

平成 26 年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「信頼性・経済性に優れた高精度な測定技術による
建物外壁の点検・診断技術の研究開発」

研究開発成果等報告書

平成 29 年 5 月

担当局 近畿経済産業局

補助事業者 クモノスコーポレーション株式会社

国立高等専門学校機構 長野工業高等専門学校

目次

第 1 章	研究開発の概要	5
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	5
1-1-1	研究開発の背景	5
1-1-2	類似技術	5
1-1-3	高度化目標	5
1-1-4	技術的目標値	7
1-2	研究体制	8
1-3	成果概要	9
1-4	当該研究開発の連絡窓口	10
第 2 章	本論	11
2-1	緒言	12
2-2	研究開発の内容	14
2-2-1	研究概要	14
2-2-2	研究内容の相関関係	14
2-3	検出プログラム	15
2-3-1	赤外線法について	15
2-3-2	従来の検出法の問題点	15
2-3-3	検出プログラムの機能	15
2-3-4	本プログラムの検出法	15
2-3-5	検出プログラムのサブ機能	16

2-4 FEM 解析	17
2-4-1 解析の目的	17
2-4-2 解析内容	17
2-4-3 解析結果の一例	19
2-4-4 各種解析結果	20
2-5 要素試験（屋上試験）	22
2-5-1 要素試験目的	22
2-5-2 赤外線放射率の確認	22
2-5-3 試験片	22
2-5-4 計測	25
2-5-5 試験結果	25
2-6 標準板	27
2-7 実証試験（中庭壁面試験）	28
2-7-1 試験の目的	28
2-7-2 試験体	28
2-7-3 試験内容	28
2-7-4 試験結果	29
2-8 健全度判定	32
2-8-1 空隙の落下危険基準	32
2-8-2 強度計算	32
2-9 温度差プログラム	38
2-9-1 温度差プログラムの目的	38
2-9-2 解析方法	38

【公開版】

2-10実壁面の空隙による確認試験	38
2-10-1 試験目的	38
2-10-2 試験実施場所	38
2-10-3 試験内容	38
2-10-4 試験結果	39
2-11まとめ	41
2-12今後の課題	41

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

建造物の外壁において使用されている外装仕上げ材のうち、タイル貼りの場合には目視により劣化（とりわけ「タイルの浮き」）を判別することは難しく、非破壊検査による外壁調査が実施されている。非破壊検査のうちタイルの浮きを判別する方法として、赤外線サーモグラフィによる熱画像から異常箇所を検出する方法があるが、データ解析・分析には高度な知識と経験を必要とする上、検知精度が高くないという課題がある。加えて、従来の方法では困難である浮きの形状を高精度で特定すること、経時変化を把握すること、赤外線サーモグラフィで取得したデータの解析時間を削減することも求められている。

老朽化する建造物が増えていくものの、点検・補修にかけられる予算や人的資源は限られており、これらの課題を解決した高精度かつ効率的な健全度評価手法の確立を目指す。

1-1-2 類似技術

赤外線サーモグラフィで取得したデータの解析に関する技術としては、基準温度による判定方法と温度差による判定方法があり、温度差による判定に関しては、隣接するピクセルとの温度差が基準値を超えるものを自動抽出する技術が存在する。しかしながら、いずれの場合も基準値の設定は自動化されておらず、基準値の設定は経験と勘に頼ることとなり、個人差による誤差が生じる。

本研究開発では、対象物の周囲の温度変化や日照等に左右されずに異常温度領域を決定できるプログラムの開発と、有限要素法による熱伝導解析による種々な条件を設定したサンプルに対する検証を行い、基準値を設定するに資するデータを収集したうえで、計測条件に応じた適切な基準値を自動的に設定し、データ解析・分析の更なる精度向上と時間短縮を目指すものであり、前述の類似技術とは異なる。また、関連分野の特許について抵触しないことも確認している。

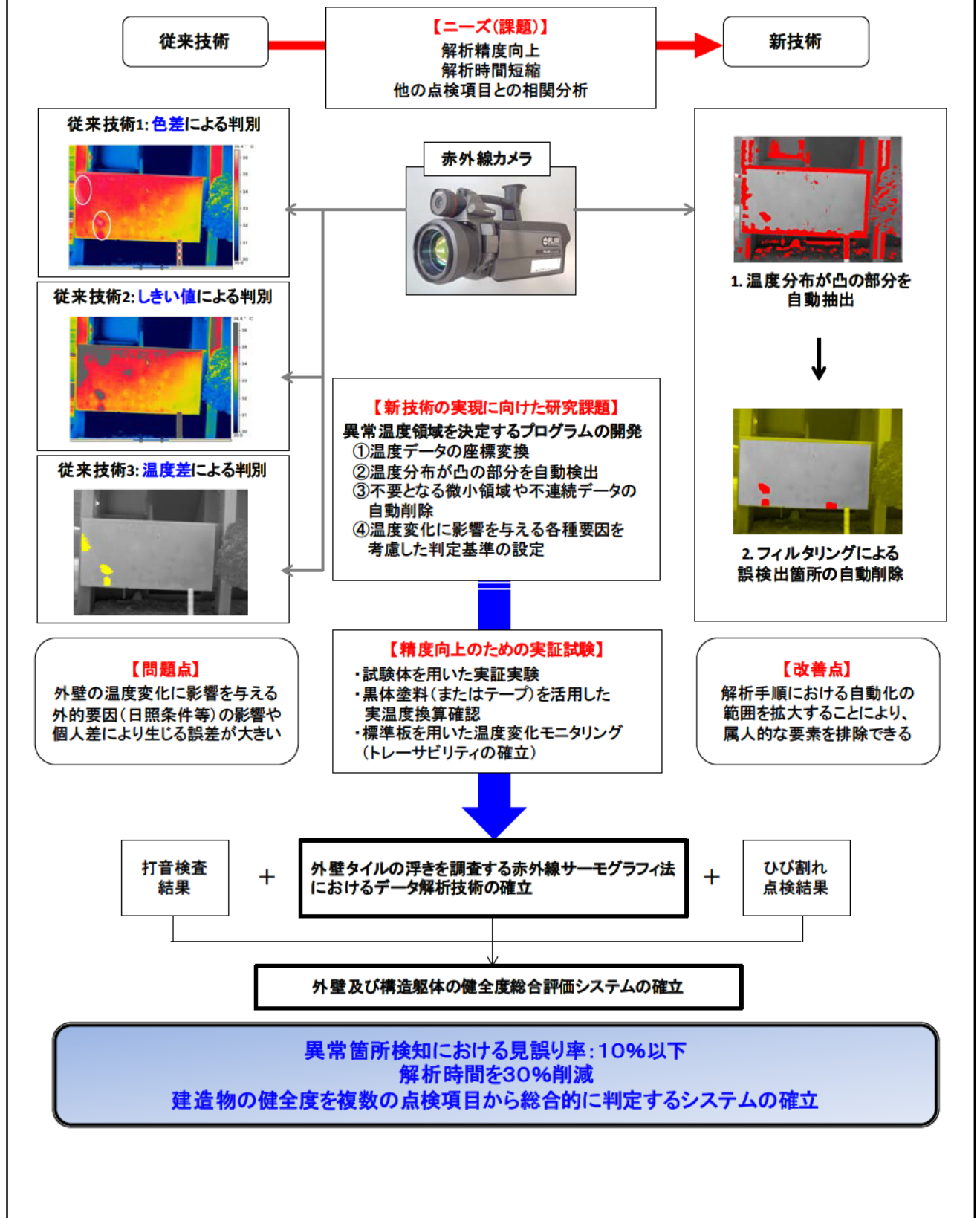
1-1-3 高度化目標

■非破壊検査技術の向上及び従事する者の技術水準の確保・向上

本研究開発では、異常箇所の検知精度を高め、見誤り率を10%以下（異常箇所の検知が難しいとされるアスロックパネルに関しては20%以下）にすることを具体的な目標とし、赤外線サーモグラフィで取得する熱画像データの新たな解析技術を開発する。また、赤外線データの解析手順を効率化し、解析にかかる時間の30%削減を目指す。

更に、従来の異常部を発見するだけの手法から、経時変化やひび割れとの相関的な位置関係の把握を可能にして、安全確保のために落下危険度診断技術を確立する。建造物を判定する評価技術において、従来は点検者の感覚に依存する部分が大きく、ひび割れ・浮き・内的条件等の不確定要因を個別に評価・判定しており、精度が悪かった。そこで、本研究開発では、建造物の健全度についてひび割れ・浮き・内的条件等の不確定要因を総合的に判定するシステムの確立を図る。

研究開発の概要



1-1-4 技術的目標値

■異常温度領域を決定するプログラムの開発

1. 赤外線温度データの座標変換による実寸法での評価機能の開発
2. 温度上昇時における温度分布が凸の部分抽出する検出方法の開発
3. 微小領域の除去機能と周辺部データ処理機能の開発

①異常温度領域の確定

- ・調査時の気象条件等に左右されないこと。
- ・解析者の資質に左右されないこと。
- ・経時変化を判断するに十分な精度を有していること。

②見誤り率の低減

- ・見落としの排除により見誤り率 25%以下。

③省力化

- ・解析時間の 20%低減。

FEM解析による浮き部深さ・温度差等のデータ集の作成

①見誤り率の低減

- ・データ集を活用した内部損傷以外の異常温度を排除することにより、前項と合わせて見誤り率 15%以下。

②深さの推定

- ・対象となる異常温度部の 95%に対して浮き部深さの誤差 $\pm 20\%$ 以内。

③省力化

- ・前項と合わせて解析時間の 30%低減。

■実証実験による壁面温度変化測定技術の確立

1. 実証試験用の試験体の製作
2. 黒体塗料（またはテープ）を利用して、実温度換算の確認
3. トレーサビリティの確立

①見誤り率の低減

- ・より正確にデータ集を活用できることにより、前項と合わせて見誤り率 10%以下。

②調査時の省力化

- ・調査時間の 5%低減（容易かつ短時間で温度変化等の状況を取得）。

③開発された手法の最終確認

■建造物の健全度評価システムの確立

1. 評価マトリクスと数量化理論の検証
2. 健全度評価システムの検証

①落下危険度診断技術の確立

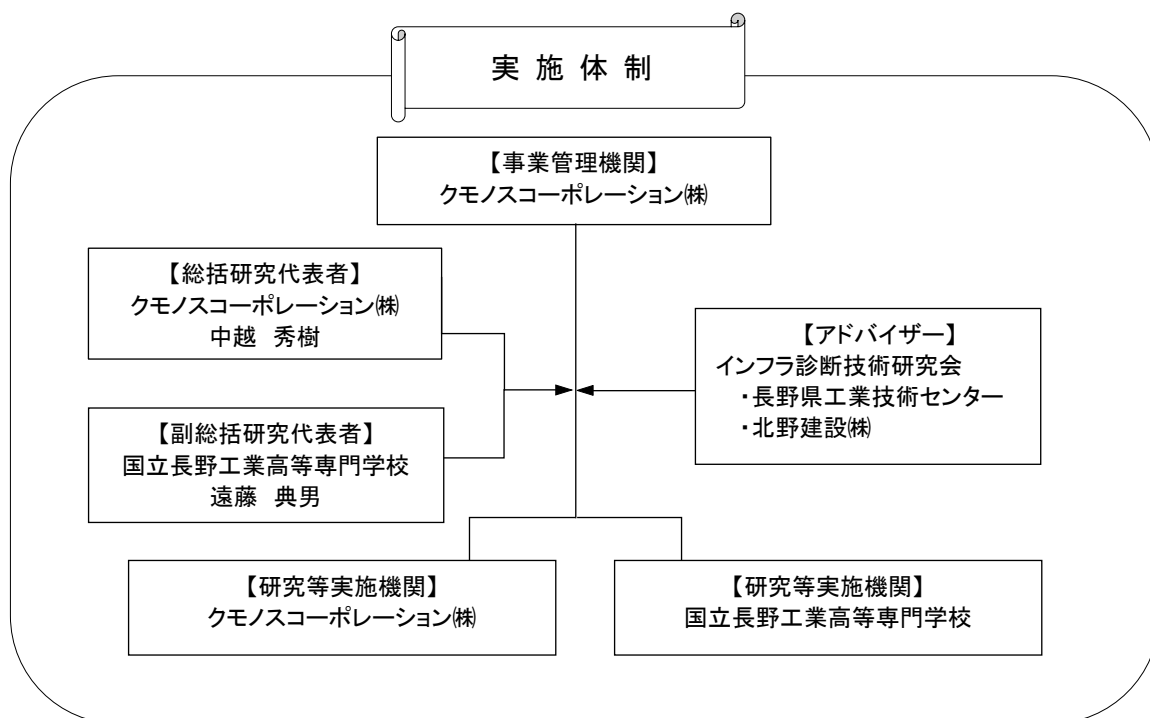
- ・経時変化やひび割れとの相関的な位置関係が把握できること。

②総合的な建造物の健全度評価技術の確立

- ・ひび割れ・浮き・内的条件等の不確定要因を総合的に判定できること。

1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)



1-3 成果概要

■異常温度領域を決定するプログラムの開発

1. 赤外線温度データの座標変換による実寸法での評価機能の開発

赤外線画像を座標変換する機能について、実施計画で定めた要件書の作成及び実装を完了した。座標変換により赤外線画像の歪みが補正され、正確な寸法・位置情報が把握でき、ひび割れをはじめとする他項目の点検結果（図面）との合成が可能となり、総合的な健全度判定を行えるようになる。

