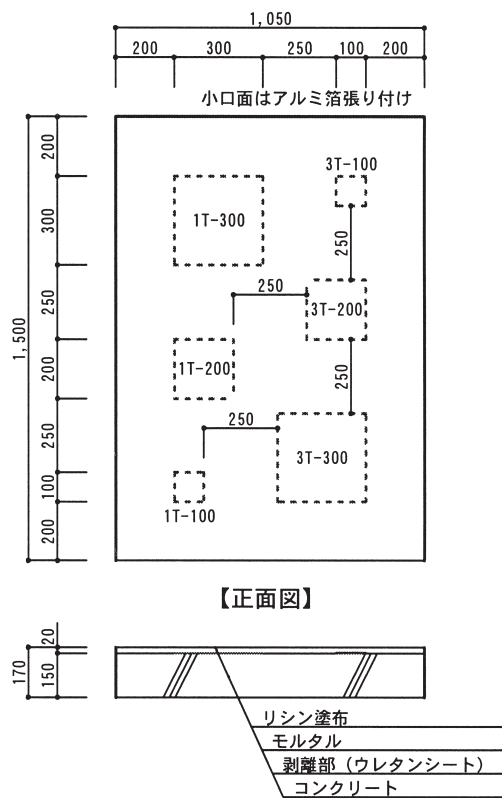
図－2に示すように、測定距離（赤外線放射温度計のカメラヘッドから試験体までの距離）は17.5mとし、試験体に対して直角、および水平45度の方向（2方向の内のいずれか一方を選択）から壁面温度を測定した。また、測定期間中の1日については、降雨状態を想定して、測定前日の夜間から朝方にかけて約12時間にわたって試験体に散水した。



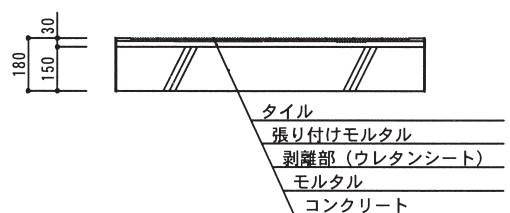
図－2 試験体および計測機器の設置状況

表－1 使用した赤外線放射温度計の仕様

検知器	インジウムアンチモン (スターリングクーラー冷却型)
測定視野	水平15度×垂直10度
瞬時視野	2.2mrad
測定波長	3～5.4 μm
測定温度範囲	253～2273K
最小温度検知差	0.1K (303K黒体炉にて) 画質改善時は0.05K



