

ドローンによる赤外線撮影でタイル浮きを AI 判定するシステム

～建て替えではない持続可能な建築と魅力ある建設業を目指して～

株式会社竹中工務店 深沢 茂臣

菊池 亮人

1. はじめに

外壁タイルは建築基準法第 12 条に基づく定期調査の対象となっており、半年から 3 年に一度の頻度で手の届く範囲での打診等による調査が必要とされている。また、竣工から 10 年を経過した建築物については、「落下により歩行者等に危害を加えるおそれのある部分」に対して全面打診等による調査が求められている。平成 20 年(2008 年改訂版)の「特殊建築物等定期調査業務基準」では、「足場等を設置してテストハンマーで全面打診する方法」と「赤外線調査」が併記されるようになった。¹⁾

高度経済成長期やバブル期に建設された多くの建物は、現在、外壁タイル剥落による公衆災害リスクの高まりが指摘されている。また、建物ストックを都市のインフラと考え、老朽化に伴い、メンテナンス費用の所有者負担が増大し、法令に定められた調査が滞るという社会問題も発生している。さらに、少子高齢化による検査技術者の不足が顕在化しており、働き方改革による労働時間の短縮を推進しながらも、検査品質を落とさずにコストを抑え、省人化を図る必要が生じている。未来に向けた安全・安心で持続可能なまちづくりのために上記課題を解決する必要がある。

2. 課題と方策の具現化

課題と方策を以下の 3 つに整理し、開発を進めて具現化を図った。

(1) 高所部の調査をドローンで実施

全面打診(写真1)による調査には建物全面に足場を設置(写真2)する必要があるため、建物所有者にとって費用負担が多くなる。また、足場の転倒防止処置のために既存タイルの一部につなぎを設置する必要があり、タイルの一部を欠損させることになる。足場の設置が困難な高層建物の場合は、ロープブランコ(写真3)による危険な高所作業が発生し、多くの時間と熟練した作業員を必要とする。さらに、全面打診に代わる方法として赤外線装置を用いた調査が行われているが、高層建物の場合、撮影距離が遠くなるため精度の高い画質を得ることが困難である。これらの課題に対して、ドローンを活用(写真4)して赤外線撮影を行うことで、対象タイルに正対した近接撮影が可能となり、浮き判断に必要な画像をより正確に取得できるようになった。



写真1【打診検査状況】

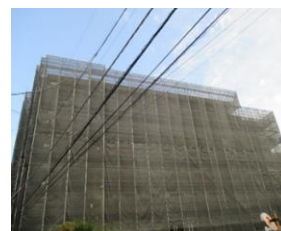


写真2【足場設置状況】



写真3



写真4【ドローン 状況】

【ロープブランコによる検査状況】

ドローンを使用した建物撮影に関しては、近隣関係者の理解を得ることを前提に、法令に則り諸官庁と協議を行うことで、都心部でも飛行・撮影が可能である。現在のドローン飛行能力とカメラの性能は日々進化しており、正対距離を長くすることで、今後さらに作業工数と効率を向上させることが可能になると考えられる。

(2) 外観写真からタイル割りを作成し、タイル浮き情報の重ね合わせによるデータ作成

外壁図面が残されていない、あるいは紛失した建物の場合、まず現地に即したタイル割り図の作成が必要となる。従来は、報告者がゴンドラで現地打診検査した結果を、タイル割り図と照合しながら浮いている部分を落とし込む作業に膨大な時間と手間を要していた。

これらの課題に対して、現地で撮影した写真からタイル割りを自動作成する機能を開発した。タイル割り図の作成は、目地に囲まれた四辺のラインを選択することでタイル割りを自動作成し、その後、拡大機能を使って四隅位置を正確に合わせることで完成する(図1)。また、タイル割りに上に浮き部分を表示して CAD データで出力できる機能も開発した(図2)。