2. 温度上昇時における温度分布が凸の部分抽出する検出方法の開発

温度分布曲線が上に凸の領域を自動的に抽出して異常領域と判定する機能を実装することにより、実施計画で定めた解析時間の20%低減を実現した。温度上昇時に周囲と比較して温度の上昇幅が大きい異常領域の検出が自動化されることにより、従来の目視による判定で課題となっていた解析能力の個人差による誤差の発生を解消できる。

3. 微小領域の除去機能と周辺部データ処理機能の開発

異常箇所判定において無視できるサイズの異常箇所や不要で不連続な領域を処理データから自動的に除外する機能を実装した。除外エリア周辺部の異常温度領域か否かの見極めが除外エリア以外の温度データを用いて適切に行われる仕組みを構築したことにより見誤り率25%以下を実現した。

このプログラムにより、検出精度の向上と微小領域の除去作業を軽減することが可能になり、見誤り率の軽減と解析時間の削減ができた。

■実証実験による壁面温度変化測定技術の確立

1. 実証試験用の試験体の製作

温度変化に対して影響を与える様々な要因の解析及び要因毎の異常判定基準値の設定を行うにあたり、データ収集に使用する試験片と検証するための試験体を製作し、表面温度と内部温度の計測を実施した。

試験片は、異常箇所として空隙（断熱材）を複数の形状・深さ・配置パターンで組み込み、厚みの違う下地モルタルと組み合わせで計10種類を製作した。試験体はコンクリート壁、軽量気泡コンクリートパネル（ALCパネル）壁、押出成形パネル壁へ6種類製作した。

2. 黒体塗料（またはテープ）を利用して、実温度換算の確認

製作した試験片及び試験体表面に黒体テープを貼り、実温度換算ができることを確認した。実際の調査においても、黒体テープを貼ることで表面の計測時の温度変化をより正確に把握できるようになる。計測時、熱画像を撮影する最適な時間を事前に計算することで現場作業時間の短縮、解析精度の向上、見誤り率の低減にもつながる。

3. トレーサビリティの確立

試験片及び試験体を異なる環境下（異なる季節、異なる天候）で計測し、環境の変化をより正確に記録したデータ集を作成した。

温度変化に対して影響を与える様々な要因を有限要素法で解析し、異常箇所の深さ・温度等のデータ集を作成することを目指していたが、要素試験の結果、気象条件により生じる周辺部と異常部の温度差の変化が当初予定していた状態よりも複雑で、データ集とするよりも、調査時の気象条件を入力し、都度解析を行った方が合理的であることが判明したため、有限要素法の知識がなくても使用できる異常部とその周辺の温度差プログラムの開発に変更した。このプログラムは、解析対象の方位、調査地、季節、気温、風速、調査壁面の状態などから、浮きの広さ、深さによって異常部と周辺部の温度差がどうなるのかを推定でき、見誤り率の低減、解析時間の低減、異常部の深さを推定することができる。データ集からプログラムに変更したことで、より詳細な条件にも対応することが可能となり、解析結果の精度向上と推定に要する時間の短縮につながった。

異常箇所の検知が難しいとされる押出成形セメント板に関しては見誤り率20%以下を目標としたが、条件によっては、タイル張りのコンクリート板よりも温度差が生じることもある。

【公開版】

押出成形セメント板は平面が確保されているため、厚い貼り付けモルタルは必要がないのでセメント板同様、浮きを検出できる可能性は高い。ただし、計測可能な時間が短いため、タイミングを逃すと見誤り率が高くなる。

一方、軽量気泡コンクリート板（ALCパネル）は、コンクリートに比べ熱伝導率が低く比熱も小さい。FEM解析によると、厚さ方向には大きな温度差が生じるが表面に現れる温度差は、押出成形セメント板以上に小さい。このことから、他の要因による影響を大きく受ける材質であるため、赤外線サーモグラフィによる調査には適用できないことを確認した。

■建造物の健全度評価システムの確立

1. 評価マトリクスと数理化理論の検証

試験体の温度計測結果と有限要素法解析結果を比較し健全度評価の精度を検証した。

タイル壁面における温度センサーによる温度の実測値と赤外線カメラによる計測値の相関を検証し、赤外線カメラの撮影により浮きを検出できるシステムへの道筋をつけることができた。

2. 健全度評価システムの検証

建造物の管理レベル、補修・補強の履歴等による総合的な健全度評価を実施した。

タイル壁面に対する浮きの深さ、長さ、ひび割れの有無を考慮した健全度評価を提案することで、総合的な維持管理、補修補強を判断する指針の一助となりうる。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

クモノスコーポレーション株式会社

中越秀樹

TEL：072-749-1188

FAX：072-749-1818

E-mail：nakagoshi@kankou.co.jp

第2章 本論

要約

本報告書では赤外線法による外壁調査の新しく開発された空隙検出プログラムと、落下危険を判定する健全度判定システムについて記述する。空隙検出プログラムは計測された空間温度分布を数式化し2階微分値の負となる領域を空隙部と判定することにより、気象条件による検出領域の変化を従来の赤外線法に比べ大幅に減少した。また、要素試験のデータをもとにした有限要素法により表面温度分布の解析を行い、空隙の厚さ、深さ、大きさ、接着率などを変化させた場合の知見を得た。また、ここで使用した有限要素法を改良し、空隙表面とその周辺の温度差を調査時の気象条件から推定するプログラムを作成した。これにより最適調査時刻を決定するとともに、計測された空隙部とその周辺の温度差から空隙深さを推定し、ひび割れ位置との相互関係を考慮した健全度判定システムを開発した。

2-1 緒言

近年、建築物外壁が老朽化しタイル、仕上げモルタルが落下する事故が多発化する傾向にある。建設業界では平成20年の建築基準法に基づく定期報告制度の見直しが行われ、特殊建築物等は10年毎の定期報告時に外壁タイル等の「全面打診等（または赤外線）」によるタイル-躯体間の空隙（一般的に「浮き」と呼ばれる）の調査が必要となった。本来、この調査では、すぐに落下する危険のある部分と次回調査までの10年間の間に落下する危険に発展する可能性のある部分の判定が求められるはずであるが、打診においては単に他と違う音がする、赤外線においては周囲より温度が高いという定性的な判定方法で、定量的な判定基準がなく調査員の経験と勘に頼り、単に空隙が存在する可能性がある部位を報告するにとどまっている。このため、足場を組んでの調査後は、足場があるうちにという理由で危険に繋がらない部位の過剰補修、足場を組まないときは新たな足場費の問題から放置という状況になっている場合が多いと推定され、どちらも、安全性とコストに関して問題がある。

打診法と赤外線法を比較すると、打診法で全面打診するためには足場、ゴンドラ、高所作業車などが必須で安全対策費を含めコストダウンを図ることが難しいというデメリットがある。一方、赤外線法は、隣接する建物との間隔が狭い、樹木にさえぎられる、日射が無く風通しも極めて悪いために温度差が生じにくいなどの理由により適用できない箇所が存在するというデメリットがある。コスト面と安全性の観点から、現実には両者を組み合わせることが必要だと考えられ、少なくとも現段階で他の有効な調査方法が存在していないことを考えれば、これらの調査方法の改良が求められることは明白である。

今回は、この二つの調査方法のうち赤外線法に限定して研究を行った。従来、赤外線法は、熱画像（赤外線画像）を、解析者がそれまでの経験をもとに、汚れや影などの温度変化の生じる別要因が無い高温部を特定し丸印を付ける手法が主流である。この方法では、温度差を熱画像上での色合いの変化で認知するのであるが、人間の感性に頼るため、どうしても見落としが発生する。この問題に対し、数年前に判定を自動化するプログラムが開発された。このプログラムは、解析者が与える赤外線画像のピクセル間の温度差で判定を行い単純な見落としに対しては非常に有効であり、また異常温度部の形状や概略の面積を決定することもできる。しかしながら、与える温度差に物理的な根拠が無く、また、日射や風の影響で全体に温度勾配が付くと検出領域が大きく変化するという欠点があった。また、正対していない場合の画像はゆがむため、面積や形状の情報が正確ではない。

更に、赤外線画像の情報を最大限利用するためには、計測された温度分布を計測条件によらず評価する方法および、その評価基準を確立しなければならない。しかし、従来の経験と簡易な試験により定められた風速や気温変化幅での計測可能条件だけでは、このような評価基準を得ることは困難である。更に、赤外線カメラの分解能やS/N比（シグナル、ノイズ比）の問題があるため、計測可能な条件の把握と調査時の確認は重要である。

一方、落下危険性を評価するためには、落下する条件を検討しなければならない。当社の技術の一つであるKUMONOSによる正確なひび割れの情報が得られることから、このひび割れの情報と合わせて落下危険の有無を判定する健全度判定システムを従来より検討してきたが、本研究で得られる空隙の情報をもとに再構築する必要がある。更に、すぐに落下危険のない空隙部に関しては、安定しているのか、進行しているかが重要となるが、このためには経年変化のモニターが不可欠となる。

以上の状況から、

1. 検出された空隙部とひび割れ位置との正確な整合ができること。
2. 空隙の形状、面積が明確にでき、経年変化を追跡できること。
3. 調査可能条件を確定し、さらに調査時点で調査可能なことを確認ができること。
4. 健全度判定システムの構築により処置方法が決定できること。

を満たす調査手法を確立する必要がある。

2-2 研究開発の内容

2-2-1 研究概要

本研究においては、緒言に述べた目的を達成するため以下の研究開発項目を実施した。

■気象、調査員により変化しない判定結果が得られる空隙検出プログラム（以下検出プログラム）の開発

1. 赤外線温度データの座標変換による実寸法での評価機能
2. 温度上昇時における温度分布が凸の部分抽出する検出方法
3. 微小領域の除去機能と検出個所の情報表示機能

■天候、季節、調査面の方位を考慮した有限要素解析（以下 FEM 解析）

1. 解析モデル作成および検証
2. 空隙厚さ、大きさ、接着率、更に存在する深さによる温度分布変化の検証

■周囲との温度差推定プログラム（以下温度差プログラム）の開発

1. 解析モデル、日照データ作成
2. 天候データ入力部、解析結果出力部の作成

■上記有限要素法および温度差プログラムに使用する係数を決定するための要素試験

1. 要素試験片の作成
2. 黒体塗料を利用して、実温度換算の確認および検知精度の検証
3. 要素試験の各種条件下での計測
4. 太陽光吸収率、熱伝達率の決定

■実証試験による壁面温度変化測定技術の確立

1. 実証試験用の試験体の製作
2. 試験体の各種条件下での計測
3. 検出プログラムによる解析と評価

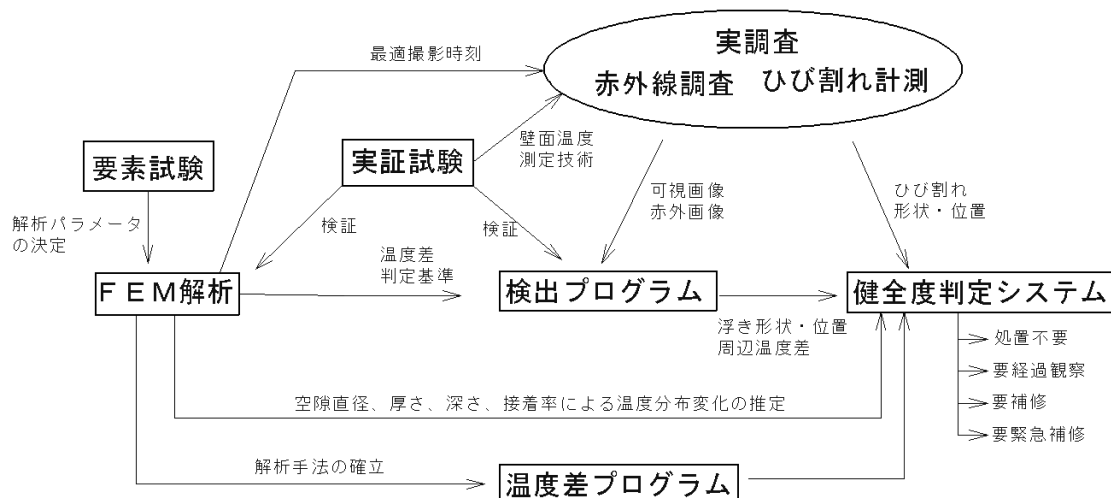
■KUMONOS によるひび割れ調査を組み合わせた建造物の健全度判定システムの確立

1. 強度検討
2. 健全度判定表の作成

■空隙の発生している実壁面調査による研究全体の検証

2-2-2 研究内容の相関関係

今回の研究内容の相関関係と、実調査との関係を以下に示す。



2-3 検出プログラム

2-3-1 赤外線法について

空隙の内部に存在する大気は、コンクリートやモルタル、磁器タイルといった外壁を構成する材料に比べきわめて熱伝導率が低い。従って、壁面表面で受けた熱エネルギーが、空隙の裏にある躯体やモルタル部へと流れる量が空隙のない部分に比べ少なくなり、その結果として空隙部の温度変化は早く、大きくなる。赤外線法は、この原理を利用して、壁面上の温度分布で空隙部を特定する手法である。