【モルタル仕上げの断面図】



【タイル仕上げの断面図】

図-3 試験体の詳細



【全 景】



【近 景】

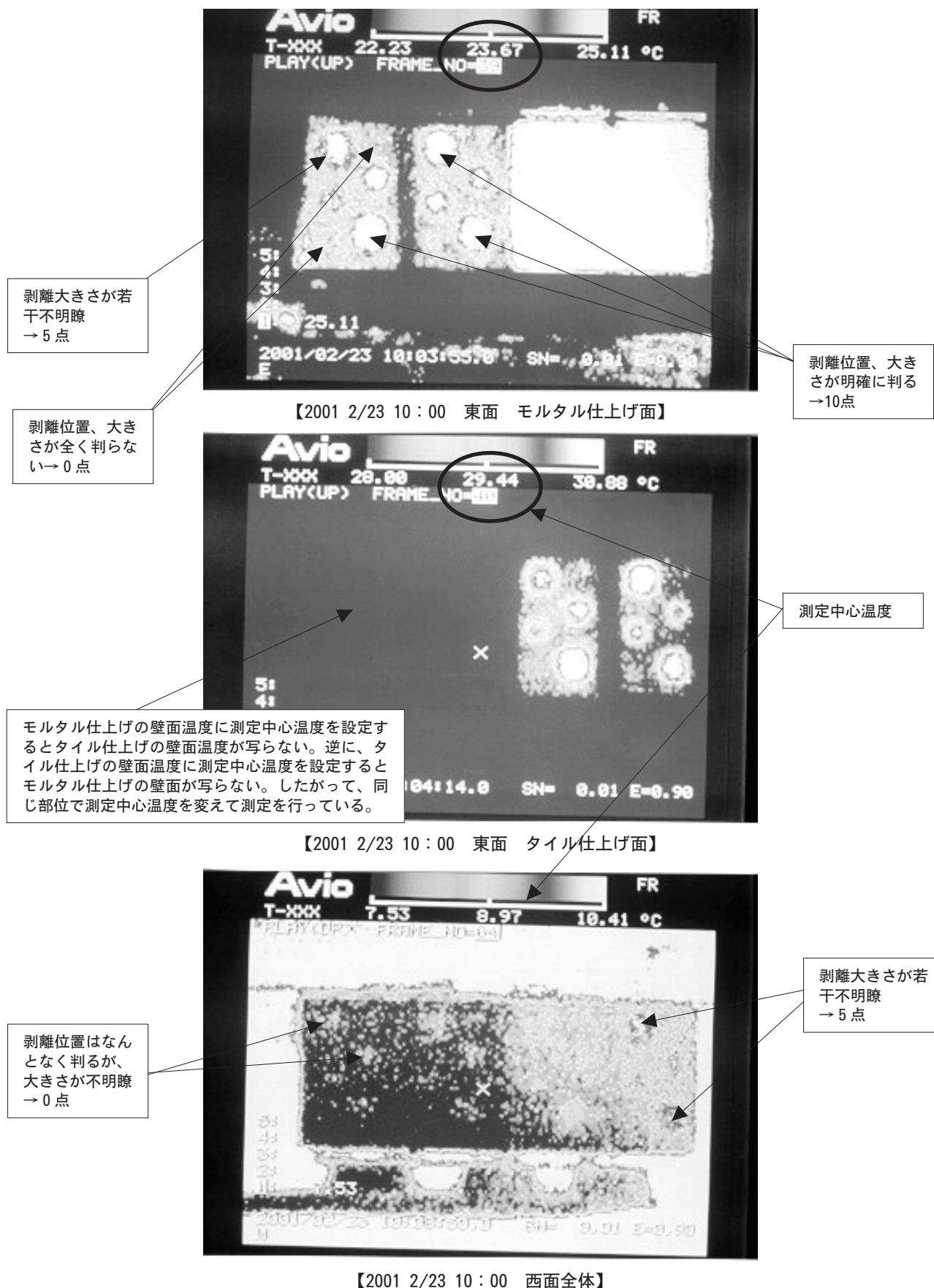
写真-1 試験体設置状況

3.2 測定結果

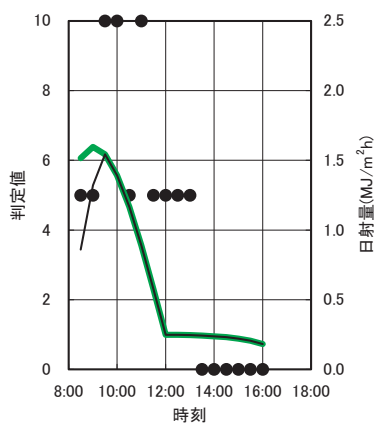
図-4 は測定結果の一例を示しており、図示したように各試験体の剥離部については、明確に剥離が判るものを10点、全く剥離が判らないものを0点、剥離は判るが形状等が不明確なものを5点とし、試験体に対して直角方向と水平45° の方向の各点数を平均した数値を剥離判定値とした。その結果の一例を表-2 に示す。

表-2 屋外測定結果による剥離判定値の一例 (2001年2月23日 (冬季)、東面)

