

令和5年度ドローン社会実装促進実証事業
「音波照射加振を用いた非接触音響探査法による構造物劣化診断事業」
最終有識者会議資料



株式会社 T&T
TECHNICAL & TECHNOLOGY



桐蔭横浜大学
杉本研究室

- 1 本事業の背景及び目的
- 2 本事業の概要
- 3 本事業の実施体制
- 4 本事業の診断(計測)方法及び使用機材
- 5 本事業の実施概要(構造物(建築物)及び実施日等
- 6 実証実験結果「打診診断及び赤外線診断」 兵庫県立大学姫路工学キャンパス6号館
- 7 実証実験結果「打診診断及び赤外線診断」 兵庫県立大学姫路工学キャンパス6号館北側凹部
- 8 実証実験結果「打診診断及び赤外線診断」 赤穂化成ハーモニーホール
- 9 実証実験結果「音響探査」 兵庫県立大学姫路工学キャンパス6号館
- 10 実証実験結果「音響探査」解析方法について
- 11 実証実験結果「音響探査」 赤穂化成ハーモニーホール
- 12 音響探査結果と現行手法(打診・赤外線)結果との比較・検証
- 13 音響探査の課題抽出・分析及びその実現性
- 14 総括
- 15 参考資料・出典資料など

● 本事業の背景

- ・ 近年は、**老朽化した橋梁、広告物等の外装材や建築物の外壁材**（以下「**構造物**」という。）が**経年で劣化し、剥離・落下につながり、通行人などの事故が発生し社会問題**となっている。
これらの**構造物を定期的に劣化診断を行い、健全に維持・管理していくことが急務**となっている。
現状では「**目視による劣化診断**」や「**打診による劣化診断**」が主流となっているが、これらの診断には課題がある。
- ・ そのような中、**構造物の劣化による表面温度の変化に着目し、令和4年4月にドローンに搭載した赤外線カメラによる劣化診断が建築基準法上可能となり、そのガイドラインが国から示されたところである。**
しかし、この「**ドローン赤外線カメラによる劣化診断**」も課題がある。

〈現行手法による構造物劣化診断の主な課題〉

- ・ **目視診断**：構造物のひび割れ、剥離など外観上の劣化診断となることから、**高層部や微細な劣化診断は困難**である。
- ・ **打診診断**：**高い位置での作業**は高所作業車やロープ、ゴンドラ、仮設足場などによる作業となり**高額なコスト**となる。
- ・ **赤外線診断**：終日日陰の場所や冬季の気象条件下では、**構造物の表面温度の変化が少なく、劣化診断が困難**である。



● 本事業の目的

- ・ 音波照射加振による非接触音響探査法（以下「**音響探査**」という。）による**構造物の劣化診断の実証実験を行い、ドローンを活用した音響探査による構造物劣化診断の実現性を検証する。**

- 概要

- ① 兵庫県内の中高層建築物において、音響探査、打診診断、赤外線診断を実施する。
- ② 音響探査結果と現行手法（打診診断・赤外線診断）結果との比較・検証する。
- ③ 音響探査の課題抽出・分析する。
- ④ 音響探査の実現性を検証する。

- 打診診断又は赤外線診断に関わる作業、各劣化診断結果の比較・検証作業、課題抽出・分析作業など
株式会社T&T(一級建築士、特定建築物調査員資格、赤外線建物診断技能士、建築ドローン安全教育修了者)
- 音響探査に関わる作業、各劣化診断結果との比較・検証作業、課題抽出・分析作業
桐蔭横浜大学 大学院工学研究科 杉本研究室 (代表 杉本恒美 大学院教授)
- 構造物の各診断に関わるアドバイザー
菅井稔 株式会社 T&T 東京営業所 所長(元横浜市建築局建築指導部建築情報課長)

音響探査 専門家による診断

【計測方法】

ドローンに音源を取付け、空中から音を出し外壁面を励振する。地上に設置したレーザドップラ振動計で外壁面の振動を診断(計測)し、振動の違いを分析し異常箇所を特定する。