2-3-2 従来の検出法の問題点

従来の熱画像から空隙部を検出する一般的な方法は、赤外線サーモグラフィの画面（熱画像）から、周囲に比べ感覚的に高温となっている部分を抽出する方法と、近接する赤外線検知素子間（画像となるので慣例的にピクセル間という）の温度差を解析するプログラムによる方法があった。

しかし、どちらの方法も測定条件が変わると、空隙のある部分と周囲との温度差が変化するので普遍的な境界は得られない。後者のプログラムでの境界決定は、ピクセルで表現した一次微分値（傾き）と考えられるが、この値は全体の温度差に比例して変わるので、ある撮影条件では $0.1^{\circ}\text{C}/\text{ピクセル}$ が境界となることもあるし、 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{ピクセル}$ となることもあり得る。また、ピクセル間の距離と壁面上の距離は、撮影距離によって変化する。同じピクセル間で比較しても、実際には 1 cm の間の温度差であることもあるし、 5 cm の間の温度差を見ていることもありうるので、経時変化をモニターするには不十分である。

2-3-3 検出プログラムの機能

本プログラムの技術的な主要機能は、空隙部の検出であるが、サブ機能として熱画像および可視画像の遠近補正、可視画像の情報抽出、検出部と周囲の平均温度差表示が搭載されており、以下にその機能を詳述する。なお、ユーザビリティに関する部分は、本報告書では最小限の記述にとどめる。

2-3-4 本プログラムの検出法

3-2 節の問題点を解決する方法として、本プログラムでは空隙のある部分の温度分布を数式化し、その 2 階微分値をとることで境界を決めることとした。この方法では、境界位置で 2 階微分値が 0 となり、正負が入れ替わる。S/N 比や赤外線カメラの分解能の問題が生じない理想的状態においては、この方法であれば、絶対的な温度差の大きさに影響されないため、温度差が生じやすい条件であれ、生じにくい条件であれ同じ境界を決定することが可能である。厳密に言えばピクセルの間で温度差が 0 となるのだが、各ピクセル位置で温度計算し、高温部を抽出する場合には、二階微分値が負になる位置を抽出すれば、ほぼピクセル間距離の精度で境界を決定していることとなる。

数式化は、二次元平面上の温度分布とする方法と、直行する 2 つの一次元（ x 、 y ）上の分布をそれぞれ数式化してそれらの和をとる方法が考えられるが、取り扱いが容易な後者の方法とした。また、2 階微分値の正負のみの評価で絶対値は評価対象としないので、ベクトル和ではなく、単純な加算値で評価している。従って、 x 方向の温度分布関数を $T_x(x)$ 、 y 方向の温度分布関数を $T_y(y)$ とすれば、検出領域は次式で定義される。

$$\frac{d^2 T_x(x)}{dx^2} + \frac{d^2 T_y(y)}{dy^2} < 0$$

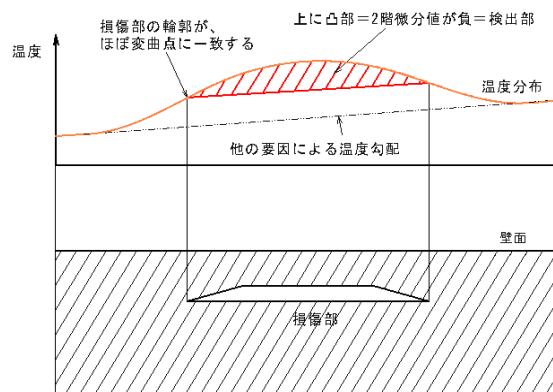


図 3-1 空隙検出の概念図

逆に、温度低下時の検出や、水の侵入による低温部は、下式の領域を検出すればよい。

$$\frac{d^2 T_x(x)}{dx^2} + \frac{d^2 T_y(y)}{dy^2} > 0$$

なお、熱画像には、窓や空など不要な情報も含まれるため、この検出は指定範囲内のデータのみを用いて行われる。

2-3-5 検出プログラムのサブ機能

■遠近補正変換

一般的に、熱画像を調査壁面に対して正対して撮影することは不可能である。高い位置の場合は見上げることになり、撮影可能な場所が必ずしも正面にない場合もある。このように撮影された赤外線画像は通常の可視画像（普通の写真）同様、近い部分が大きく、遠い部分は小さくなる。このように得られた画像を正対した画像に変換するには、単に実壁面上の矩形部を伸縮するだけで矩形にしたのでは正しい像は得られないが、実壁面上の矩形部が焦点を通り受光素子平面に投影されたものと考え、その矩形の長辺、短辺の実寸法を与えれば、得られた画像から実壁面上の正確な位置、形状が求められる。この件に関する数学的な取り扱いは、射影幾何学(ホモロジー)に関する書籍や画像処理の書籍等が詳しいのでここでは省略する。

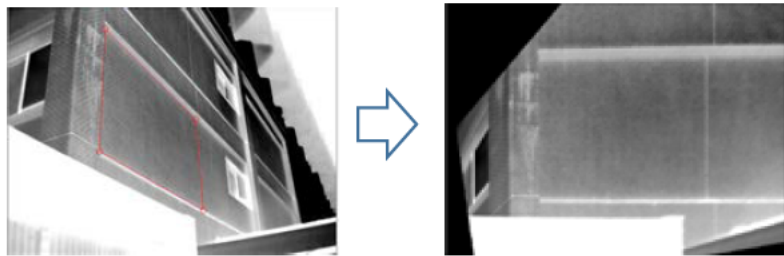


図 3-2 熱画像の遠近補正

これにより、検出プログラムで削除する微小領域の面積が撮影位置によらず普遍化されるので、経年変化のモニターには必要な処理となる。また、図面上に正確な転記ができ、ひび割れの情報との照合、正確な面積の測定も可能となる。

■可視画像の情報抽出

可視画像には、赤外線放射率が変わるために熱画像に影響する汚れや、一次的に太陽光吸収率に影響する色の变化、また、外壁診断に重要な情報となる白華、錆汁などの情報が含まれる。汚れは、赤外線法にとって最大のノイズとなるため、この影響の確認は非常に重要である。

これらの情報を見落としなく確認するため、コントラストの調整機能を付与した。また、更にこの操作が容易に行えるように、指定した矩形エリア内の RGB 値が最大幅となるようにした、自動コントラスト最大化の機能も有する。図 3-3 の右側の画像はコントラスト自動調整後の画像である。赤矢印の先は白華であるが、左側の調整前の可視画像とは異なり、明確に識別できる。経年変化を調べる際にも、新たな汚れが生じていないか確認する必要がある。

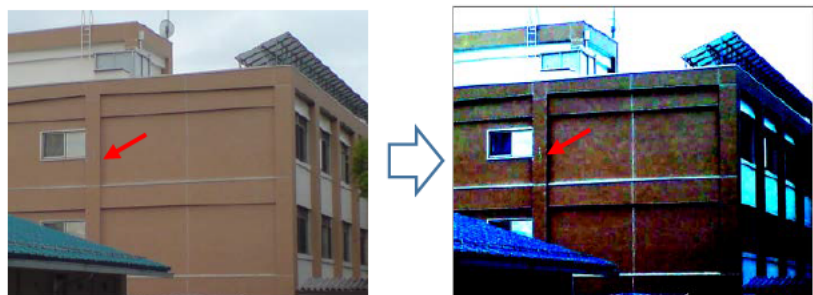


図 3-3 可視画像のコントラスト最大化

■検出部の情報表示

検出された領域内の平均温度、最高・最低温度と、検出された領域とその周辺部との平均温度差を表示できるようにした。この温度差も解析に指定された領域内のデータのみを使って行われる。この機能は後述する空隙の状態推定に利用される。

2-4 FEM 解析

2-4-1 解析の目的

落下危険を評価するためには、温度分布から空隙の状態を推定する必要がある。一般論として、温度分布に影響するのは気象条件の外的因子と、空隙の大きさ、厚さ、深さ、および接着率（検出された領域における、全体面積と剥がれずに付着状態で残っている面積比）の内的因子が考えられる。内的因子の影響は、面積が広ければ温度差はつきやすいなどの定性的な推定はできるが、各因子が変化すると壁面の温度分布にどのような変化が生じるかの知見は少ない。しかし、空隙の広さ、厚さ、深さ、および接着率を変化させた試験片を用意して、統一された条件下で試験することは膨大な手間がかかるために現実的ではない。一方、FEM 解析ならば、気象条件の統一は容易で、内的因子のみの評価が比較的短時間に行える。また、得られた解析手法により、実際の調査時の撮影最適時刻の推定や、調査時点の条件下での温度分布を推定することが可能となる。

2-4-2 解析内容

■解析手法

実際の壁面の温度変化は、外気温変化、空気の動きによって変化する熱伝達率の変化、日照によって生じる熱エネルギーの変化などの影響を受けるため、非定常解析の有限要素法を用いて推定することとした。FEM のソルバー（FEM 解析部）は、算生会の提供する 2 次元熱伝導解析ソフト「THERM2D」を利用した。実際 3 次元空間で生じている空隙の問題を 2 次元として扱うために、軸対象モデルを利用して解析を行った。これは、円形の空隙に相当する。実際の空隙は様々な形状をしており、この 3 次元解析を行うことも可能であるが、モデル化、解析ともに時間がかかり現実的ではないと判断した。

■解析モデル

FEM 解析に使用したモデルの一例を図 4-2 に示す。空隙の端部では、温度変化が急激になるので、細かく要素分割している。境界条件は、背面と周囲は断熱とした。タイルなどの物性値は一般的な値として表 4-1 の値とした。また、空隙は空気層として取り扱ったが、空隙の中での赤外線輻射による熱のやり取りは無視している。同じく、表面でも赤外線輻射の効果は無視した。また、要素試験と比較するときは、使用した発泡材の熱伝導率、密度、比熱とした。

なお、より詳細なメッシュによる解析を実施し十分精度が確保できることを確認している。また、解析を行う時間間隔については、30 分毎と 1 時間毎のステップで比較したが、大差がないため 1 時間のステップで行うことにした。

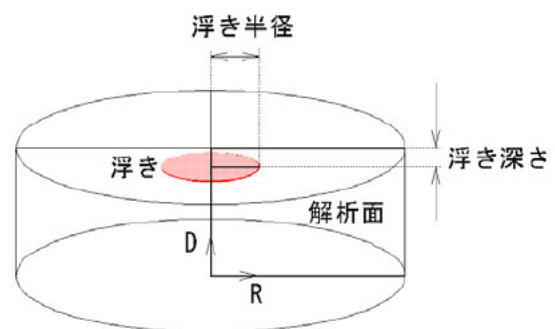


図 4-1 空隙の軸対象モデル

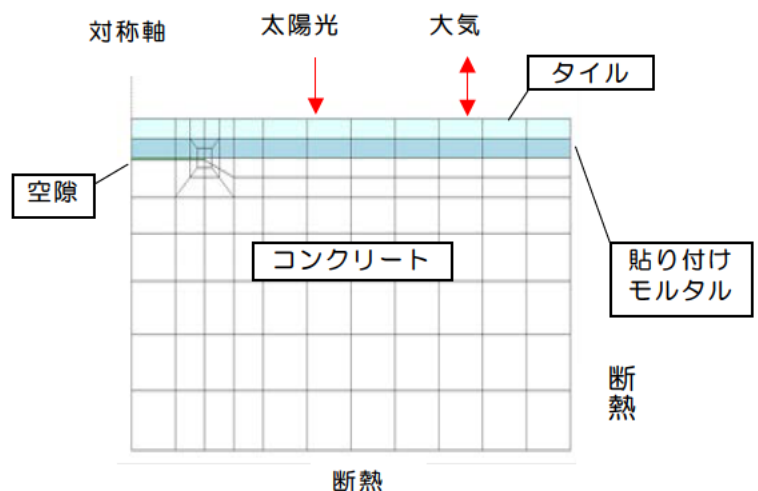


図 4-2 FEM 断面モデル

表 4-1 解析に使用した物性値

	密度 k g / m ³	比熱 J/kg deg	熱伝導率 W/m deg
タイル	2400	800	1.3
貼り付けモルタル	2100	800	1.5
コンクリート	2300	880	1.6
空隙（空気）※	1.205	1006	0.0257
空隙（発泡ポリスチレン）	20	1340	0.034

※空気は 20℃の値であるが一定としている。0℃、40℃において熱容量（密度×比熱）で 10% 弱の変化が見られるが、その他の部材と比べ体積が小さくほとんど影響しない。熱伝導率は 5-6% の変化であるが、本解析で要求される精度では、問題とならないと考えられる。

■日照データについて

日照データは、NEDO(国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合研究開発機構)の日射量データベースを利用した。このデータは、日別の実測値をもとにしているが、天候が大きく変化する日もあるので、出来るだけ安定した晴天のものを選定して使用した。曇りの日の推定は、壁面の太陽光吸収率を下げることで対応した。このデータベースでは、傾斜角や方位角の違う面への日射エネルギーを計算するサービスがあり、比較する長野工業高等専門学校（以下長野高専）の屋上に合わせたデータを取得し使用した。