撮影データを熱画像と可視画像に分割し、可視画像の陰影よりタイル線を検出した。タイル自動認識アルゴリズムは以下の 4 つのステップで構成されている。①エッジ検出によって得た輪郭線から細かいノイズを取り除き、タイル線が途切れている部分をつなげる。②エッジ線に囲まれた領域を検出し、その中からタイルである可能性の高い矩形(タイル矩形)を見つける。③隣り合ったタイル矩形をたどり、連続したグループに色分けを行い(グルーピング)、そのグループ内でタイル 1 枚 1 枚の相対座標を計算する(アドレッシング)。④タイル矩形のグループから、タイル格子の形状を予測する。タイル格子は、四角形で、できるだけ多くのタイルを含むように予測される(図3)。

次にタイル自動認識のプログラムは以下の 3 つの過程で開発した。①全てのタイルの四隅座標を情報として保存することで、実際のタイル分布における一部グリッド線の不ぞろいにより、タイルの形に即していない箇所を見つけ、タイルがところどころ抜けて穴の空いている箇所を検知する(タイルメッシュ方式)。②X 軸、Y 軸のグリッド線交点を無作為に数万通り求め、垂直方向・水平方向の消失点を推定する。各グリッド線を、推定した消失点を通るように補正し、グリッド線のバラつきを抑える。③検出したタイルのグリッドを外挿的に適用することで、存在しないグリッド線を推測・補完する手法(エリア拡張)を実装した(図4)。

プログラム開発の結果、正面から撮影できずに角度のついた写真でもタイル割りを作成することが可能となった。つまり、目地の距離を均等割りしてタイル割りを作成するのではなく、写真の陰影を元に実際のタイル目地に即したタイル割りによりタイル数量を算出している。これにより、建物写真からタイル割り図の作成と、現地で計測したタイル浮き情報を照合する手間を削減した。なお、通し目地、

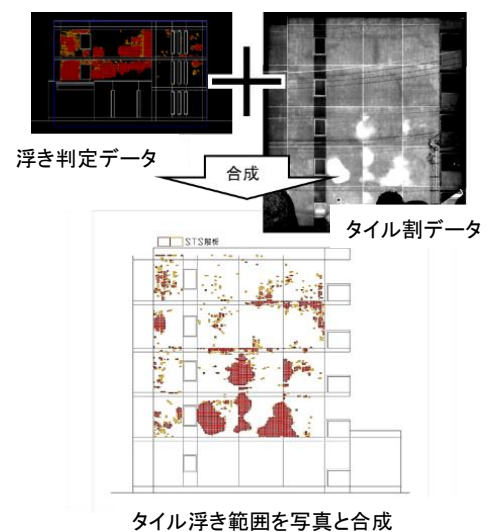
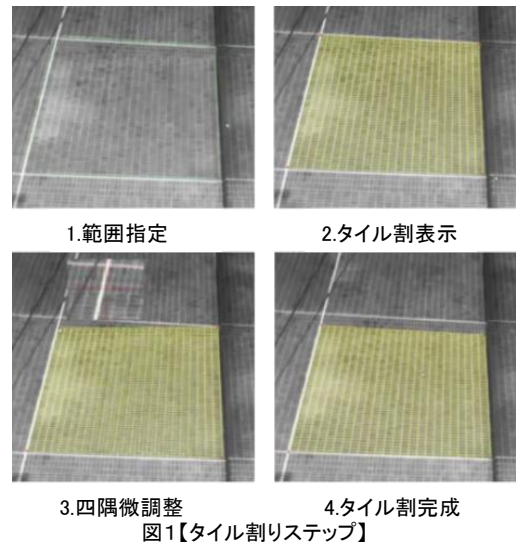