【使用機材】



【音源搭載ドローン】



【※レーザドップラ振動計】

打診診断 有資格者による診断

【計測方法】

高所作業車の籠に人が乗り、打診棒で外壁面を直接打診、打診音の高低の違いで異常箇所を特定する。

【使用機材】



【打診棒】



【高所作業車】

赤外線診断 有資格者による診断

【計測方法】

ドローンに搭載した赤外線カメラで空中から外壁面を撮影し、外壁面の温度分布の違いで異常箇所を特定する。

【使用機材】



【ドローン】



【赤外線カメラ】

実証実験フィールド

①兵庫県立大学姫路工学キャンパス3、6号館

- ・所在：姫路市書写2 1 6 7
- ・構造：鉄骨鉄筋コンクリート造 外壁タイル仕上げ
- 規模：5階建て
- 用途：大学

②赤穂市文化会館「赤穂化成ハーモニーホール」

- ・所在：赤穂市中広8 6 4
- ・構造：鉄骨鉄筋コンクリート造 外壁タイル仕上げ
- 規模：4階建て
- 用途：多目的ホール

実施日及び実施日の気象

①兵庫県立大学姫路工学キャンパス3、6号館

〈打診・赤外線〉

- ・令和5年10月8日(日)9時～12時
- ・天気:曇り時々晴れ、気温20℃、風速0～3m/s

〈音響探査〉

- ・令和5年12月16日(土)・17日(日)9時から15時
- ・天気:晴れ時々曇り、気温:10度、風速:2～10 m/s

②赤穂市文化会館「赤穂化成ハーモニーホール」

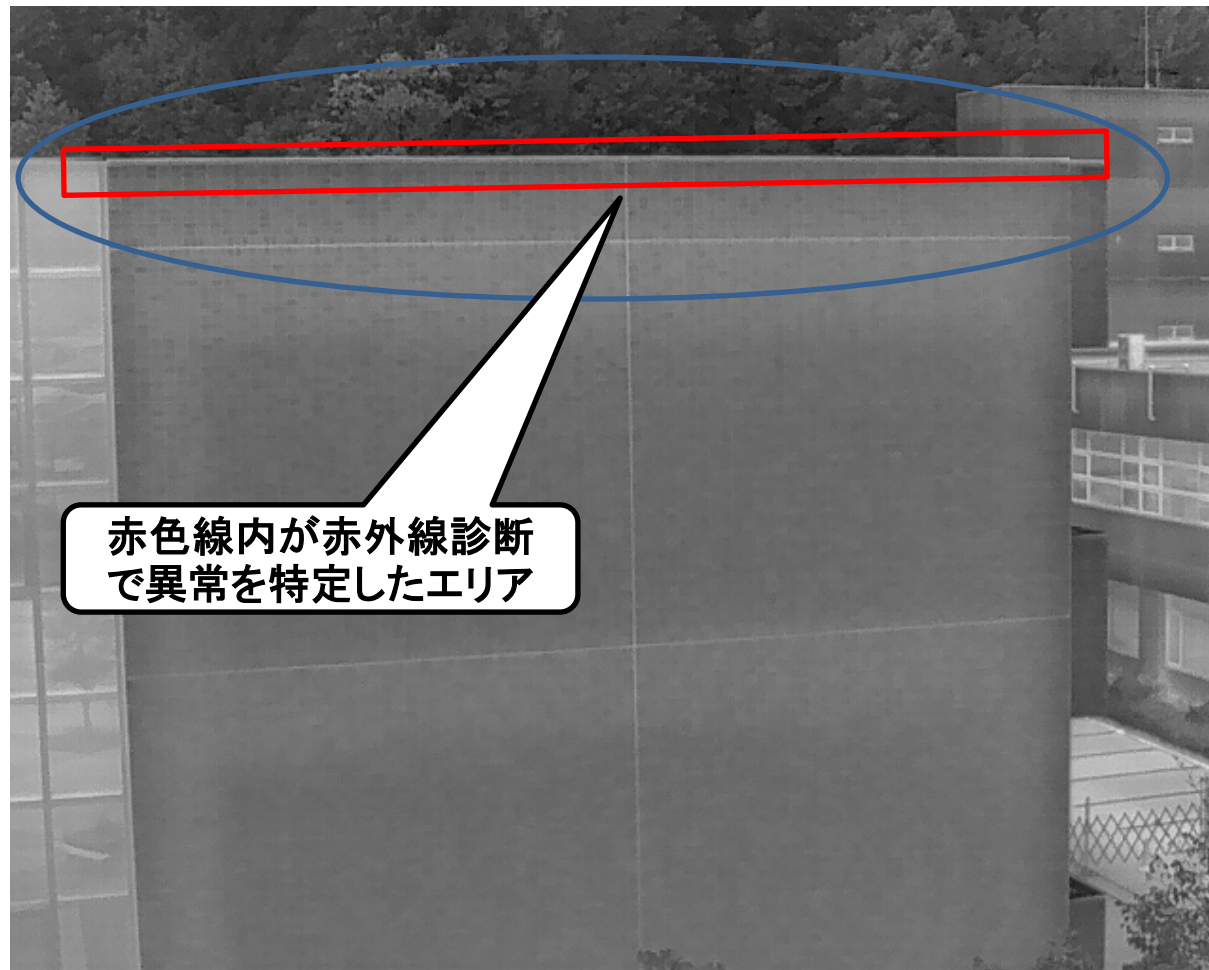
〈打診・赤外線〉

- ・令和5年9月19日(火)9時～16時
- ・天気:晴れ、気温30℃、風速0～3m/s

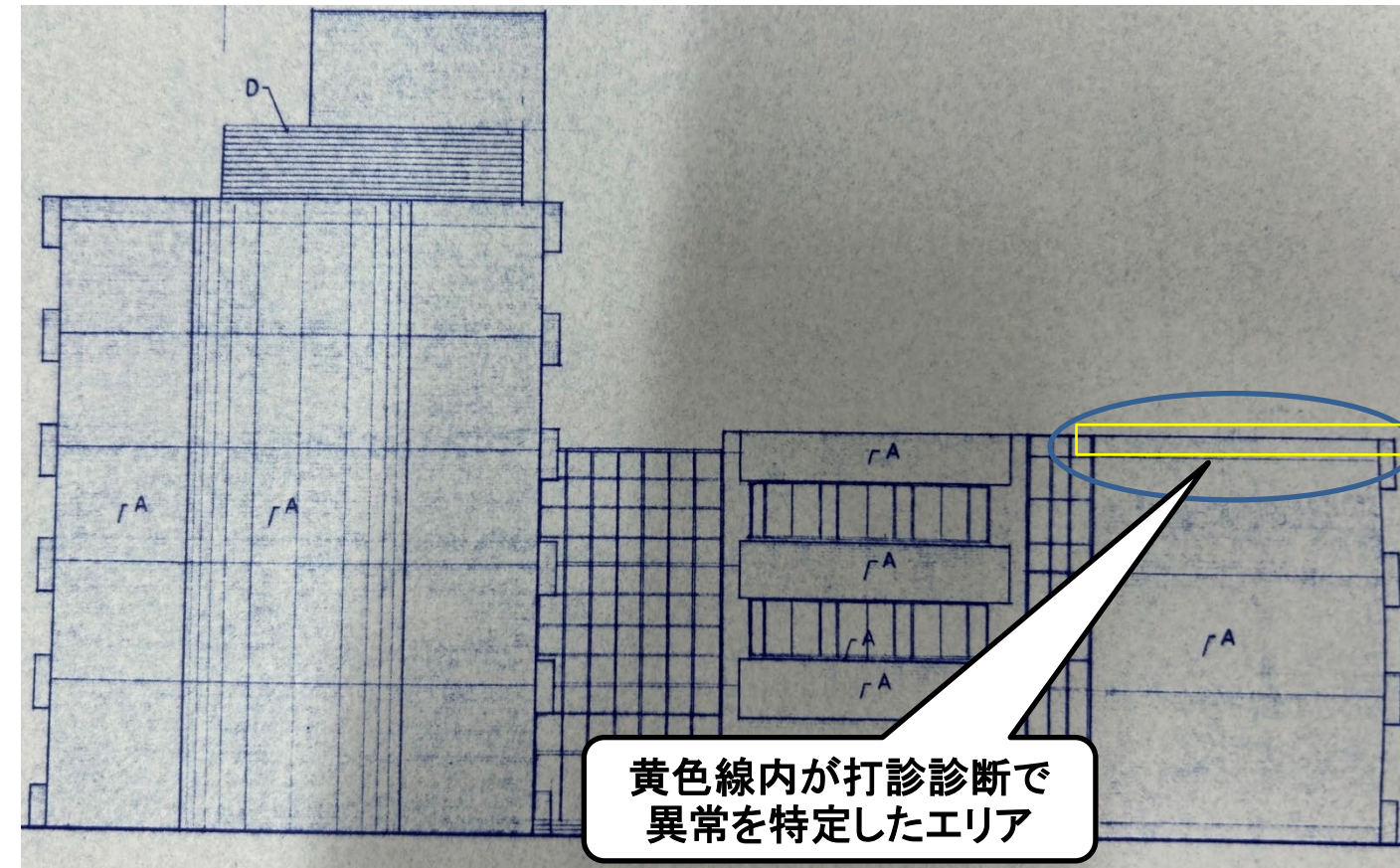