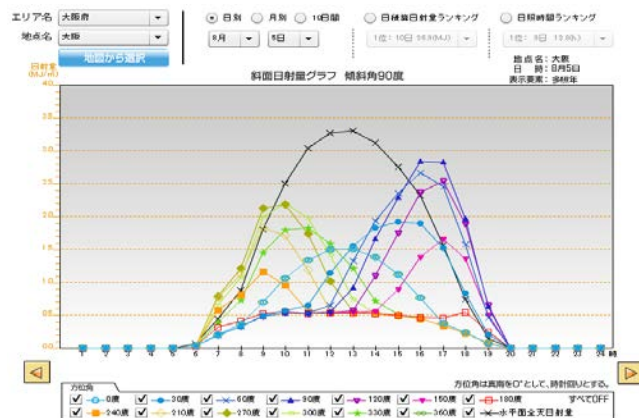


図 4-3 日射量データ（NEDO）

■太陽光吸収率

太陽光の吸収率については、文献 3 にタイルの反射率を実際に測定した値があるのでこれを参考とした。タイルの場合、透過は考えなくてよいので、

吸収率 = 1 - (反射率)

となる。この文献では無釉のタイル（16 個）施釉のタイル（17 個）の測定を行っており、吸収率は 0.271（施釉白色）～0.886（無釉濃赤）と広い。要素試験片の吸収率については試験結果と整合するよう決定することとし、その後の試験に関しては、要素試験片と照合することで吸収率を決定した。

■熱伝達率について

大気と調査壁面との熱エネルギーの伝わり方を決定する熱伝達率 h は、流入熱エネルギー Q 、断面積 A 、壁面表面温度 T_w 、大気温度 T_∞ とすると

$$\frac{Q}{A} = h (T_w - T_\infty)$$

で表せ、大気の流れに大きく左右されるが、自然の風の中の壁面上の流速を厳密に推定することは不可能である。そこで、風向風速から、壁面に対する垂直・平行成分を分離し、理想的な平面に対する推定値を求め、これに係数をかけて使用することとした。また、直接風の当たらない面も無風とはならないので、風速に係数をかけて壁面に平行な流れだけを考慮することとした。風速の垂直成分による熱伝達率を h_v 、水平成分による熱伝達率を h_h とすると

$$\text{風が直接当たる面：} \quad h = C_1 (h_v (v \cdot \cos \theta) + h_h (v \cdot \sin \theta))$$

$$\text{風が直接当たらない面：} \quad h = C_1 h_h (C_2 v)$$

理想面と実壁面の熱伝達の比率 C_1 、風を遮るものがない状況での風速と風の直接当たらない面における風速との比 C_2 に関しては後述の要素試験により決定した。

2-4-3 解析結果の一例

FEM 解析結果の一例を図 4-4 に示す。要素試験のように検証のために内部温度を計測する場合を除くと、この図のような断面の温度分布のデータは必要なく、表面だけのデータを使用することになる。図 4-4 中で最も濃い青の部分で 29.9℃、最も赤の濃い部分で 36.9℃、青、緑、黄色、赤の順で温度が高くなっていることを表す。

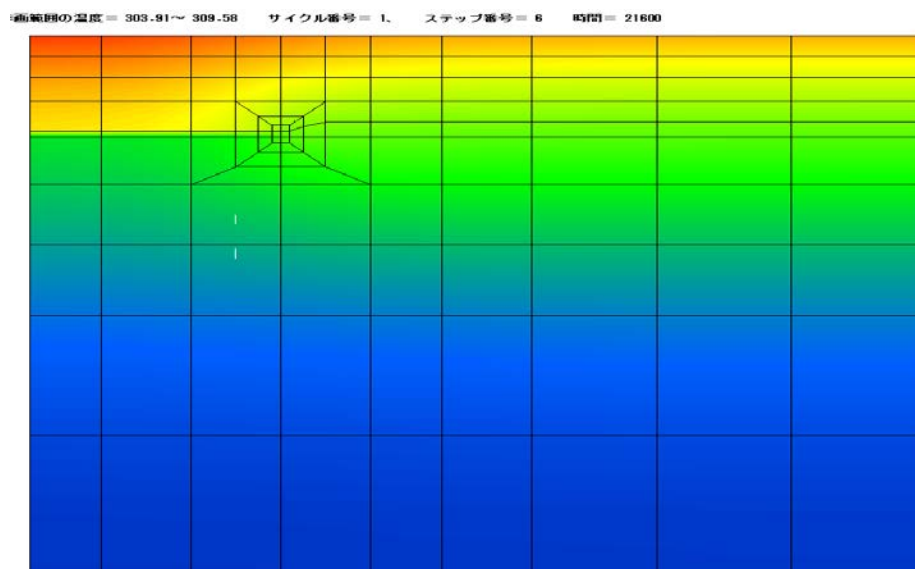


図 4-4 FEM 解析の一例（断面）

2-4-4 各種解析結果

■深さ、広さ（直径）と温度差の関係

実際にFEM解析を行い、深さと直径が変わると表面の温度分布がどのように変化するのかを確認した。図4-5は、直径100,200,500mmの空隙が、深さ10~30mmに存在するとしたときの空隙の表面部分の平均温度と、周辺部の平均温度の差の一例である。周辺部は幅100mmとしている。また、平均温度の計算には、対称軸から離れるに従い直径が大きくなる点を考慮している。生じる温度差は変わるが、気象条件や計測面の方位などを変化させても同様の傾向となる。空隙の深さが深い場合には、気象条件によっては小さな空隙が検出しにくい可能性がある。また、後述の接着率についても、空隙の面積と深さを考慮する必要があることが分かる。また、空隙深さが浅いと、空隙周辺の温度も上昇しているため、壁面における最高温度は温度差以上に大きく異なることが解析結果により得られており、注意する必要がある。

■接着率と温度差の関係

FEM解析モデルの空隙部の材料データを一部モルタルに置き換えることで付着部を表現し、解析を行った。ここで得られた周辺温度差と、付着部がない場合の周辺温度差の比をとると、図4-6のグラフが得られた。元の解析モデルの節点位置を修正していないので、空隙の小さいものでは計算できるパターンは限られたが、比較的ばらつきの小さな解析結果が得られた。図内の曲線は、2次の線形近似式によるものである。このグラフから、接着率と温度差比の減少が比例関係ではなく、付着部があると急激に温度差が減少することが読み取れる。このようなある一定幅が付着するとしたモデルではなく、均質に無限に細かい付着、非付着部を想定すると、熱伝導率の定義から接着率と熱伝導率は比例する。この仮定でも計算を実施すると、ほぼ非接着率と温度差は比例関係になる。

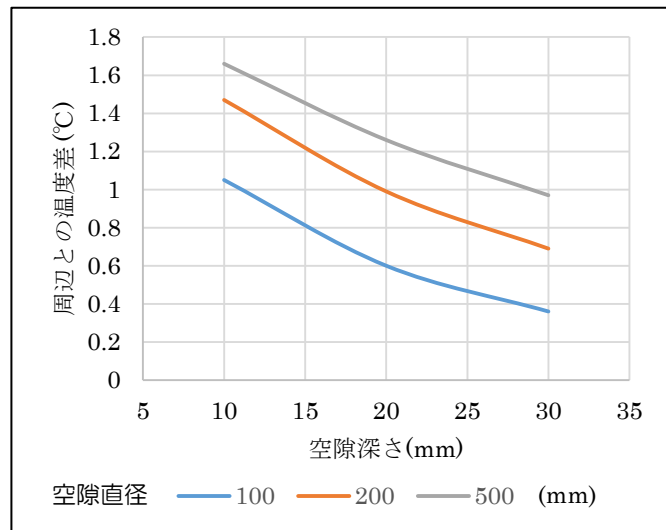


図 4-5 周辺温度差と空隙の直径、深さの関係

図 4-5 では表現されていないと思われるので、「この・・・づらいが」は不要では？
また、説明を加筆しましたので確認願います

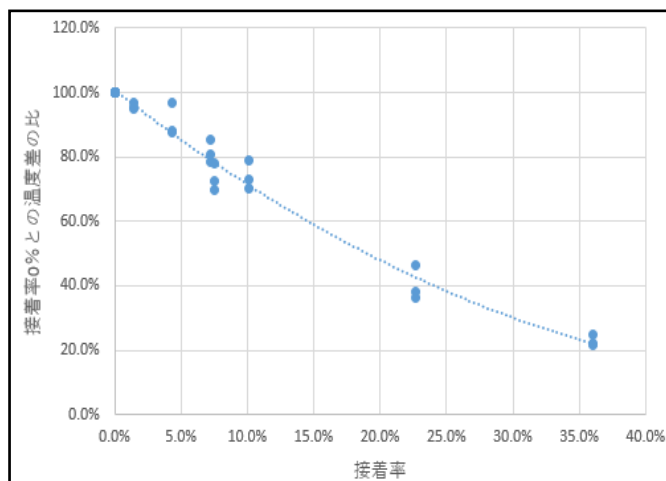


図 4-6 接着率と周辺温度差比の関係

■空隙厚さと温度差の関係

空隙の厚さを色々変化させた場合の、周辺との温度差を求めた結果の一例を図 4-7 に示す。図 4-7 の横軸は対数表記である。厚さを変更するには、広さや深さ同様 FEM モデルを変更する方法もあるが、因子を増やせば膨大な数のモデルを作成しなければならない。そこで、ここでは空隙部の熱伝導率と比重を変化させて解析した。上記までの解析で用いた 0.5mm 厚さをもとに熱伝導率は厚さに反比例、熱容量は比例関係とすればよいが、このプログラムでは熱容量を比熱と密度の積としているため、比熱は一定とし、密度のみを変更した。空隙厚さの減少によって、観測される温度差は明確に小さくなる。

なお、空隙が厚い場合は、内部で自然対流が大きくなるのでこの推定よりも実際の周辺温度差は小さくなると推定される。

■空隙深さと境界上での温度勾配の関係

深い部分に空隙があると観察できる外表面まで距離があるため温度が分散し、境界での温度勾配が相対的小さくなると推定されるので解析してみた。この結果を図 4-8 に示す。ここで縦軸は、境界での温度勾配と周辺温度差の比である。

空隙の厚さによる影響は誤差範囲内で直径は、検出プログラムにより検出された領域の最小幅などを仮定すれば既知となるので、このようなグラフから深さを決定することが可能となる。ただし、深さが深くなると変化が小さいので、精度が低下する可能性はある。また、複雑な形状の場合の取り扱いなどは更に検討する必要がある。この点については、実壁面の調査状況と合わせて考察する。

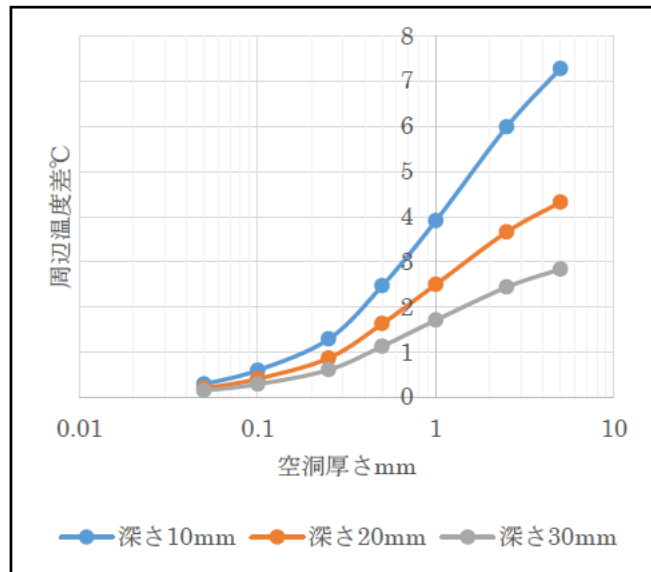


図 4-7 空隙厚さと周辺温度差比の関係

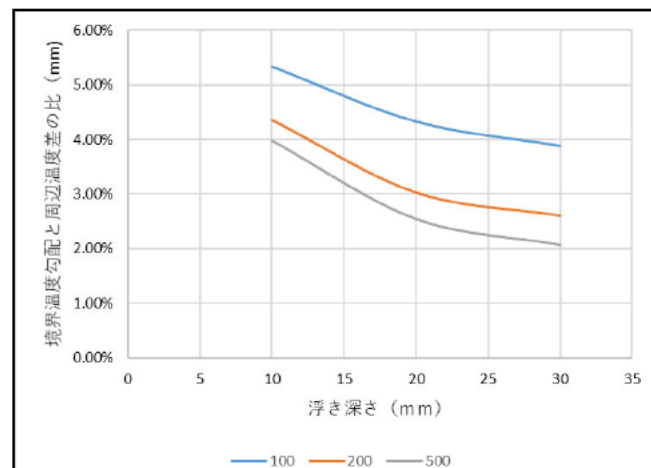


図 4-8 境界温度勾配と深さの関係

2-5 要素試験（屋上試験）

2-5-1 要素試験目的

RC（Reinforced-Concrete；鉄筋コンクリート）試験片では、空隙検出プログラムの解析パラメータの確認、温度差プログラムで使用する太陽光吸収率および熱伝達率に関する係数を決定する。また、ALC（autoclaved lightweight aerated concrete：オートクレーブによる軽量気泡コンクリート）、ECP（Extruded Cement Panel：押し出し成形セメント板）に関しては計測可能条件の検証を含めデータを取得する。