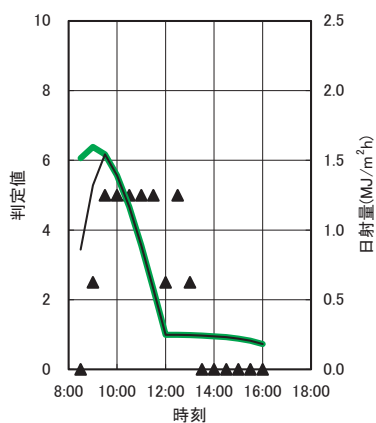
	天候 (雲量)	日射量 (MJ/m ² h)	モルタル仕上げ												タイル仕上げ											
			クラック無し						クラック有り						クラック無し						クラック有り					
			剥離厚さ 1mm			剥離厚さ 3mm			幅 0.3mm			幅 0.5mm			剥離厚さ 1mm			剥離厚さ 3mm			幅 0.3mm			幅 0.5mm		
			300	200	100	300	200	100	300	200	100	300	200	100	300	200	100	300	200	100	300	200	100	300	200	100
8:30	曇(5)	0.86	5	0	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	7.5	5	0	10	7.5	0	10	5	0	7.5	5	0
9:00	晴(2)	1.32	5	2.5	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	10	7.5	0	10	5	0	7.5	2.5	0
9:30	晴(0)	1.54	10	5	0	10	5	0	10	5	0	10	5	0	5	5	0	10	10	0	10	5	0	10	5	0
10:00	晴(0)	1.39	10	5	0	10	10	0	10	5	0	10	5	0	5	5	0	10	10	0	10	5	0	10	5	0
10:30	晴(0)	1.17	5	5	0	10	5	0	10	5	0	10	5	0	5	5	0	10	7.5	0	10	5	0	10	5	0
11:00	晴(0)	0.89	10	5	0	10	10	0	10	5	0	10	5	0	5	5	0	10	10	0	10	5	0	10	5	0
11:30	晴(0)	0.58	5	5	0	10	7.5	0	10	5	0	10	5	0	5	5	0	10	5	0	10	5	0	10	5	0
12:00	晴(3)	0.25	5	2.5	0	7.5	5	0	5	5	0	7.5	5	0	5	5	0	10	5	0	10	5	0	10	5	0
12:30	晴(0)	0.25	5	5	0	5	5	0	5	2.5	0	5	2.5	0	0	0	0	10	5	0	5	5	0	10	2.5	0
13:00	晴(0)	0.25	5	2.5	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	10	5	0	5	5	0	5	5	0
13:30	晴(3)	0.24	0	0	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0
14:00	晴(5)	0.24	0	0	0	5	5	0	5	2.5	0	5	0	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0
14:30	曇(8)	0.23	0	0	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0
15:00	曇(10)	0.22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15:30	曇(10)	0.21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16:00	曇(10)	0.18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16:30			日没により計測不能																							



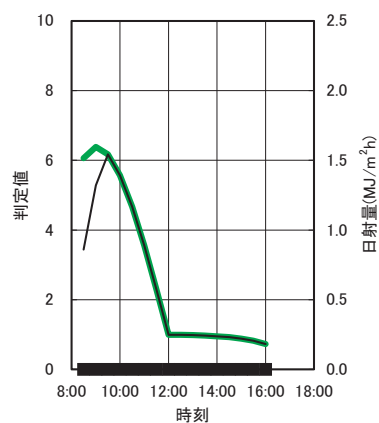
図－４ 屋外測定実験結果と判定例



【剥離の大きさ300×300mm】

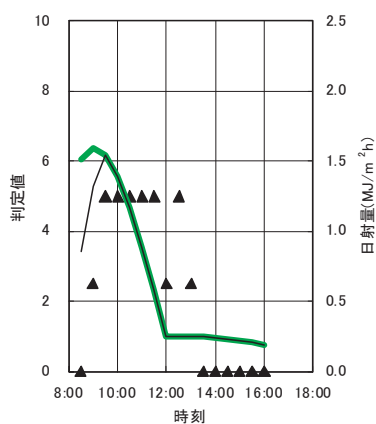


【剥離の大きさ200×200mm】

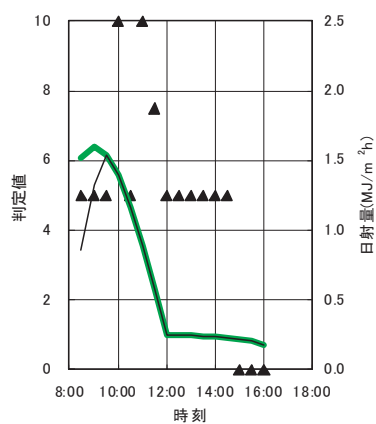


【剥離の大きさ100×100mm】

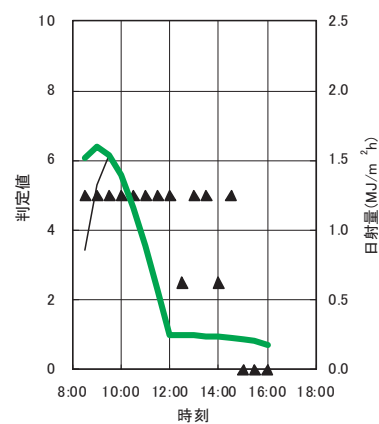
図－5 屋外測定実験結果 1
(モルタル仕上げ、クラック無し、剥離厚さ1mm)
(2001/2/23 東面)