図2【タイル割作成手順】

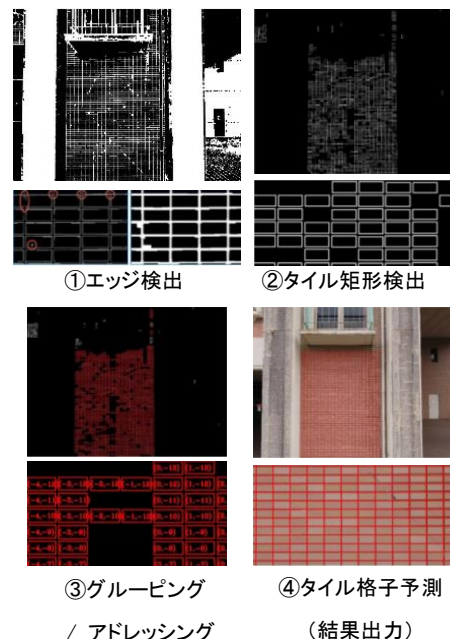


図3【自動認識アルゴリズム】

二丁掛けどちらの貼り方にも対応可能である。

(3) 技術者の感覚による判断基準を AI により明確化

タイル打診法や赤外線調査は調査者の技能や経験に依存しており、個人による結果に差異が出る場合がある。また、建物の生涯を考慮すると検査期間が長期にわたるため、検査毎に技術者が交代することにより、検査対象を継続して同一技術者が確認できず、技術者毎に判断基準が変わる可能性がある。

さらに、従来はタイルの浮き枚数について、浮きが疑われる大まかな範囲内で調査者の主観で積算していたため、積算数量が実際に浮いている範囲と比較して多くなる傾向にあった。これらの課題に対して、タイル 1 枚毎に浮き判定を AI が行い、赤い範囲が浮きの「疑いが強い」、黄色が「疑いあり」、青が「正常」の 3 段階で評価することで、浮いている割合を危険度ごとに明確化し、人の感覚や経験にとらわれない不具合部分の自動検出機能を開発した(図5. 6)。

プログラム開発のステップを以下に記述する。まず現場での使用に耐えるソフトウェアを開発するにあたっては、室外機・窓枠・車などの障害物、地面からの照り返しなど、現実には存在する様々な要素を考慮する必要がある。今回 10 の判断基準を以下のように設定した。①タイル浮きの典型例(下地浮き)、②陶片浮き、③日射方向とタイル浮きの関係、④タイルの模様、⑤“まばらな温度分布、⑥浮き面積と強度の関係、⑦縁部分の高温部、⑧地面からの反射熱、⑨壁からの熱反射、⑩温度が高くなる別の要因(図7)。作業を行うにあたり「タイルの自動認識」と「タイルの浮き判定」を独立した処理に分けることで「浮き検知プログラム」の部分だけを効率よく繰り返し検証することを可能とした。「タイル浮き」のルールを踏まえたタイル浮き検知システムを作成・検証するにあたり、タイル形状の情報が必要となる。自動認識プログラムで得られる情報の精度を上げるため、現地の特殊条件を反映できるタイル手動登録システムを作成した。「タイル浮き判断基準」は①下地浮きの温度分布を使った基本ルール、②反射熱の影響の除外、③縁からの熱伝導の影響の除外、④まばらな温度分布の影響の考慮の 4 つが中心であり、タイル中の画素の輝度平均値を「浮きスコア」とし、スコアの高さに応じて赤が「疑いが強い」、黄色が「疑いあり」、青が「正常」の 3 段階で評価している。一定のスコア(検出枚数)を持つタイルを浮きとし

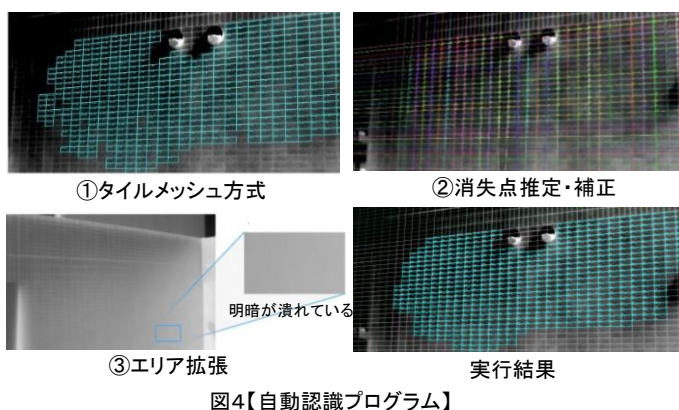
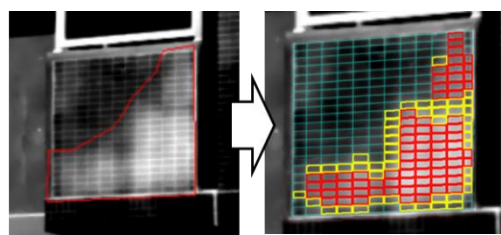