〈音響探査〉

- ・令和5年12月18日(月)・19日(火)9時から15時
- ・天気:晴れのち曇り、気温:7度、風速:5m/s

■結果：赤外線診断と打診診断により同じ位置で異常箇所（外壁タイルの浮き）を特定した。

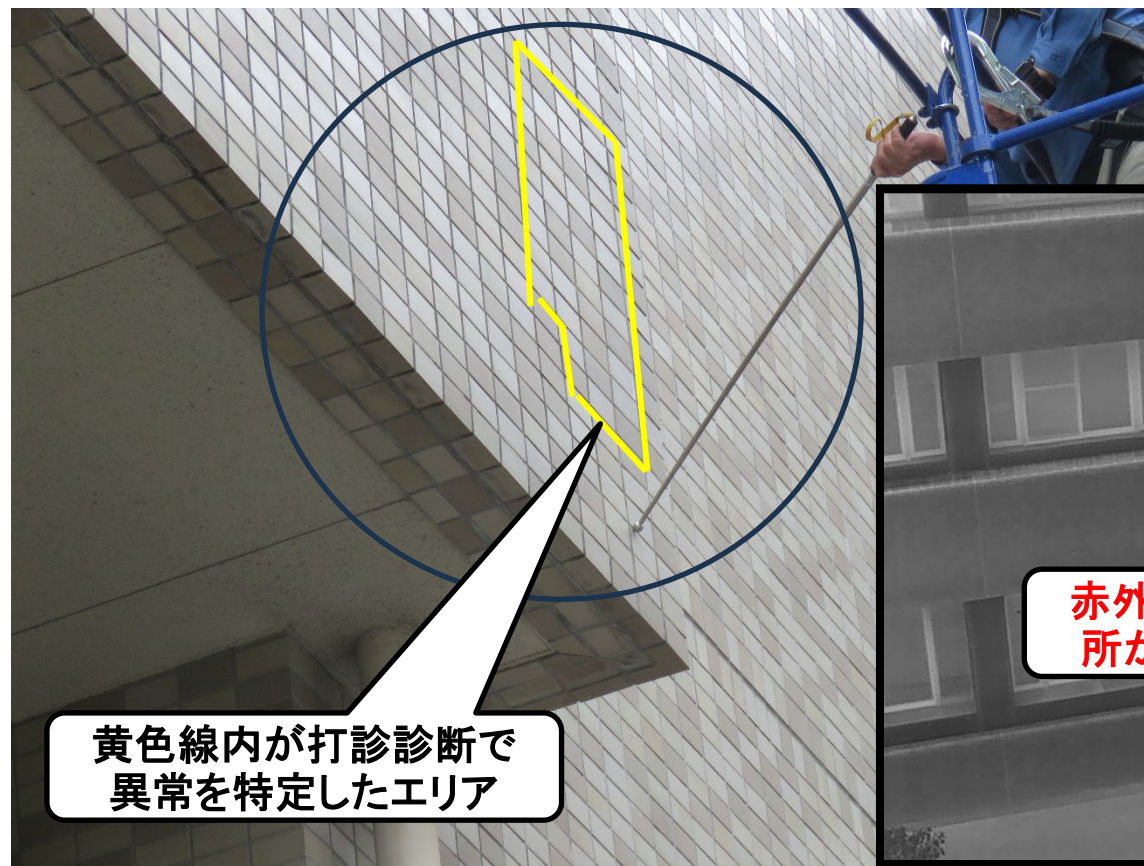


赤外線写真の画像（6号館）



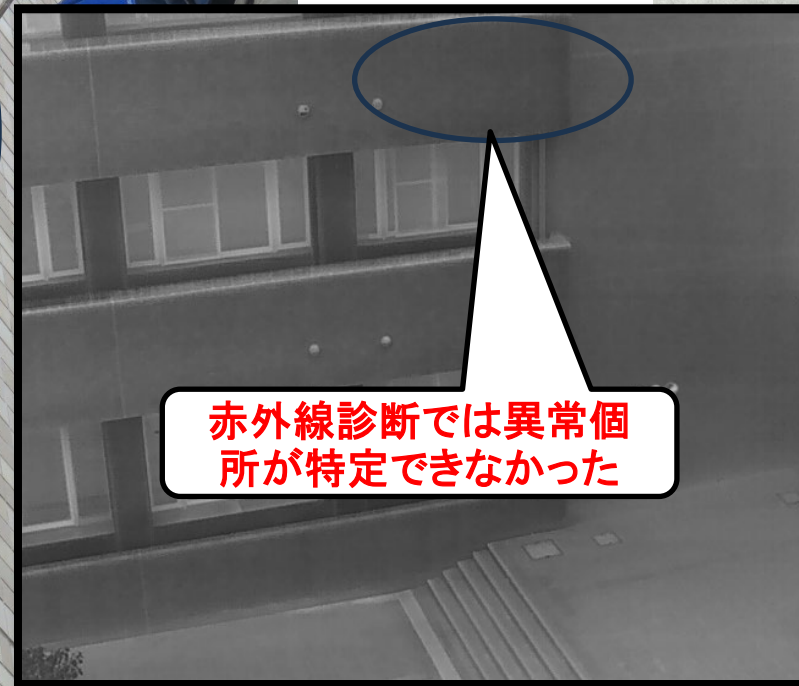
東立面図（6号館）

- 結果：打診診断により外壁材の異常箇所（外壁タイルの浮き）を特定した。
（北側凹部の外壁面であることから赤外線診断では異常箇所が特定できなかった。）



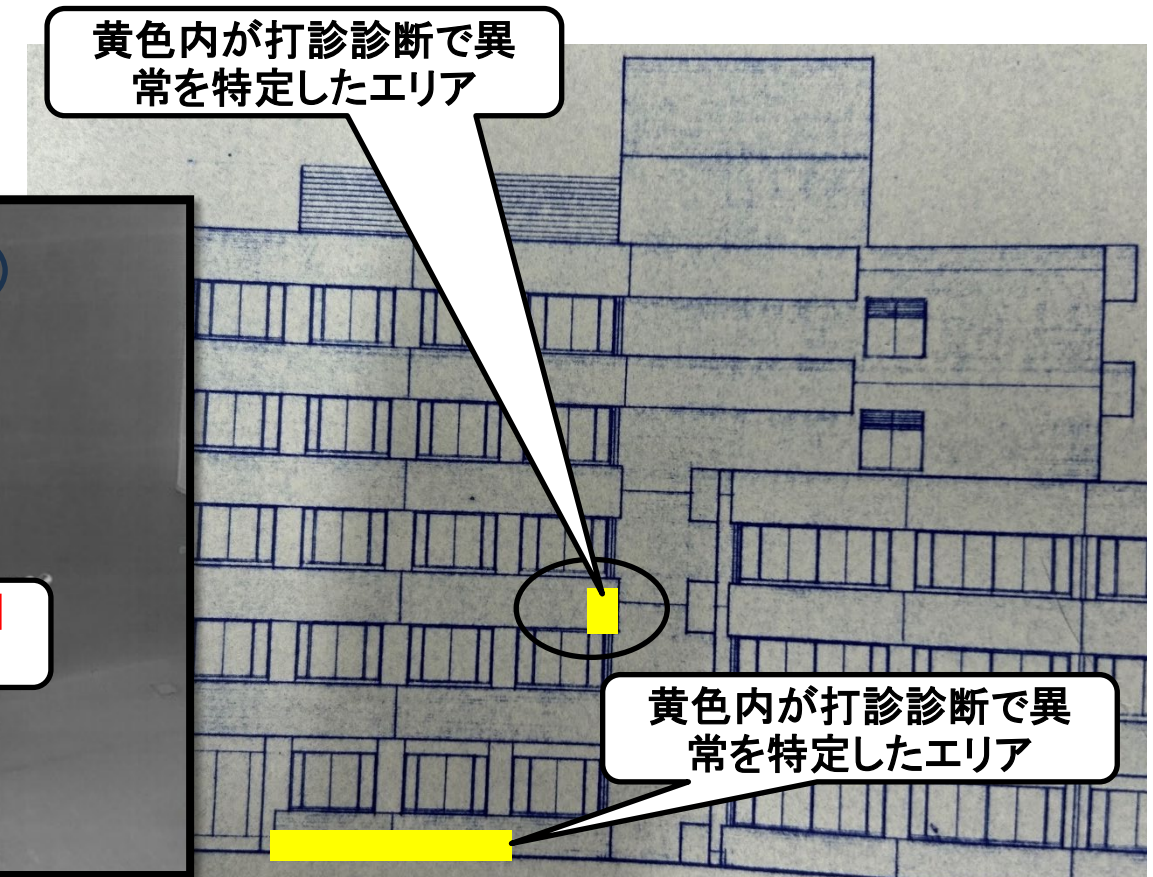
黄色線内が打診診断で異常を特定したエリア

可視カメラの写真映像