【クラック無し、剥離厚さ1mm】

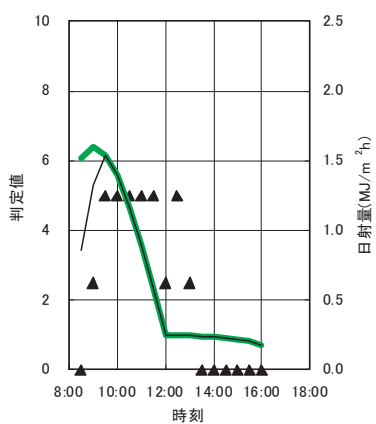


【クラック無し、剥離厚さ3mm】

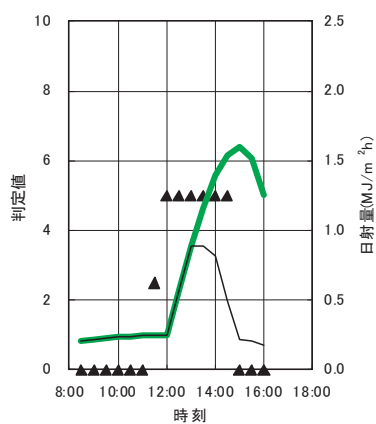


【クラック有り、剥離厚さ1mm】

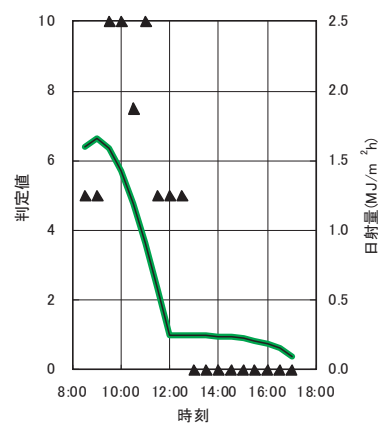
図－6 屋外測定実験結果 2
(モルタル仕上げ、剥離の大きさ200×200mm)
(2001/2/23 東面)



【モルタル仕上げ、2001/2/23 東面】



【タイル仕上げ、2001/2/23 南面】



【モルタル仕上げ、2001/2/27 東面】
(散水後)

図－7 屋外測定実験結果 3
(クラック無し、剥離厚さ1mm、剥離の大きさ200×200mm)

図－５～図－７は時間を横軸に、剥離判定値（前述の点数）と日射量の計算値を縦軸にとり、各々の関係を図示したものの一部である。日射量は、雲量を考慮して計算したものを濃細線で、考慮せずに計算したものを淡太線で表している。

図－５から以下のことが分かる。

- ・剥離部位の大きさが大きいほど判別は容易に行える。
- ・100×100mmの大きさの剥離部位については、ほとんど判別できない。
- ・壁面への日射量が大きいほど判別は容易に行える。

図－６から以下のことが分かる。

- ・剥離厚さが大きい方が、また、壁面にクラックが有る方が判別を行いやすい。

図－７から以下のことが分かる。

- ・剥離判別の容易さと壁面への日射量とは密接に関係しており、雲などで日がかげると急に判別が難しくなる。
- ・モルタル仕上げおよびタイル仕上げのいずれにおいても剥離の判別が行える。
- ・散水後の方が判別を行いやすい。

4. 調査、実験結果の検討

前章で示した実験結果は全体の一部分であり、総データ数は864である。これらのデータの詳細な検討と測定時の感想、およびヒアリング調査から、既往の研究成果を検証した。また同時に、サーモグラフィー法を用いて外壁剥離診断を行う際の留意点を抽出して整理した。それらを表－３、表－４に示す。