図4【自動認識プログラム】



従来の調査結果イメージ スマートタイルセイバー

図5【判定結果イメージ】

名称	総数量	閾値 (警告)	数量 (警告)	含有率 (警告)	閾値 (注意)	数量 (注意)	含有率 (注意)
03S-01_0×0	1003枚	2.50℃	50枚	5.00%	2.00℃	28枚	2.80%
03S-01_0×1	1350枚	1.00℃	86枚	7.10%	0.75℃	63枚	4.70%
03S-01_0×0	1428枚	1.00℃	132枚	9.20%	0.70℃	37枚	2.60%
03S-01_1×1	1710枚	1.00℃	69枚	4.00%	0.90℃	27枚	1.60%
03S-01_2×0	1292枚	1.20℃	54枚	4.20%	0.80℃	112枚	8.70%
03S-01_2×1	1484枚	0.75℃	57枚	3.80%	0.45℃	101枚	6.80%
03S-01	8267枚		458枚	5.50%		368枚	4.50%

図6【積算結果例】

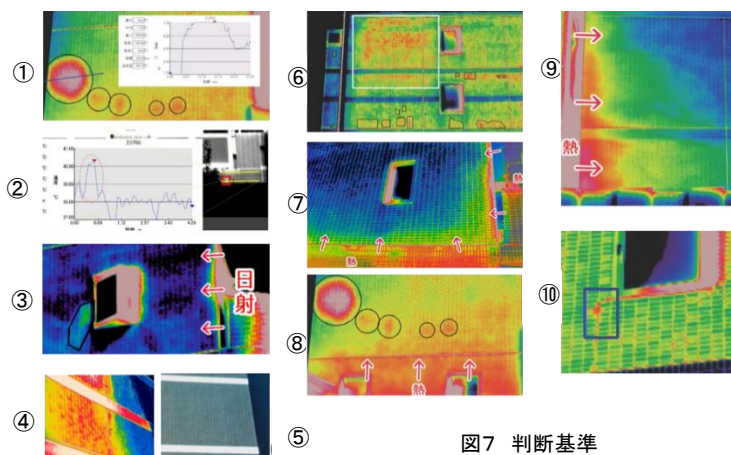


図7 判断基準

て判断し、最終的な結果を出力する。これまでの処理で、判断に必要なスコアはすべて計算されているため、単純に該当グループの範囲が固定閾値を超えているかどうかで浮きを決定する。開発を6つの段階でまとめると、①熱画像からタイル1枚1枚を代表する輝度値の取得、②代表輝度値からスコアの計算(正規化)、③浮きの温度上昇を取得するため、広範囲高温部の影響をスコアから差し引くキャンセリング、④広範囲高温部をキャンセルするため、「端部熱源」の位置を推定、⑤孤立している高スコアタイルは、ノイズの可能性が高いため除外、⑥計算でスコアから得た閾値を超えたタイルを浮きとして画像に出力、という一連の開発ステップにより自動認識のアルゴリズムを完成させた(図8)。

また、写真データを個別に判定するとデータ全体が重くなり、作業負荷がかかるため、複数の熱画像データを一度グレースケールで出力後、それらを合成成型するプログラムにより大熱画像に再構築する「ダイナミックレンジ合成」を実装し(図9)、データ操作の負荷を軽減して作業効率の向上を図った。出力結果の真意を検証するには、タイルの温度差に関して jpeg データを拡大することで温度を数値として確認することができる(図10)。