2-5-2 赤外線放射率の確認

物体表面から放射される赤外線エネルギーは物体表面の状態で決まる赤外線放射率によって変化する。この赤外線放射率は、既に赤外線放射率が既知の黒体テープで計測された温度から計算して求めることもできるが、ここでは、赤外線解析ソフト内で、同じ温度となるように赤外線放射率をトライ・アンド・エラーで求める方法を用いた。反射源温度は、反射源となる方位の空を撮影して求めている。反射源温度は、反射源からの赤外線エネルギーが問題で、実温度が問題となるわけではないので、赤外線放射率は 1 として求めている。

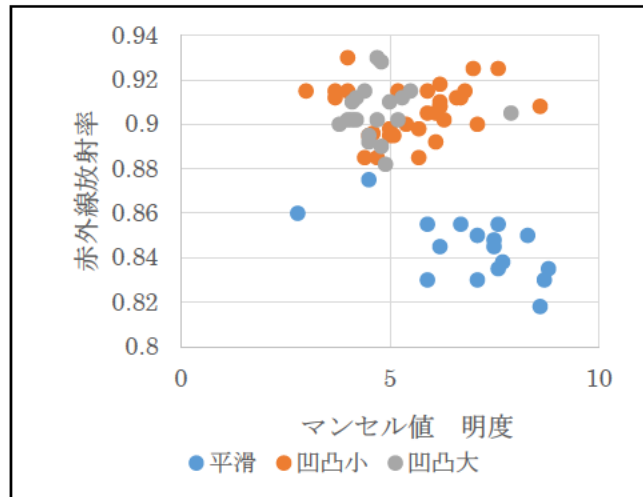


図 5-1 タイルの赤外線放射率

このようにして各種タイルの赤外線放射率を調べた。色はかなり濃い色から、ほぼ白まで、また表面の凹凸も平滑、大小の 3 種類で計 71 種類を測定した。ある程度、目視での推定ができないかを確認するために、マンセル値の明度で整理したのが図 5-1 である。平滑なものが全体的に低い、明度との相関関係は見られない。これは可視光と熱画像を取得する赤外線の波長領域が離れているために、ほぼ相関がないと推察される。経験的に調査時に濃い色の方が熱画像の温度が高く見えるが、これは赤外線放射率が原因ではなく、太陽光吸収率が高いため、実温度が上がっていると考えるのが妥当である。なお、この試験は無釉薬のものであるが、実温度を論じる場合には、同様に黒体テープ、黒体塗料の使用と反射源温度の確認が重要である。このことより、要素試験だけでなく、本研究ではすべて、黒体テープにより計測する対象の赤外線放射率を計測することとした。

2-5-3 試験片

■RC 試験片

表面は、タイルおよびモルタルの 2 種類、空隙深さはそれぞれ 3 種類、接着率 5 種類、また、配置パターンを変えたもの全 10 種の試験片を製作した。RC 試験片の形状、模擬空隙の形状、位置の一例を図 5-2 に示す。

5-2 項で明らかになったように、実温度で熱画像を読むために、黒体テープを空隙とできるだけ緩衝しない位置に貼り付けた。

試験片は、接着率や空隙部の深さを変化させているが、実建築物と比べると、躯体相当部の熱容量や、断熱はしたものの裏面及び試験片周囲から熱流入がある点が異なる。また、空隙部の実温を計測するために、熱電対を挿入し FEM 解析結果と比較できるようにした。

■ECP、ALC 試験片

ECP、ALC の試験片を図 5-3 に示す。表面のタイルを 2 種類、また、タイルの接着を弾性接着剤と、貼り付けモルタルの 2 種類、計 4 種類とした。空隙（模擬空隙）のパターンはすべて同じである。

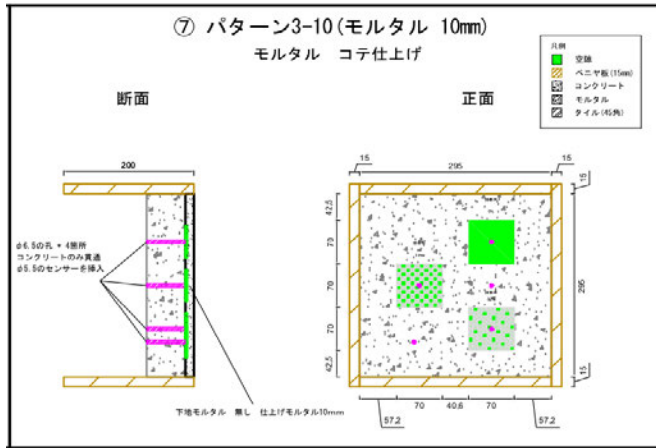


図 5-2 RC 試験片の例

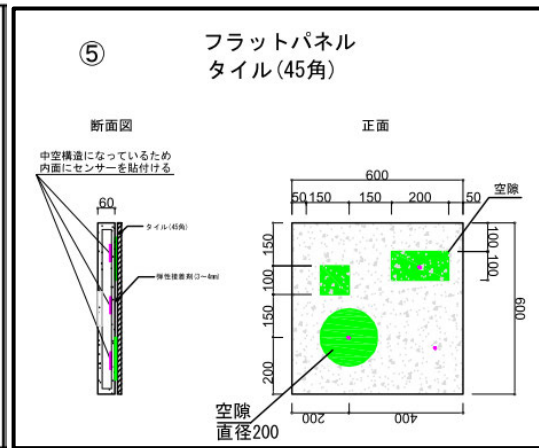


図 5-3 アスロック、ALC 試験片の例

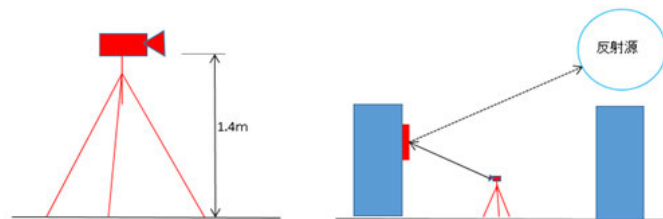


図 5-4 要素試験片設置位置とカメラの位置

■試験片の設置

長野高専管理・一般課棟屋上に設置した。設置角度は、設置建物の東西南北面に合わせたが、この建物の南面は、東側にほぼ 10 度回転した方角を向いているので、試験片も同様上から見て半時計方向に 10 度回転した向きになっている。また照り返しおよび反射の影響を抑えるために、図 5-4 のように設置、計測した。

図 5-5,5-6 に設置状況を示す。ALC,ECP 試験片は、表裏に配置しているため、片面が南向きの場合は、他の片面が北面となる。この向きは、適宜東西、および南北に変えながら計測した。



図 5-5 RC 試験片設置状況



図 5-6 ALC および ECP
試験片設置状況

2-5-1 計測

計測は、2015 年夏～冬と、2016 年春～夏に計 26 回、基本的に 7:00 より 17:00 とし、許される限り 1 時間毎に行った。計測は、熱電対による内部温度、赤外線画像撮影であるが、計算と比較するためなので、黒体テープ、反射源温度の撮影により赤外線の温度データは補正した。また同時に、風向、風速、気温、天候を記録した。

2-5-2 試験結果

■RC 試験体の計測結果

計測されたデータより、熱伝達率を決定する係数および太陽光吸収率を決定した。この結果による試験値との比較を図 5-7、図 5-8 に示す。表面がタイルのもので太陽光吸収率は 0.21、モルタルのもので 0.36 としている。計算結果の曲線が変わっているのは、両者の太陽光吸収率が約 2 倍近くも異なるため、太陽の影響と外気温の影響のバランスが異なるためだと考えられる。また、熱伝達率に関しては、 $C_1=1.0$ 、 $C_2=0.65$ の熱伝達率とするのが最も良い結果となった。ただし、試験片は実際の壁面に比べ小さく、容易に風が巻き込むので C_2 に関しては留意する必要がある。この図 5-6、図 5-7 において、12:30 頃の測定値（赤枠）が大きく異なるが、太陽に雲がかかったためではないかと推測される。太陽光で気温よりもはるかに高い温度となっていたため、一瞬の陰りで急速に温度低下が生じたと考えられ、実際の調査時も十分注意する必要がある。更に風速が、4m を超すと誤差が大きくなる傾向があり、特に太陽光が当たっていないときは顕著になる。北面の調査では、計測に際して十分な注意が必要である。

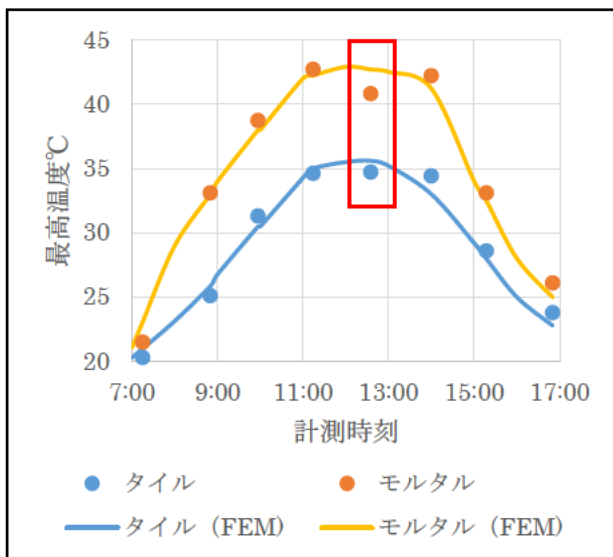


図 5-7 要素試験結果の一例と FEM 解析結果の比較（最高温度）

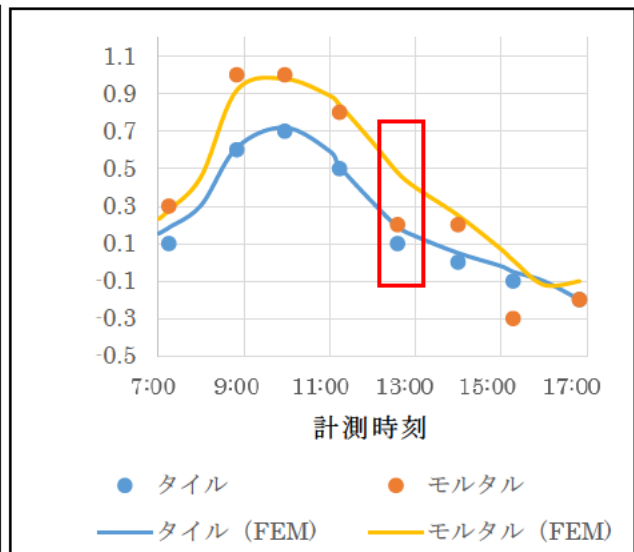


図 5-8 要素試験結果の一例と FEM 解析結果の比較（周辺温度差）

■ALC,ECP 試験片の結果

ECP 試験片は RC 同様に空隙の検出が可能であった。これは、タイル直下に空隙があるため空隙より表面側の熱容量が小さいことと ECP 自体の厚みが薄いことによる熱容量の小ささが相殺されたと推定される。条件によっては、タイル張りの RC よりも温度差が付くこともある。実際でも、ECP は平面が確保されているため、厚い貼り付けモルタルは必要がないので RC 同様検出できる可能性は高い。ただし、計測可能な時間は短い。

一方、ALC は、RC に比べ熱伝導率が低く比熱も小さい。FEM 解析によると、厚さ方向には大きな温度差が生じるが表面に現れる温度差は、ECP 以上に小さい。このことから、他の要因による影響を大きく受ける。図 5-9 は ECP、図 5-10 は ALC の要素試験の検出プログラムの実行結果の一例で、左から 2,4 枚目が弾性接着剤、1,3 枚目が貼付けモルタルによるものである。これを見る限り、ALC に弾性接着剤を使用したものは、検出が難しいことが分かる。これは、接着剤の粗密の影響を受けたのではないかと推定される。

図 5-11 は温度差プログラムによる推定値の一例である。RC と ALC は温度差の大きさが異なるが、変化の傾向は近いものとなった。一方、ECP は若干異なる結果である。ECP が熱容量の差だけなのに比べ ALC は熱伝導率も下がるため、RC と同様、深い位置の温度変化が遅いためだと考えられる。