赤外線診断では異常箇所が特定できなかった

赤外線カメラの写真映像

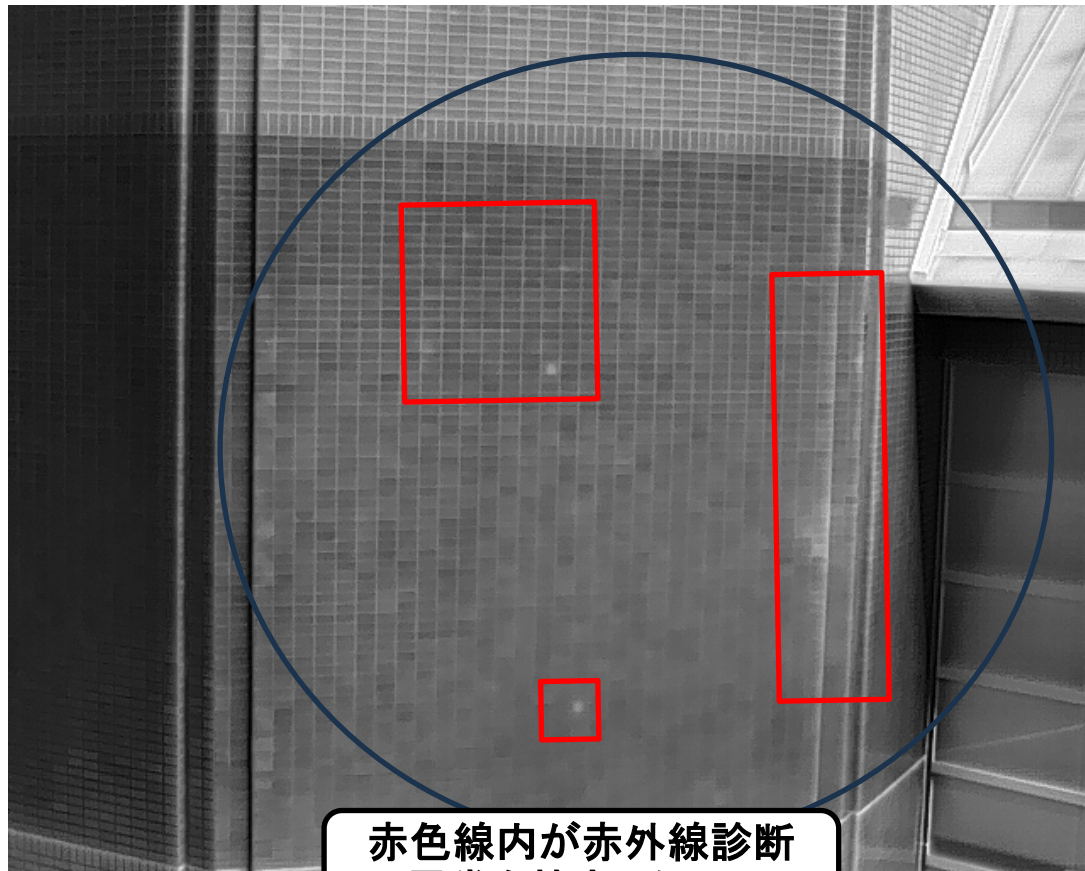


黄色内が打診診断で異常を特定したエリア

黄色内が打診診断で異常を特定したエリア

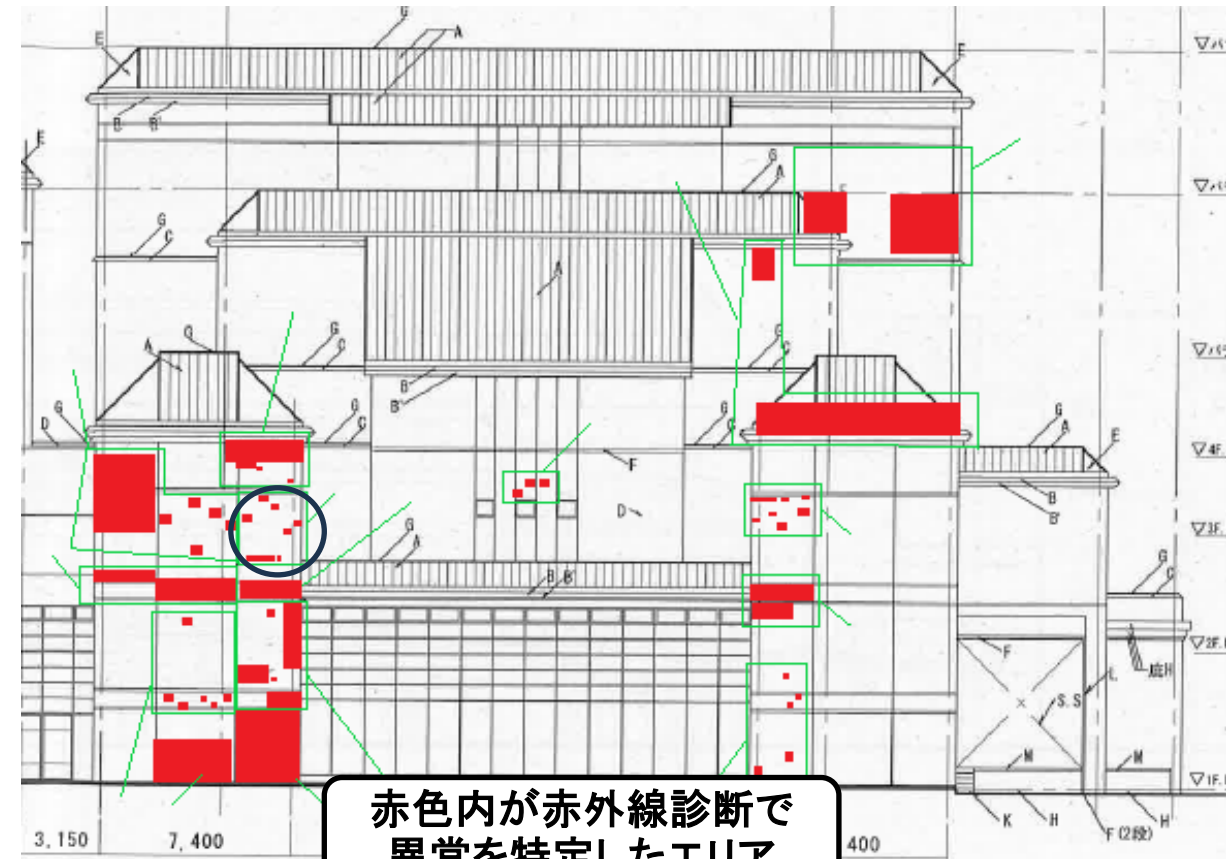
北立面図（6号館北側凹部）

■結果：打診診断及び赤外線診断により外壁材の異常箇所（外壁タイルの浮き）を特定した。



赤色線内が赤外線診断
で異常を特定したエリア

赤外線写真の画像

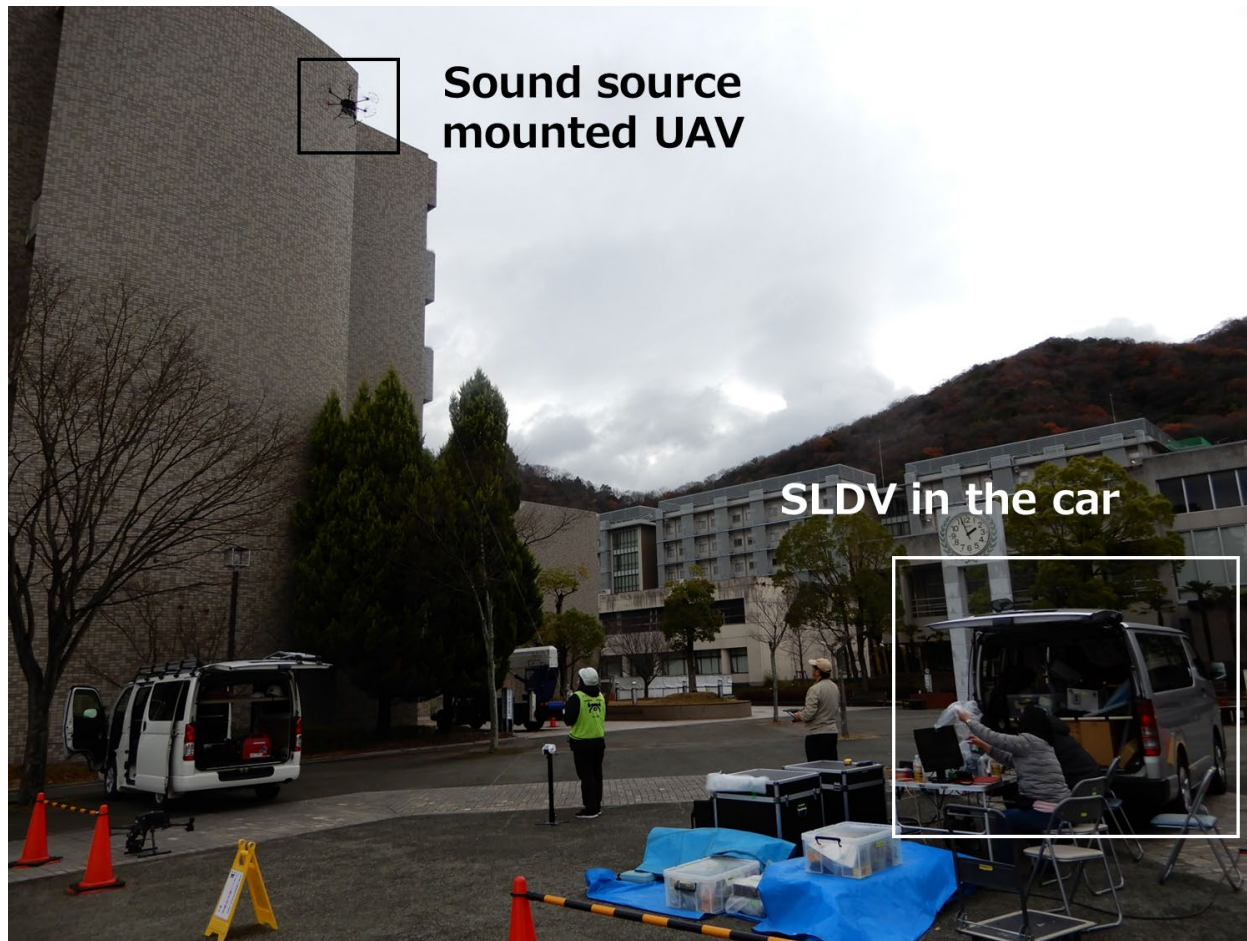


赤色内が赤外線診断で
異常を特定したエリア

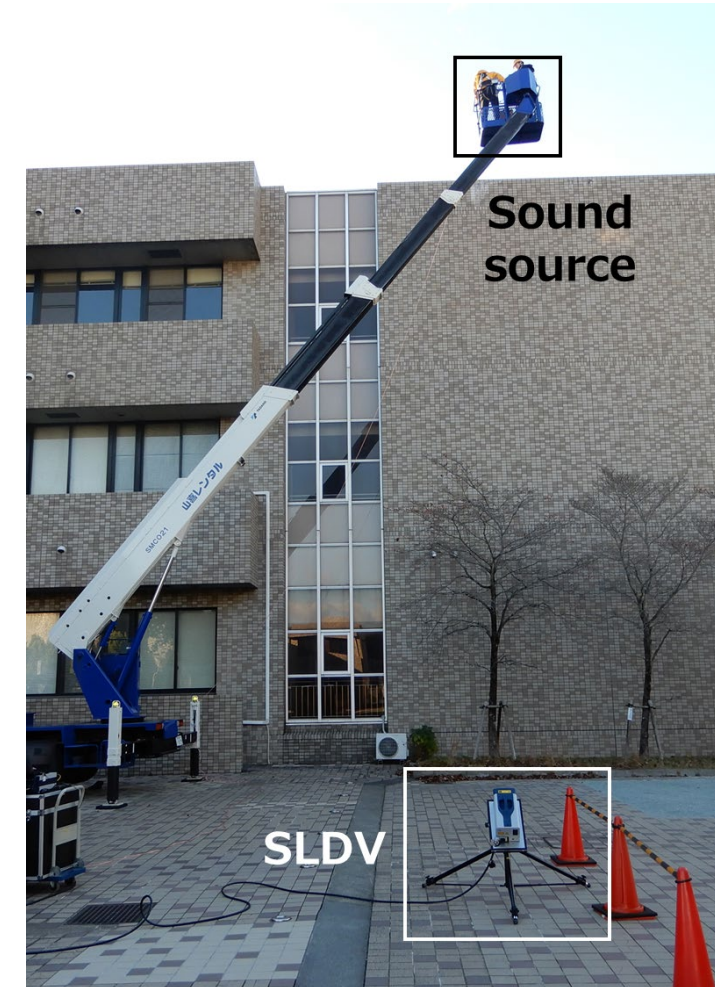
西立面図

■実施日：令和5年12月16日(土)、17日(日)