3. 特徴と効果

(1) タイル割り図を写真から作成

写真をつなぎ合わせることで建物全体のタイル割り図面を作成することが可能となった。これにより、従来は手作業で行っていたタイル割り図の作成作業が大幅に効率化され、正確性も向上している。また、外壁図面が残されていない古い建物においても、現状に即したタイル割り図を容易に作成できるようになった。

(2) タイル1枚毎に浮き判定

浮いているタイルをタイル割り図上に1枚毎に判定確度の強弱をつけて表示することが可能となった。これにより、従来の大まかな範囲での浮き判定から、より精緻なタイル単位での判定が可能となり、修繕計画の立案や優先順位の決定に役立てることができる。また、判定確度に応じた表示により、危険度の高い箇所を視覚的に把握しやすくなっている。

(3) CAD データで出力

タイルが浮いている状況を写真とタイル割りを合わせて自動表示することが可能となった。CAD データとして出力できるため、設計事務所や施工会社との情報共有がスムーズになり、修繕工事の計画立案や見積作成の効率化にも寄与している。また、デジタルデータとして保存することで、経年変

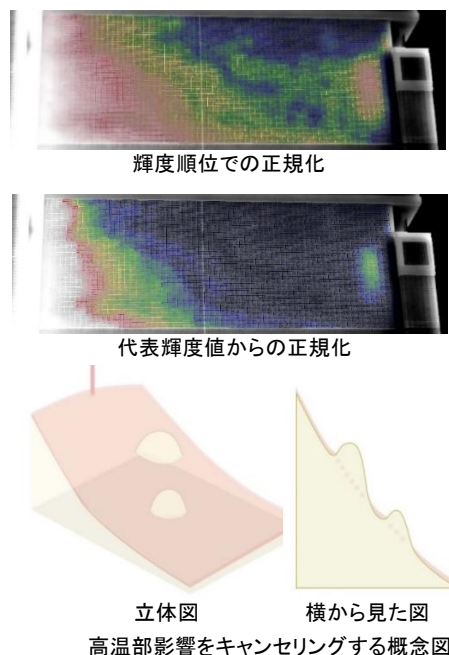
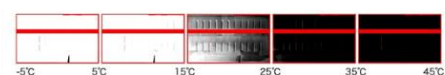
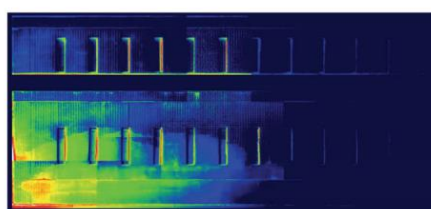
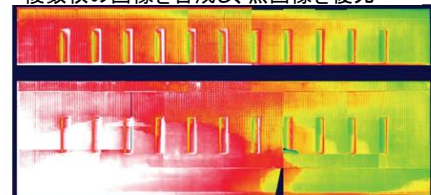


図8 開発ステップ

合成/成型後画像を、10℃間隔でグレースケール出力



複数枚の画像を合成し、熱画像を復元



熱画像に変換された合成整形後画像

図9【ダイナミックレンジ合成】

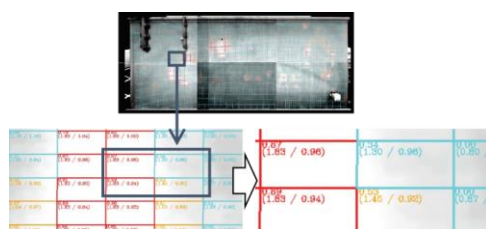


図10【タイル温度表示】

化の比較や履歴管理も容易になった。

(4) 浮き率の明確化

タイル割り図の作成により、タイル総数が正確に把握できるため、浮いているタイルの割合が明確になった。これにより、建物全体の健全性評価や修繕の必要性判断が客観的なデータに基づいて行えるようになった。また、経年での浮き率の変化を追跡することで、劣化の進行状況を定量的に把握することも可能になっている。