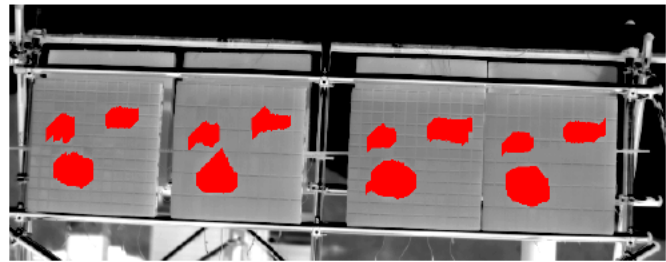


図 5-9 ECP 要素試験片の検出例

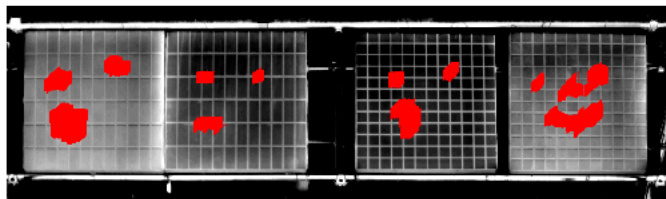


図 5-10 ALC 要素試験片の検出例

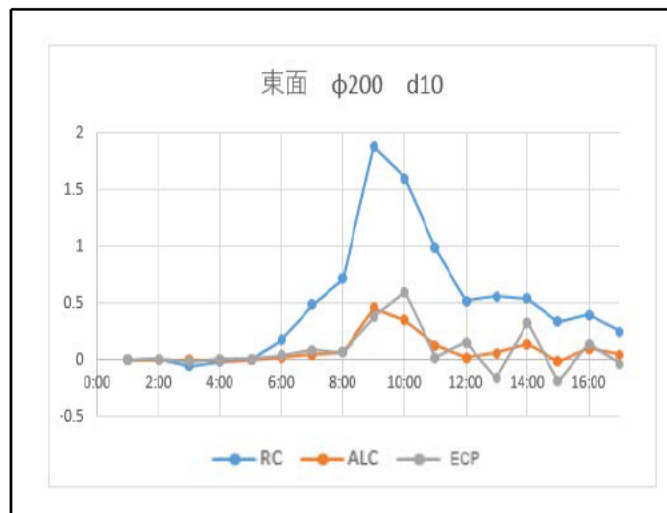


図 5-11 要素試験片の温度差推定例

■接着率の検証

要素試験において空隙を表現するため接着率 20%～80%の孔を有する発泡材をコンクリート板と下地モルタル界面に接着した。このうち、接着率 40-80%の部分はまったく温度差を検知できなかった。接着率 20%の測定データを FEM 解析で得られた接着率と周辺温度差の関係図に重ねたものが図 5-12 である。赤矢印が、計測結果である。まったく均質に細かく分布した接着率モデルでは、熱伝導率が非接着部の面積比に比例して、20%の接着率では 80%程度になるはずであるが、FEM モデルよりも接着部の大きさは小さく分散している可能性が高いにもかかわらず、FEM の結果と概ね一致する。このことから、実際に、空隙が分散しているような場合は、接着率の上昇に伴い急激に温度差が減少するということが分かる。

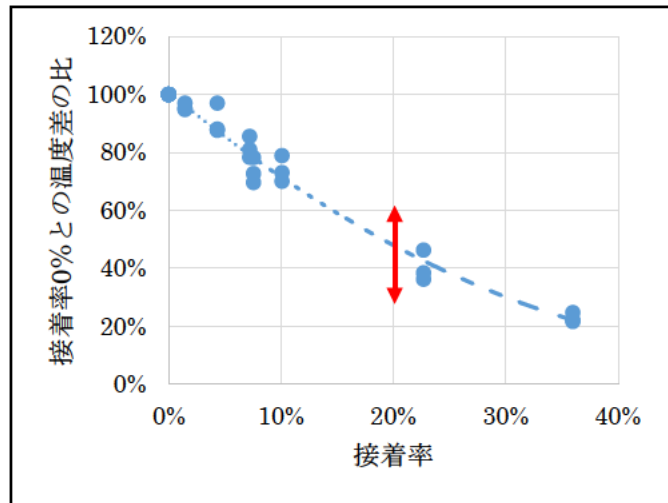


図 5-12 要素試験片の温度差推定例

2-6 標準板

安定した気象条件下では、温度差プログラムにより、熱画像撮影時が十分な温度差が得られているのかが分かるが、実際には、太陽が雲に覆われたり、風向、風速が安定しない場合も多い。そこで、要素試験片同様、空隙を模擬した標準板を製作し、空隙がある場合に十分な温度差が得られることを確認できるようにした。空隙の深さや大きさを各種作成するのが最も良い方法であるが、実用性に乏しくなるので FEM の結果と照合させることで気象状態の補正を行う方法をとることにした。この標準板を各方位面に置き熱画像を建築物の健全部と同時に赤外線撮影することで、それぞれの温度変化が分かる。これにより、温度差プログラムの結果を補正することが可能で、より高い精度で調査ができるとともに、気象条件による見落としを大きく軽減することができた。

2-7 実証試験（中庭壁面試験）

2-7-1 試験の目的

温度差プログラム及び空隙検出プログラムの妥当性を検証する。また、気象条件と見誤り率を確認する。また、要素試験同様、ALC、ECP についても計測可能性を確認する。

2-7-2 試験体

長野高専機械工学科棟 2, 3 階の壁面に人工的な剥離状況を製作した。設置は東西南北のコンクリート躯体上の 4 面と、西面にある ALC 部、南面にある ECP パネル部とした。この建物は、上から見て半時計方向に 10 度回転した向きになっている。模擬した空隙の形状と計測のイメージを以下に示す。なお、躯体上に空隙を模擬した発泡材 0.5mm 厚さを貼り、この上から 10mm のモルタルを乗せ、更に厚さ 8mm のタイルを貼り付けている。

2-7-3 試験内容

午前 7 時より可能な限り 1 時間毎に、熱画像の撮影および試験体内の熱電対、気温、風向風速などを記録した。図 7-1、7-2 に試験体の形状と模擬空隙形状、図 7-3 に配置を示す。

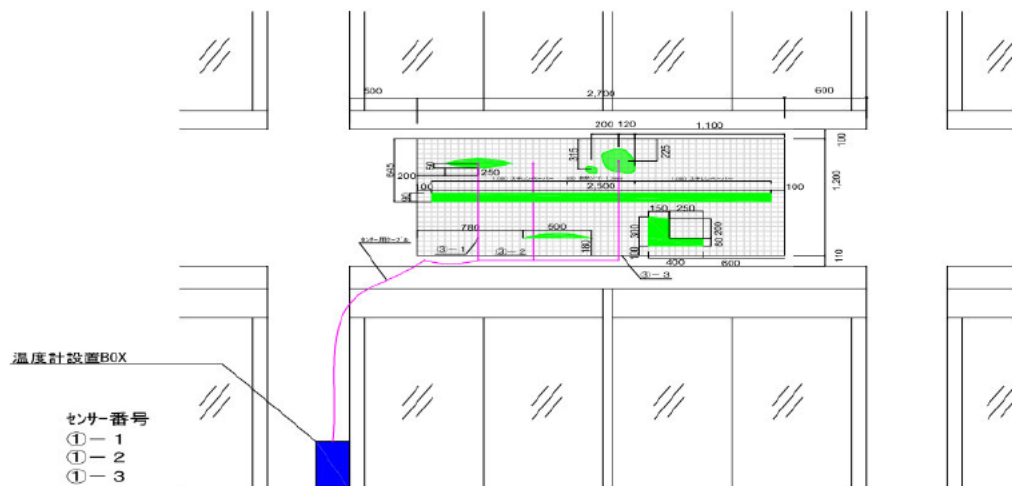


図 7-1 中庭壁面試験体
(RC:東西南北、ECP:南、ただし空隙配置は上図と左右反対)

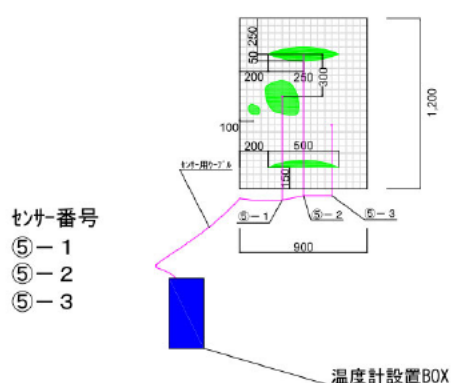


図 7-2 中庭壁面試験体（ALC：西面）

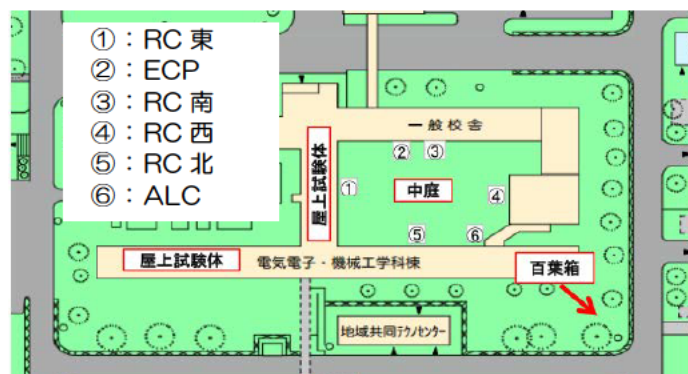


図 7-3 中庭壁面試験体配置

2-7-4 試験結果

■RC 部の見誤り率

以上の試験結果より、見誤率を求めた。

見誤り率は、見落とした面積 S_p と無いのに有りとした面積 S_a を実際の空隙面積 S_c で除して計算し、代表空隙での周辺との温度差で整理した。

$$\frac{S_p + S_a}{S_c}$$

代表空隙は、赤矢印の模擬空隙とした。見誤りには、検出個所の面積相違、空隙の検出漏れ、空隙のないところの検出があるので、この和を設置した模擬空隙の総面積で割ることで求めた。ただし、北面には汚れと思われる部分があり、この位置の検出は無視した。

（近傍位置の空隙の検出にも影響が出たが、これは加算した。以上により、代表位置温度差が 1.0°C 以上であれば、見誤り率は 10% 以下となる。

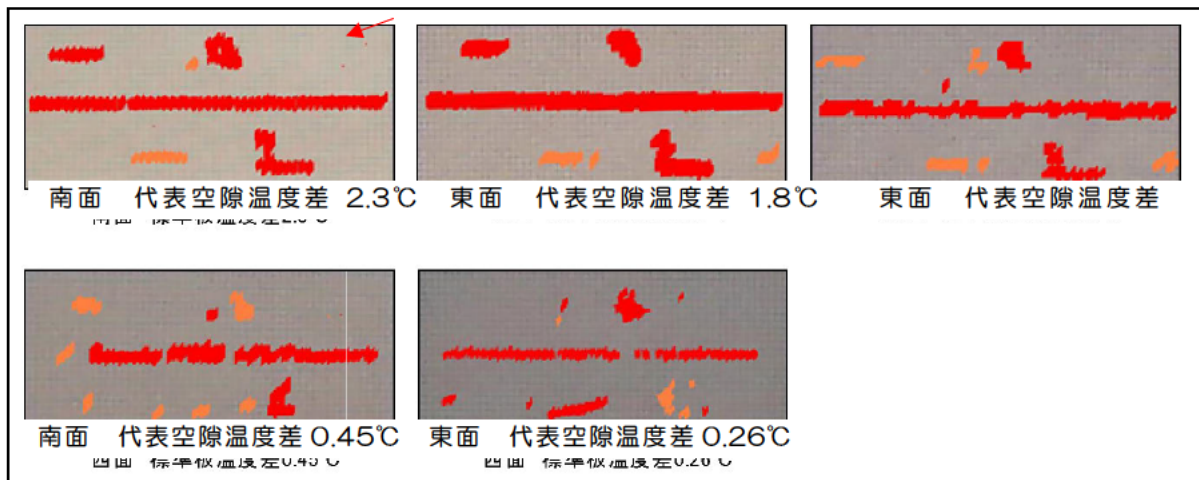


図 7-4 標準板温度差と検出結果例

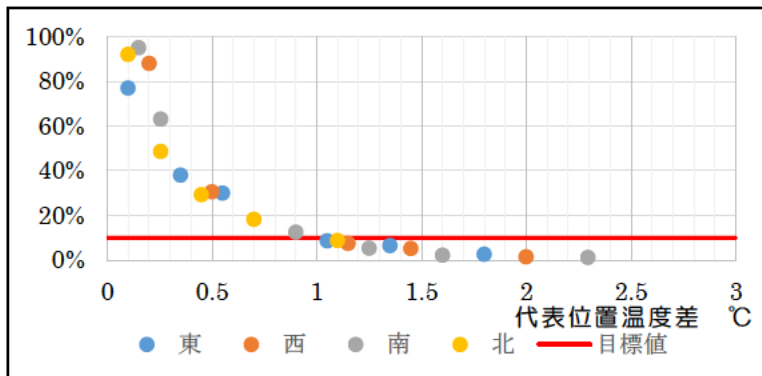


図 7-5 見誤り率と代表位置温度



図 7-6 高コントラスト化した北面の汚れ

■ECP 部の結果

ECP は要素試験でも確認した通り、温度差はある程度小さいが、温度差のつき方は RC に近い。良好な精度でデータが取得できる時間は短いが図 7-7 に示すようにある程度、浮き部の大きさが存在する場合であれば検出可能であった。図 7-8 に南面の RC と ECP の検出個所の代表空隙周辺温度差を示す。この面は南面なので代表空隙温度差が 1℃以上の時間は比較的長いが、RC が約 3 時間なのに対し、ECP では約 1.5 時間と半減している。また、図 7-9 と赤外線画像の変化を示す。この赤外線画像はすべて温度幅を 2℃としている。ECP は空隙と関係ない温度ムラが比較的大きく、13:00 の ECP の見誤

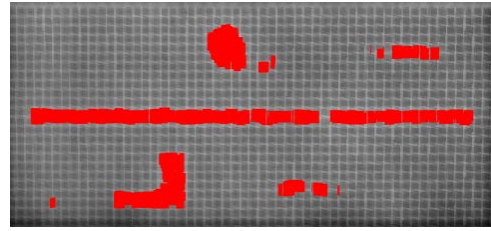
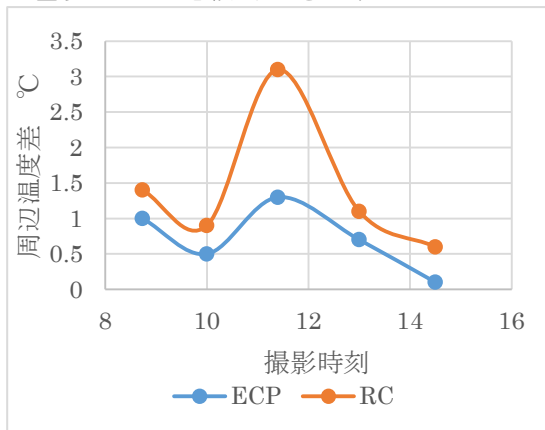
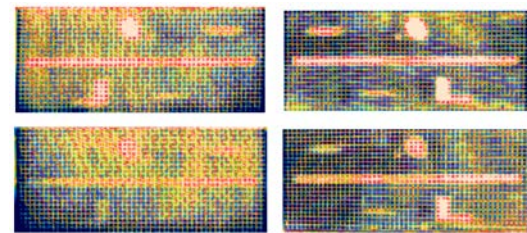