■16日はドローンに音源を搭載して実験、17日は強風のため高所作業車に音源を搭載して実験



※ドローンでの実証実験



※高所作業車での実証実験

- ・一つの共振周波数だけで映像化すると、埋設物の大きさを見誤る可能性があるため、**加振周波数帯域を積分**した振動エネルギーを映像化に使用
- ・**振動エネルギー比（VER）** は、測定点での振動エネルギーの最小値に基づいて、各点との比を計算したものである

$$[VER]_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{each}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{min}) df}$$

VER : Vibration Energy Ratio

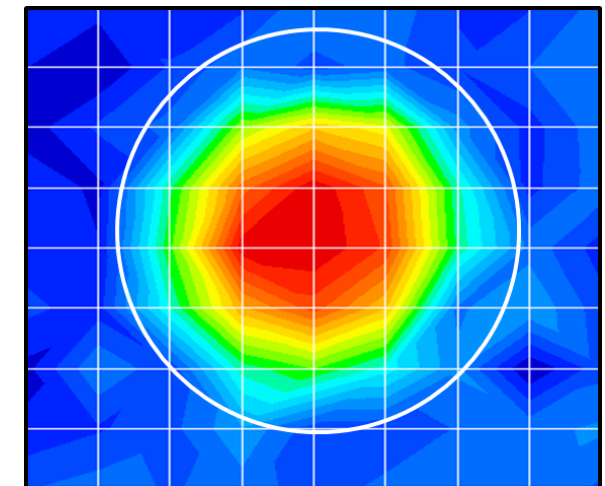
PSD : Power Spectrum Density

f₁ : Lower limit of frequency

f₂ : Upper limit of frequency

欠陥部 : 共振振動の励起により高い値

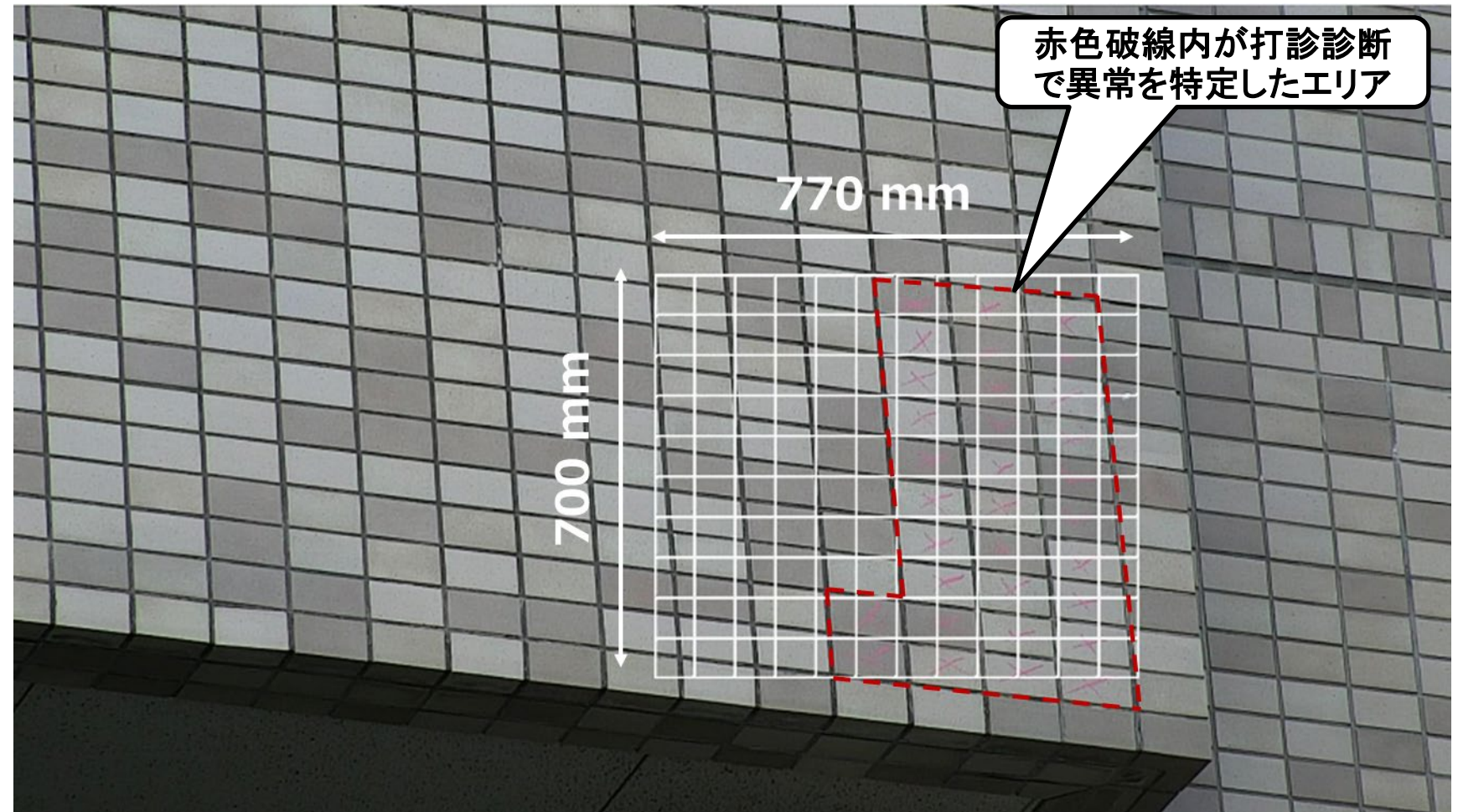
健全部 : 有意な反応が発生せず低い値



■診断位置：打診診断結果を基にその周囲を音響探査で診断（計測）した。

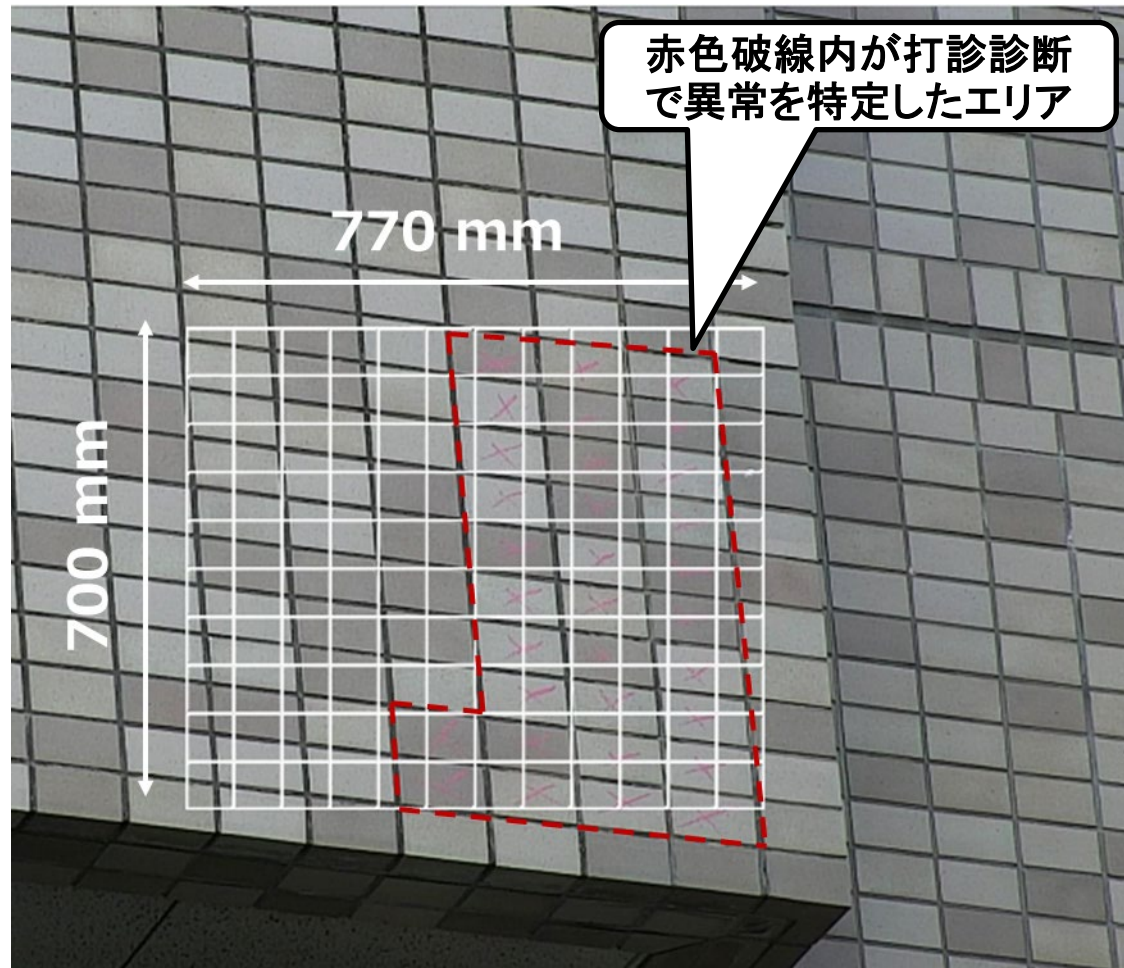