(5) 人の感覚に頼らない

AI による判断基準のため、誰が操作しても同じ結果となり属人性がない。これにより、検査技術者の経験や技能による判定のばらつきが解消され、一貫性のある調査結果を得ることができるようになった。また、技術者の高齢化や人手不足が進む中でも、安定した品質の検査を継続して実施することが可能になっている。

以上の特徴により、従来の赤外線目視判定と比較して、当社比で解析時間 37%、報告書作成時間で 85%の省人化が図れた(BELCA の経済性評価取得)(写真5)。従来の赤外線目視判定では、報告書資料の作成において、解析した浮き部を技術者が手動で CAD 立面図に転記し、CAD 立面図上に連番や数量を記載し、タイル枚数を目視で確認して数量を記載していく必要があり、多くの労力と時間を必要としていた。

開発技術では、タイル浮き情報が.dxf(CAD ファイル)として出力されるため、調査結果図の作成には、CAD 立面図に.dxfファイルを重ね合わせるだけで済む。また、解析した浮きタイル枚数も.csv(text ファイル)で出力されるため、調査結果図にも数量表にも間違いが起こりにくくなっている。

さらに、開発技術の解析では、浮きを閾値から自動的に検出することで、判断基準の数値化がなされているため、技術者による属人性がなくなった。開発技術の運用マニュアルを理解した技術者であれば、経験の少ない技術者でも解析することが可能であり、省人化による経済性の向上とともに、品質の均一化が実現している。

コスト面では、従来の赤外線目視判定と比較して当社比で 3 割の低減を図ることができた。また、ロープブランコ使用での外壁調査では本技術と比較して 3 分の1、全面足場を使用して打診調査をする従来工法との比較では 11 分の 1 の大幅な経済性の向上が図れている。また、足場設置に伴う足場転倒防止つなぎ設置によるタイルの欠損も発生しなくなった。

建設技術者の就労人口が減少していく中で、タイル打診検査や赤外線目視判定の技術者減少も想定され、技術の伝承が難しくなっている。開発技術は、熟練技術者の蓄積された経験や判断知識を AI でカバーすることで、これらの課題を克服する AI を建設に取り入れた革新的な技術といえる。

4. おわりに

マンション入居者の高齢化や住人の退去に伴い、所有者からは修繕積立費の不足により、維持管理に必要な検査の簡略化を強く希望するニーズが高まっている。また、多くの建物が老朽化を迎える中、躯体よりも外装の健全性が疑われる案件が公衆の安全を脅かし、社会問題化している。一方、建設業界では技術者の高齢化や担い手不足により、今後これらのニーズへの対応が難しくなる傾向にあるため、技術者の補助となる技術の開発による生産性と経済性の向上が強く求められている。実際に、当技術を採用したタワーマンションでは、開発技術を一次診断で活用して足場設置範囲の大幅な削減を実現した。

今回開発した技術は、活用とともに AI がタイルの浮きのパターンを蓄積していくため、使用を重ねる



写真5 BELCA 評価書

ほど判定精度の向上が図れるという特長がある。今後は、反射率の高いタイル、複数サイズが混在した壁面、セットバックなど壁面の凹凸が多い壁の計測ができるよう、さらなる改良を進めていく予定である。

建設 DX という言葉が浸透する昨今だが、建設と AI のどのような融合が可能かは、まだ開発途中の段階である。今回開発した技術は、建築に AI とドローンを組み合わせるという今までにない発想で建設業に展開しており、社会インフラを担う建設従事者の一人として、この技術が社会に大きく貢献できると考えている。

この技術の普及により、建物の外壁タイル検査の効率化と精度向上が図られ、公衆安全の確保と建物所有者の経済的負担軽減の両立が可能となり、都市インフラである建物を持続的に使用できる、安全・安心なまちづくりの一端を担えると考ええる。また、検査技術者の労働環境改善や技術継承の課題解決にも寄与することが期待される。今後も技術の改良を重ね、より多くの建物に適用できるよう発展させていくことで、担い手が働きたいと思う魅力的な建設業界の実現に貢献していきたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課監修『特殊建築物等定期調査業務基準(2008 年改訂版)』(財)日本建築防災協会編集・発行