図 7-7 ECP 検出結果



り率は 40%である。



ECP	RC
上 11:30	上 11:30
下 13:00	下 13:00

図 7-9 ECP と RC の熱画像比較

図 7-8 ECP と RC の周辺温度差

■ALC 部の結果

ALC の熱画像の一例を図 7-10 に示す。模擬空隙は図 7-2 に示すとおりであるが、全ての計測時においてまったく確認できない。図 7-10 は秋の 15 時のものであるが左側の低温部には隣接する北面の陰で日射も当たっていない上、図 7-3 に示すように北面との入角部になっており風の流れも悪く、条件は悪い。しかし、日射が当たっている部分ですら確認できず、他の時刻、季節のものでも同様検出可能な温度差が生じている熱画像は撮影できなかった。このことより、ALC に関しては、赤外線での外壁調査は、困難と考えるべきであろう。

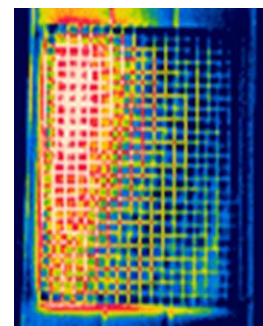


図 7-10 ALC の熱

■推定温度差と実測値比較

屋上試験片のデータから、太陽光吸収率、熱伝達のパラメータを決定し壁面試験片で比較を行った。その結果、周辺の温度差で+50%、-20%の誤差が生じた。見誤り率がプラスの場合に関しては、推定の FEM 要素モデルムが円形なのに対し、模擬空隙が様々な形状を

【公開版】

しているため、長い形状でも幅を直径とした円と比較したためだと考えられる。一方、マイナス側は主に天候によるものと考えられる。特に、晴天とはいっても、雲がかかることがあり、また、風も安定しないことが要因と考えられる。

2-8 健全度判定

健全度判定は、空隙とひび割れ、目地などの相関関係から行う。空隙、ひび割れとも通常複雑な形状となるため一般化が難しい。そこで、簡単なモデルを作り、安全側に評価できる基準を設定することとした。

2-8-1 空隙の落下危険基準

現状で小さな衝撃力等が作用した際、直ちに落下する可能性がある場合には「要緊急補修」、新たに、ひび割れが発生した時にタイルの空隙部が落下する可能性がある場合に「要補修」とする。新たなひび割れの発生は、最も危険な箇所にできることを想定する。ひび割れの発生原因は、地震や地盤沈下による建築物の変形や、空隙に侵入した水の氷結など様々なものが想定できるが、ひび割れの発生を一般的に推定することは困難であるのでここでは考察しない。さらに、次回定期診断までの間に要緊急補修や要補修となる可能性がある箇所を「要経過観察」とする。また、風力は空隙に風が流れ込む状況にない限り大きな力とはならないので、外力に関しては地震力を想定する。ただし空隙に風が流れ込む状況は別途検討する。

2-8-2 強度計算

■地震荷重の設定と安全率

水平方向の地震荷重として建築基準法 1981 年改正の原則値 0.2G を採用する。安全側となるので地域係数は無視した。

■許容応力

一般的な良質なコンクリート（呼び強度は 18[MPa]程度）における引張強度： f_t は、呼び強度の(1/10)程度であり、1.8[MPa]程度の値となり、曲げ強度 f_b は呼び強度の(1/5)～(1/7)程度で、2.6[MPa]～3.6[MPa]と考えられる。一方、壁面で空隙が発生しているコンクリートでは劣化・損傷している可能性が高いと想像され、強度低下が著しいと思われる。このような見地から、下地調整やタイル張り付け兼用モルタルの圧縮強度： f'_c は、一般的には先述した良質なコンクリート強度よりも小さいものが用いられると想像され、かつ劣化損傷の影響を考慮し、引張強度を 0.9[MPa]程度と仮定する。

ここで、コンクリート構造物に対する設計法として用いられてきた許容応力設計法では、コンクリートに対する安全率を 3 と、地震時における安全係数の割り増しを 1.5 とし、さらに、タイル張り壁面における、風圧の影響、ねじり、タイル面における引張力の影響を勘案し、安全率をさらに 2 割増し、タイル壁面の落下に対する引張力、すなわち付着力に対する許容応力： f_t を

$$f_t = 0.9 / 3 / 1.5 / 2.0 = 0.10 [\text{MPa}]$$

と仮定する。

■外周が完全に切れている場合の落下条件

外周が完全にひび割れや目地で囲まれた状態を想定する。この場合、接着率がどこまで低下した場合に、地震により落下するのかを求める。計算を簡単にするため、モーメントおよび、ピーリングによる応力集中は考慮しない。また、ひび割れの場合、ひび割れ面同士はひっかかりも考えられるが、安全側となるのでここでは、完全に切れている（周囲からは力を受けない）というモデルとする。この仮定により単純に 0.2G の引張力が作用することになるが、この引張力は空隙深さ（ひび割れ面の深さ）によって異なる。タイルおよび貼り付けモルタルの比重 ρ を 2.3[g/cm³]とすると、空隙深さと、ひび割れ面に作用する応力を許容応力で除した値の関係は図 8-1 のようになる。この結果は、1%以下の接着率でも落下しないということを表している。

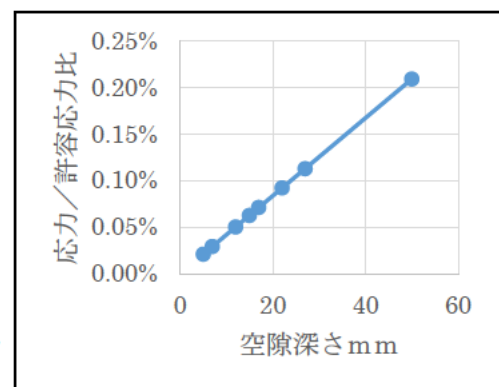


図 8-1 空隙の深さと応力

【公開版】

重心から離れている箇所がわずかに接着しているような状況ではモーメントが発生するが、このような接着状況では熱画像ではやや狭い範囲の空隙と判定されるのだけなので、この仮定で問題ないと考えられる。

■完全に剥がれている場合の落下条件

完全に剥がれている場合の、地震時における空隙部分のモデル化を行う。このモデル化では空隙を梁と仮定して、地震により水平荷重 $0.2G$ が作用する場合を等分布荷重が満載された状態とし、曲げ応力が許容曲げ応力を超えた場合に落下すると考える。この梁のモデル化は安全側となるように、目地、ひび割れとの相互関係から支持条件と梁の長さを決定する。長さや支持条件を表 8-1 に示す。表ではひび割れ数としたが、目地も含む。なお、幅は単位幅とすればよい。

表 8-1 支持条件と梁の長さ

空隙に接したひび割れ数	ひび割れと空隙の位置関係	長さや支持条件
0 (ひび割れ無)		L1 両端固定
1 本		$L1 > L2 / 6$ 場合には $L1$ の片持ち梁 $L1 < L2 / 6$ 場合には $L2$ の両端固定
平行 2 本		L の両端固定
交差 2 本		L2 の片持ち梁 ($L2$ はひび割れと空隙の境界との二つの交点を結ぶ直線とひび割れの交点の距離)
3 本		L2 の片持ち梁

※ $L1$ は短辺側の最大長、 $L2$ は最大長

前頁 $L(m)$ に対して、空隙深さを $D(m)$ 、 ρ をタイル、貼り付けモルタルの密度 (kg/m^3)、 $g = 10 (m/s^2)$ とすると、最大応力 σ_{max} (MPa) は、

$$\sigma_{max} = \frac{6\rho}{D} L^2 \times 10^{-6} \quad (\text{片持ち梁})$$

$$\sigma_{max} = \frac{\rho}{D} L^2 \times 10^{-6} \quad (\text{両端固定})$$

で与えられる。

■空隙深さと許容応力を超える長さについて

空隙が浅い位置にあるほど危険であり、通常のタイルでは最も薄い 7mm が空隙の深さの最低限となる。この場合でも、許容応力を超える長さは両端支持の場合 770mm、片持ち場合、320mm となる。このような大きい空隙を検討対象とするので、最低空隙厚さはひび割れの補修基準でもある 0.2mm と仮定し、この時に推定される温度差を基準値とする。ただし、ここでは、タイルの厚さを 10mm として次章の温度差プログラムにより基準値を求め、太陽光吸収率や熱伝達率による誤差を考慮し、この基準値の 1/2 までの温度差を有している場合は、タイルと貼り付けモルタル界面の空隙、これ以下の場合は、貼り付けモルタルと躯体界面の空隙と考える。温度差は 10mm としたが、強度計算は、7mm (70%) で行うことで、安全側の基準とする。貼り付けモルタルと躯体界面の場合は、図 4-5 から基準値の 1/2 としたことから解析対象領域が $\Phi 200mm$ の場合でも深さ 30mm に相当し、対象が更に広い場合は空隙が深い位置になるのでタイルと貼り付けモルタル界面と同じく 70% 厚さ相当と考え、強度計算での空隙深さは 20mm とする。この場合、許容応力を超える長さは両端支持の場合 1110mm、片持ち場合、520mm となる。また、基準温度の 10% 以下の場合は、少なくとも部分付着していると考えられるので空隙とはしない。

■風の影響について

空隙厚さが、空隙深さを超えない限り、空隙の中に風が直接吹き込んだり、風が空隙の中を完全に流れたりすることはないが、本年の 8 月に台風 9 号の影響でタイルが剥がれ落ちる事故が起きている。建築物の安全性に対しては、風圧の記述はあるものの外壁をはがす力は負圧によるものと考えられ、このことに対する記述が見つからなかった。そこで過剰にはなるが、低レイノルズ数で平板に作用する空気力をベースに検討する。この文献は各種レイノルズ数で測定を行っているが、迎角 2 度で、揚力係数 C_L が 0.2 は超えていない。300mm の空隙でも、10mm 以上の空隙がないと迎角 2 度にはならないが、この $C_L = 0.2$ で計算すると単位面積当たりの揚力 F は、空気密度を ρ_{air} とすると次式となる。

$$F = \frac{1}{2} C_L \rho_{air} v^2$$

揚力 F は風速 30m では 113N/m²、60m では 450N/m² になる。これは、地震荷重に比べ 5 倍から 20 倍大きい。このことから、空隙に空気が流れ込む状態は危険だと考えられる。図 4-7 から空隙厚さが 5mm になると厚さ 0.2mm の基準温度の約 5 倍の温度差が付く。5mm では、まだ、直接空気が流れ込むとは言えないが、空隙厚さが厚くなると空隙内部の対流が大きくなるため温度差はつきにくくなるので、この温度を超えたら危険な状態と考える。また、潜在的にこの状態に移行する可能性がある温度差を、この危険と考えられる温度差の 60% (基準温度の 3 倍) とする。これは概略 1mm (深さ 10mm) - 5mm (深さ 30mm) 程度の空隙になる。

■健全度判定表の基準設定

空隙深さ 10mm、空隙厚さ 0.2mm の推定温度差を基準温度差とし、空隙長さの区分は 0.2、0.3、0.5、0.8、1.2m とする。この上で次の 6 項目をもとに 8-2-1 の方針に従い健全度判定表を提案する。

基準温度差の 50% 以上の温度差を有している部分の空隙に対し、付着部分が全くないタイル-貼り付けモルタル間の空隙と考え、現状でも、想定される地震力により破損する可能性がある箇所は要緊急補修とする。

基準温度差の 10-50% の温度差を有している部分の空隙に対し、付着部分が全くない貼り付けモルタル間-躯体間の空隙と考え、現状でも、想定される地震力により破損する可能性がある箇所は要緊急補修とする。

ひび割れが新たに生じた場合に①若しくは②となる場合は要補修とする。

【公開版】

空隙の大きさが次の区分に進行した場合、または周辺部にあるひび割れが 1.5 倍に進行した場合①および②となる可能性のある部分を、要経過観察とする。

基準温度の 5 倍以上の温度差を有している場合、ひび割れの有無にかかわらず要緊急補修とする。

基準温度の 3 倍以上の温度差を有している場合、ひび割れの有無にかかわらず要補修とする。

基準温度差①～⑥に相当しない部分については処置無しとする。

■健全度判定表

以上の検討をもとに、健全度判定表を作成した。空隙長さは、安全側になるように丸めている。

表 8-2 健全度判定表

空隙位置	ひび割れの状態	空隙長さ					
		0.0～ 0.2m	0.2m～ 0.3m	0.3m～ 0.5m	0.5m～ 0.7m	0.7m～ 1.2m	1.2m 以上
空隙無	有	I	—				
タイル・ 貼付 モルタル	無	I	I	II	III	IV	IV
	1本	I	I	II	III	IV	IV
	平行2本 (1.5倍で交差する 場合)	I (II)	II	III	III	IV	IV
	交差2本	III	III	IV	IV	IV	IV
躯体・ 貼付 モルタル	無	I	I	I	II	III	IV
	1本	I	I	I	II	III	IV
	平行2本 (1.5倍で交差する 場合)	I (II)	I (II)	II	III	III	IV
	交差2本	III	III	III	III	III	IV
位置に よらない	開3本	III	III	IV	IV	IV	IV
	包囲	IV	IV	IV	IV	IV	IV
空隙長さ、ひび割れに関係なく 基準温度差の3倍		III					
空隙長さ、ひび割れに関係なく 基準温度差の5倍		IV					