表－３ 既往の研究成果の検証

	既往の研究成果	実験結果等に基づく検証
①	カメラヘッドは対象建物に対して正対せず、やや斜めの位置に設置する。その際、平面角度は45°以内とする ¹⁾ 。	カメラヘッドを対象建物に対して正対することで剥離部の判別が低下するという事はなかった。逆に正対した方が対象建物を広くとらえることができ、判別が容易に行えると感じられた。
②	建物上部を測定する場合、仰角は45°以内とする ¹⁾ 。	対象建物を広くとらえる意味から、仰角についてもできるだけ小さくした方がよいと思われる。
③	雨天時や5.0m/s以上の風速の場合は測定できない。降雨後は表面の乾き具合を見ただけで測定する可否かを判断する ¹⁾ 。	妥当と考えられる。実験の結果では降雨後の方が比較的判別しやすかった。ただし、壁面は乾いていなければならない。
④	測定時にはカメラヘッドを設置するスペースが必要である。一般的に、対象建物から10m程度離れた位置にカメラヘッドが設置できたなら、作業能率を低下させずに測定を行うことができる。ただし、障害物がある場合はこの限りではない ¹⁾ 。	測定距離10mにおける測定視野が1.8m×2.6mであることから妥当と考える。
⑤	表面温度の格差が大きいほど剥離診断の判別が容易になる。健全部と剥離部分との温度差が最も大きいのは、日射が壁面に当たり始める頃から数時間の間（壁面への日射量が最大のとき）であり、夏に比べて冬の方が顕著である。曇天日や表面に汚れが多い壁面、北面の壁は判別が困難である ¹⁾ 。	日射が剥離の判別に大きな影響を与える。日射が壁面に当たり始める頃から数時間の間における剥離の判別は容易である。なお、雲などで日がかげると急に判別は困難となる。また、曇天日、表面に汚れが多い壁面、北面の壁は判別が困難である。夏に比べて冬の方が判別しやすいのは南面に限られ、逆に東面や西面は夏の方が容易に判別できた。これは、太陽高度による壁面への日射量の差異が原因と考えられる。
⑥	次に示すような建物の形状、部位、仕上げによっては診断がしにくい（判別が難しい）ことがある。 ・庇小口やパラペット、出柱周りなど外気に2面以上接している部位 ・底上部の壁面など日射の反射を受ける部位 ・日影の影響を受ける部位 ・建具の熱影響を受ける開口部まわり ・タイル仕上げなどで表面の色が異なる部位がある場合 ・熱的影響が大きく汚れがひどい排気ダクトの周辺等 ¹⁾	妥当と考える。このような場合、測定中心温度を変えて同じ部位の測定を数回行えば、精度が向上し、好ましい結果が得られる。
⑦	モルタル仕上げの場合、剥離厚さが1mm以上、大きさが100×100mm以上であればモルタル厚さが70mm以下までサーモグラフィー法によって剥離の判別が可能である。ただし、北面の壁についてはモルタル厚さが30mm以下でないと判別が困難である。なお、モルタル厚さは薄いほど判別しやすい ⁹⁾ 。	実測では、剥離大きさ100×100mmのものはほとんど判別できなかった。剥離大きさ200×200mmのものも確実に判別できるとは言い難く、明確に判別できる剥離大きさは300×300mm以上と考えられる。剥離厚さは、1mmよりも3mmの方が判別しやすい。
⑧	剥離部分と健全部との温度差は、剥離厚さや面積が大きいほど大きくなる（＝判別しやすい）。剥離面積が100×100mm以下になると極端に判別しにくくなる ⁹⁾ 。	妥当と考えられる。
⑨	剥離部分と健全部との温度差が日中で1℃以上、夜間で0.5℃以上あれば剥離部分は明瞭に判別できる ⁹⁾ 。	夜間については未検証であるが、日中については妥当と考える。
⑩	タイル面の日射吸収率が大きいほど（黒っぽいほど）判別しやすくなる ⁷⁾ 。	妥当と考えられる。
⑪	外壁周辺部や開口部周囲などの境界条件によって生じる温度差（ノイズ）を有効に除去するのは難しい ⁹⁾ 。	妥当と考えられる。測定中心温度を変えて同じ部位の測定を数回行えば、精度が向上し、好ましい結果が得られる。
その他、夜間の測定に関する知見 ^{2), 3), 4), 6)} 、計測器の種類に関する知見 ⁹⁾ 、タイル仕上げにおいて剥離位置の違いに関する知見 ⁷⁾ 等があるが、それらについては今回の実験では検証していない。		