健全度レベル	略 称	処置内容
レベルⅠ	処置不要	処置無しで良いと考えられる
レベルⅡ	要経過観察	経過観察が必要と考えられる
レベルⅢ	要補修	補修を行うことが望ましいと考えられる
レベルⅣ	要緊急補修	速やかな補修または補強が必要と考えられる

注]

- 1) 深さ 10mm、厚さ 0.2mmの空隙の推定温度差の 50%以上の温度差の場合、タイル-貼り付けモルタル間の空隙とする。
- 2) 深さ 10mm、厚さ 0.2mmの空隙の推定温度差の 10-50%の温度差の場合、タイル-貼り付けモルタル間の空隙とする。
- 3) 「ひび割れの有無」について、ひび割れ幅の程度（太い・細い）を考慮しない。また、隣接する目地、脆弱と考えられる他材質との接合部はひび割れと同等と扱う。
- 4) ひび割れ長さの取り方は、表 8-1 による。

- 5) 樹脂系材料を使用した補修箇所は空隙の 1/10 程度の温度差が現れることを考慮すること。

2-9 温度差プログラム

2-9-1 温度差プログラムの目的

従来の赤外線法は、周囲との温度差または境界部の温度勾配で判定してきたにもかかわらずその定量的な検討は行われてこなかった。検出プログラムの中心的な機能は、主に空隙の領域を定めることにあり、これには温度差の生じ方は直接的には影響しない。しかし、検出された領域で生じている現象を検討するには温度差の情報も必要である。そこで、検出プログラムでは検出領域とその周辺との温度差を表示できる機能を付与したが、その温度差は、従来の方法でも指摘した通り、何の基準も与えられないのでは意味がない。そこで、数値解析で、どのような温度変化が生じるのかを推定することとした。本解析を実施することによりさらに、最適調査時刻の予想が可能となり現地調査時間の短縮、温度分布の形状からの空隙が生じている深さの推定も可能となる。

2-9-2 解析方法

温度差プログラムは、前述の FEM 解析に用いたものと同じ二次元軸対象モデルを使用した。ただし、空隙は要素試験と異なり発泡材ではないため、空気 20℃における熱伝導率 0.026W/m℃に変更している。また、実用が目的なので、解析時間の短縮および FEM 解析に関する知識がないものでも使用できるように、解析モデルを直接扱うのではなく、先に 3.検出プログラムで設定した深さ 3 種類、直径 3 種類の計 9 種類の解析モデルを格納しておき、気温、風速、解析面方位などのデータを入力すれば自動的にデータを生成し、順次 9 種類の計算を行い、表面の最高温度と周辺との温度差のみを整理して出力するようにした。また、各県数か所の日照データを NEDO のデータベースより新たなデータベースとして作成し使用することとした。このデータベースは各月の上旬、下旬のデータのうち安定した晴天時のものを選択して使用している。温度差プログラムの入力部で指定した調査日から比較的近いデータベースを参照している。また、太陽光吸収率は前述したとおり幅が広い。事前予想に使用する場合は、見た目の色、濃さ、釉薬の有り無しから推定する。文献 4 でもそれなりの相関は指摘されているが、調査後の解析に使用する場合は標準板のデータから補正する必要がある。

2-10 実壁面の空隙による確認試験

2-10-1 試験目的

実際に空隙のある建造物壁面に対して、ひび割れ、空隙の調査を実施し、開発した検出プログラムの有効性を確認する。また、引張試験を行い、引張強度、剥離深さ、剥離状況を観察して温度変化、温度差変化と照合する。

2-10-2 試験実施場所

長野高専、環境都市工学課棟の東西面、環境都市工学課棟ペントハウスの東西面および北面、電気電子工学科棟のペントハウス東西面で実施した。

2-10-3 試験内容

温度差プログラムで最適調査時刻と推定された時刻を中心に熱画像を撮影した。また打診も同時に行った。環境都市工学課棟ペントハウス、電気電子工学科棟ペントハウスの一部では熱画像を検出プログラムで解析し、解析および打診で空隙と診断した位置、解析若しくは打診どちらか一方のみ空隙と診断した位置およびその周辺で、建研式接着力試験器により破壊検査を行ない、強度、空隙位置、破断面の状況などを記録した。

2-10-4 試験結果

■検出プログラムによる結果整理

図 10-1 は環境都市工学課棟西面の検出結果とひび割れ調査の合成図面の一部である。u-1～u-9 が熱画像から検出された空隙領域、h-1 から h-7 はひび割れで、近くに記載されている数値がひび割れ幅である。空隙部は、基準温度差の 1/2 以上の領域が赤、基準温度差の 50%～10%の領域が橙で表示されている。u-4 は温度差の大きさの割に境界における温度勾配が大きく、タイル直下で樹脂系の材料で補修された可能性がある。ひび割れ、空隙ともに集計表として出力される。なお、基準温度差は短いほうの幅で整理しているが、現段階で完全に自動化はされておらず、一部手作業で色分けしている。最終的に、このような図面が得られるまで、

1. 温度差プログラムによる調査時間の設定
2. 熱画像およびひび割れ情報の取得
3. 検出プログラムによる検出
4. 詳細な気象情報による温度差推定と標準板による補正
5. 検出個所の危険度判定
6. 赤外線報告書、図面及び集計表の作成

という一連の作業を実施し、実際の調査業務に使用できること、および調査、解析時間の短縮を確認した。なお、判定では、u-3 が要補修、u-4 が補修跡でない場合は、要経過観察となるが、現実には位置が低く、通常歩行者が通る場所ではないため、特殊建物における定期報告対象とはならず、特に危険はないと考えられる。

■引張強度と接着率の関係

環境都市工学課棟ペントハウスおよび電気電子工学科棟ペントハウスでは引張試験を行った。試験前の予想では、境界で接着・非接着部が明確に分かれる状況を想定していたが、必ずしもそうはなっていなかった。そこで、健全なモルタルであれば、接着面積比が引張強度と比例することから引張強度と接着率は一致するものと考え整理した。モルタルの劣化等で必ずしも一致する保証はないが、赤外線調査から落下しない条件を検討するためなので、整理方法としては妥当と考えられる。

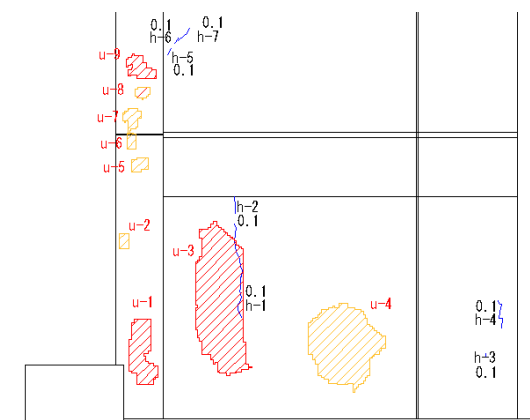


図 10-1 検出プログラムによる結果とひび割れ調査結果の重ね合わせ

■引張試験状況

引張試験は、目地沿いにカッターを入れ建研式接着力試験器を用いて実施した。試験箇所は打診、赤外線で検出された位置の境界付近とした。図 10-2 は引張試験前の一例で青テープが打診、黄色が赤外線検出範囲、紫のテープが引張試験実施位置である。図 10-3 は図 10-2 と同じ場所の試験後の状態である。

全部で、各面 5 枚×2 か所（電気電子工学科棟の東面の一か所のみ 3 枚）、計 48 枚のタイルに対して実施した。



図 10-2 引張試験前の状況



図 10-3 引張試験後の状況

図 10-3 で右側の 2 枚は強度がモルタルの 1/10 以下で完全に浮いていたと考えてよい部分であるが、それ以外も 50%以下で、危険とは直接はならないが、決して健全な状態ではない。引張試験を実施した全 48 枚のタイルの内引張り強度が 1.5Mpa を超えたのは 1 箇所のみであった。剥離位置は、強度が低いものに関しては、すべて下地モルタルと躯体界面の剥離で約 20mmの深さである。タイルとモルタル界面での剥離は、部分的に観察されるが初期の塗り付け時にできた空隙部と考えられ、残りの部分はモルタルの凝集破壊である。また、貼り付けモルタルと下地モルタル界面の剥離も一部分あったが、40%以上の接着率だったので熱画像での評価はできなかったため、接着率はすべて 20mm深さにあるとして整理した。

■温度勾配による空隙深さの検証

温度勾配で深さを検証する方法を試してみたが、有用な結果は得られなかった。これは検出プログラムで検出領域の外側と判定された領域でも高い接着率とはなっていないことが原因と考えられる。接着率が徐々に変化した場合は、浅い位置に空隙があっても境界での温度勾配が高くなることはあり得ない。接着率がわずかでもあればほぼ落下することはないので、温度差の低下は深さに依存するとして健全度判定をするのが安全側の判断となるので、深さの判定は温度差を基準とした。

■検出個所の検証

引張試験の結果はタイル 1 枚 1 枚の値なので、検出プログラムの検出領域と周辺部の温度差とは対応しないため、ここでは、単純に検出個所と引張試験の結果を比較した。検出プログラムは、10%温度差以上は検出とした。

表 10-1 接着率（強度比）と検出精度の比較

	接着率 10%以下 (0.227Mpa 以下)	接着率 30%以下 (0.681Mpa 以下)	接着率 30%以上 (0.681Mpa 以上)
引張試験結果	11	17	8
打診正解枚数	8 (73%)	6 (35%)	8 (100%)
検出プログラム 正解枚数	11 (100%)	15 (88%)	6 (75%)

2-11 まとめ

外壁の落下につながる空隙の調査において、温度分布が上に凸となる部分を空隙と判断する新しい検出プログラムを作成し、実壁面上に模擬空隙を再現した試験体により、有用性を確認した。また、要素試験により太陽光吸収率や熱伝導率を決定したFEMによる解析を行い、空隙の深さ、厚さ、大きさの変化に対して、どのような温度分布が得られるかを検証した。更にこのFEMモデルをもとに温度差プログラムも開発し、最適調査時刻の推測や、検出された空隙部の評価を行えるようにした。また、検出プログラムを季節、天候を変えた条件で撮影された熱画像に適用し、必要な精度が確保できる条件を確定した。また、これら一連の研究で得られた知見をもとに、きわめて簡単なモデルではあるが、検出された空隙を周囲のひび割れの情報を合わせて、要緊急補修、要補修、要経過観察、処置必要なしに分類する健全度判定をする技術を確認した。この評価法により、補修コストの低減と安全性の両立が図れるようになる。

2-12 今後の課題

開発した検出プログラムには、周辺との温度差を表示する機能はあるが、開発した健全度判定システムは、解析者が行う必要があるため、自動化しさらに効率を上げる必要がある。温度差プログラムも日射量の時間ごとの変動を気象庁が発表する全天日射量から推定できるようにするとより精度が高まるものと考えられるので、手法を含め検討していきたいと考えている。また、標準板から推定温度を効率良く補正する手法も必要である。

一方、立地条件等で赤外線法により計測できない場合は、コストがかかっても打診によらなければならないが、本研究で明らかになったように、打診の精度も落下危険があるかどうかという点では決して高くない。検知するという意味では研究が進められているようであるが、周波数解析や減衰曲線などから本研究同様、生じている空隙の状態との関連が明確化し、落下危険が予測できるようにならない。

大きな地震でも、一枚のタイルも落下させないという方向で工法の開発や補修方法の開発は進められているようであるが、現時点で既存の建造物に対して完全にタイルの落下を許容しないという対処はコスト的に現実的ではない。実際調査を行っている、多くの異常高温部や異音のある箇所が検出されるが落下するのはごくごく一部である。本研究の健全度判定システムも、多分に安全側過ぎる可能性が高い。調査した範囲内であるが、どの文献においても、強度的な評価がされてこなかったようであり、0.25 m²以上はピンニングにすると引張強度が0.3MPa以下は張替えの対象にするとか言った基準があるが、これらの基準も根拠が極めてあいまいだと指摘せざるを得ない状況である。大学や各研究機関において、落下事故の原因調査進め、無駄な補修の軽減を図ることも重要であろう。筆者の経験では、落下事故の起きた壁面の多くは、施工時の躯体の表面処理の不足が原因の躯体とモルタルの剥離である。タイル単体の落下よりもはるかに危険性が高く、また、築年齢が若い物件でも見られ、公にされたかどうかは別にしてこのような建築物では実際に落下が起こってから、他の部位の確認のために調査することが多く、本研究の危険度診断システムに照らし合わせれば、要緊急補修に該当する箇所が多数見つかることが少なからずある。100%ではないが、赤外線による調査だけで良いので現在の目安とされている10年よりもっと短い期間で調査することで安全性が飛躍的に高まると考えられる。