表－４ サーマグラフィー法の留意点

①	機器の取り扱い説明書は熟読する必要がある。
②	壁面の仕上げがタイル仕上げでも吹き付け仕上げでも診断は可能である。
③	クラックの有無や幅は剥離診断に大きく影響しない。
④	壁面から10m程度離れた位置にカメラヘッドが設置できたなら、作業能率を低下させずに測定が行える。ただし、障害物がある場合はこの限りではない。
⑤	測定は、一つの壁面に対して測定中心温度を変えて数回測定を行うことが望ましい。
⑥	全季節における最適測定時間帯を以下に示す。 東面の壁面＝8：30～11：00 南面の壁面＝10：00～14：00 西面の壁面＝13：00～15：30 北面の壁面＝11：00～13：00
⑦	北面の壁面は⑥の時間帯であっても非常に判別しにくい。
⑧	日がかげると極端に判別しにくくなる。
⑨	降雨後の方が比較的判別しやすい（ただし、壁面は乾いていること）。
⑩	雨天日、曇天日はほぼ診断できない。
⑪	風速が5.0m/s以上の強風時は画像がぶれるので診断に不向きである。
⑫	剥離部位の大きさが300×300mm以上であれば診断が容易である。なお、ほとんど快晴であれば、200×200mmの大きさの剥離部位について判別が可能である。100×100mmの大きさの剥離部位については冬季の南面で快晴の場合にかぎり判別できる。
⑬	剥離厚さは1mmでも判別できるが、3mmの方が容易に剥離を判別できる。ただし、1mm未満の剥離については未検証である。

5. まとめ

屋外測定実験によって、サーモグラフィー法の有効性について検討し、採用時の留意点の把握を行った。

屋外測定実験の結果とヒアリング調査を考えあわせると、サーモグラフィー法による剥離診断については、精度の点で実用の域に達していないと思われる。しかし、作業能率が高い手法であるので、本診断の前の概略診断（剥離の有無の確認など）段階においての採用に有効である。つまり、まず初めにサーモグラフィー法で外壁面の剥離状態を概略確認した後に、打音法などによって詳細に調査することで、外壁の剥離診断が効率よく行えると考えられる。

〔参考文献〕

- 1) 佐藤紀男他：赤外線による診断、建築技術、1989.07、pp.186-195
- 2) 田中一浩他：鉄筋コンクリート造建築物におけるタイルの剥離検査方法に関する研究（その1．撮影最適時間帯について）、日本建築学会大会梗概集A、1994、pp.1329-1330
- 3) 田中一浩他：鉄筋コンクリート造建築物におけるタイルの剥離検査方法に関する研究（その2．撮影最適時間帯における検出率について）、日本建築学会大会梗概集A、1995、pp.689-690
- 4) 山根修他：鉄筋コンクリート造建築物におけるタイルの剥離検査方法に関する研究（その3．環境条件への対応について）、日本建築学会大会梗概集A、1996、pp.1105-1106
- 5) 込山貴仁他：サーモグラフィー法による外壁仕上げ材の剥離検知の適用限界に関する実験研究、日本建築学会構造系論文集第484号、1996.6、pp.13-20
- 6) 西川忠・鎌田英治：赤外線法によるモルタル仕上げ外壁剥離診断における剥離条件と剥離検知精度に関する実験研究、日本建築学会構造系論文集第524号、1999.10、pp.13-19
- 7) 西川忠他：赤外線法によるタイル仕上げ外壁の剥離診断に関する実験研究、日本建築学会構造系論文集第529号、2000.3、pp.29-35
- 8) 山田和夫・桃木佳子：サーモグラフィー法を適用した外壁タイルの剥離評価に関する基礎研究、日本建築学会大会梗概集A、1993、pp.1125-1126
- 9) 山田和夫・桃木佳子：サーモグラフィー法によるコンクリートの内部探査に及ぼす日射量の影響、日本建築学会大会梗概集A、1996、pp.715-716