※診断位置

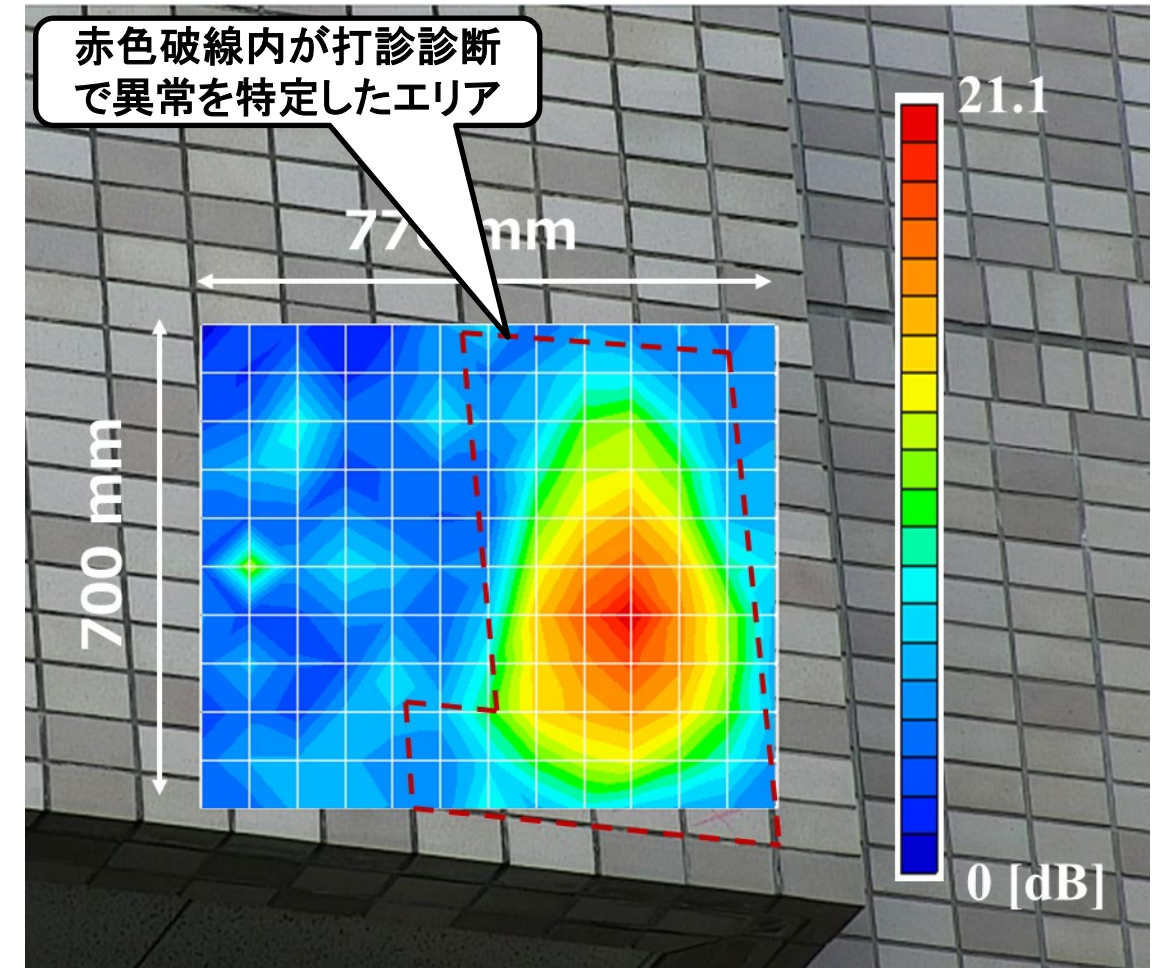


※診断位置における診断(計測)ポイント数：143点 縦11点 横13点

■結果：赤外線診断では異常個所が特定できなかった外壁面(診断エリア)において、異常箇所を特定した。



※診断エリア



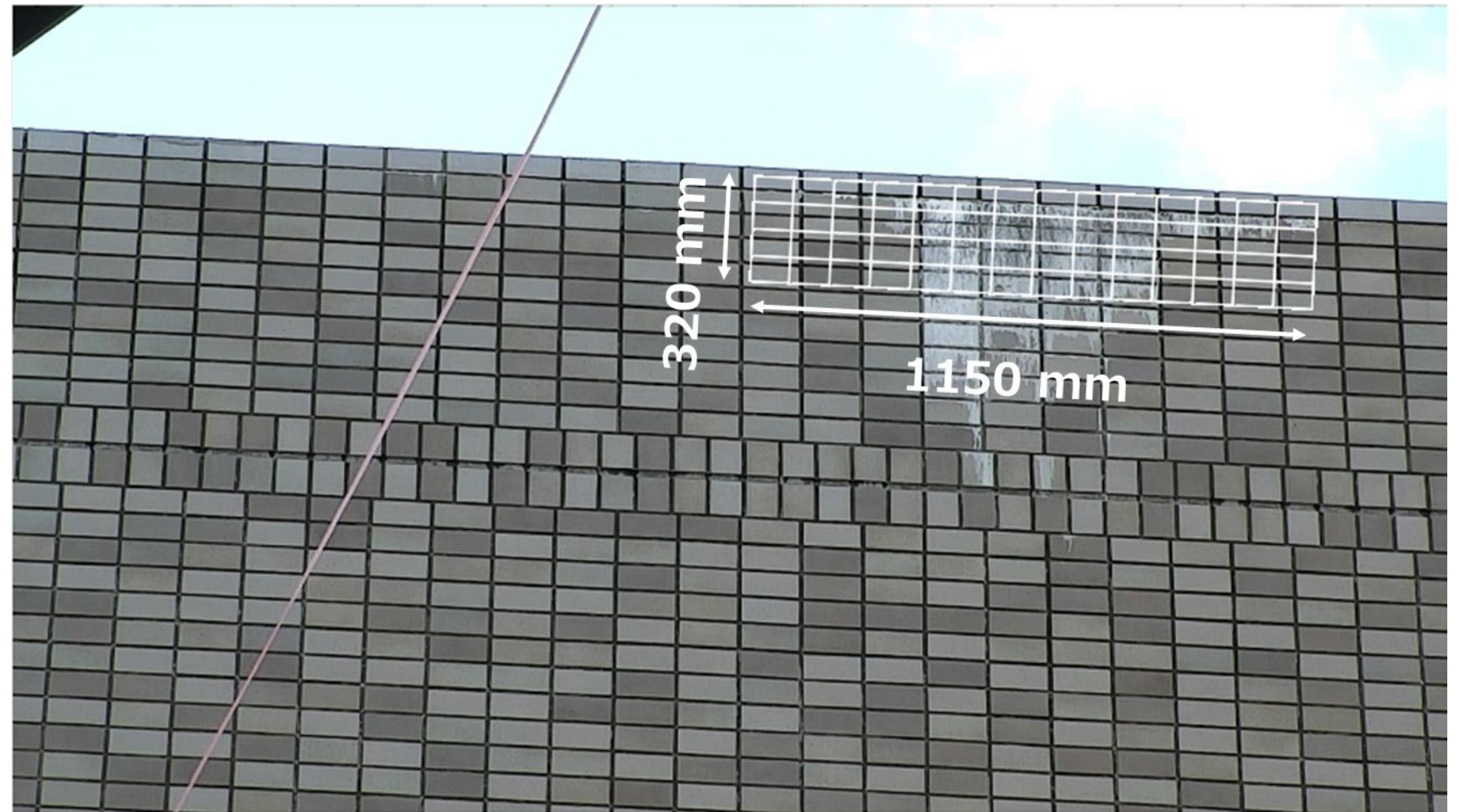
※振動エネルギー比の解析結果

レーザ距離:16.6m 音源周波数:700-4100Hz

■診断位置：打診診断や赤外線診断の結果を基に、その一部エリアを音響探査で診断（計測）した。

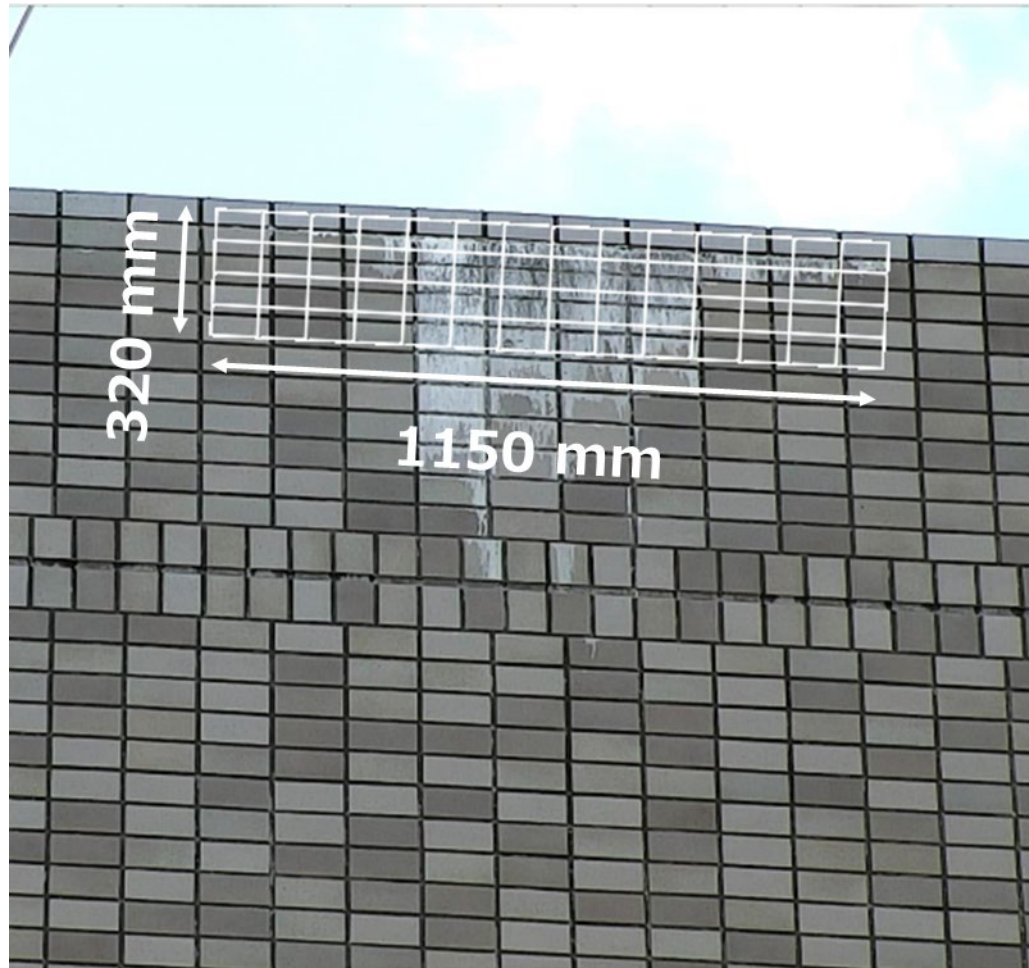


※診断位置

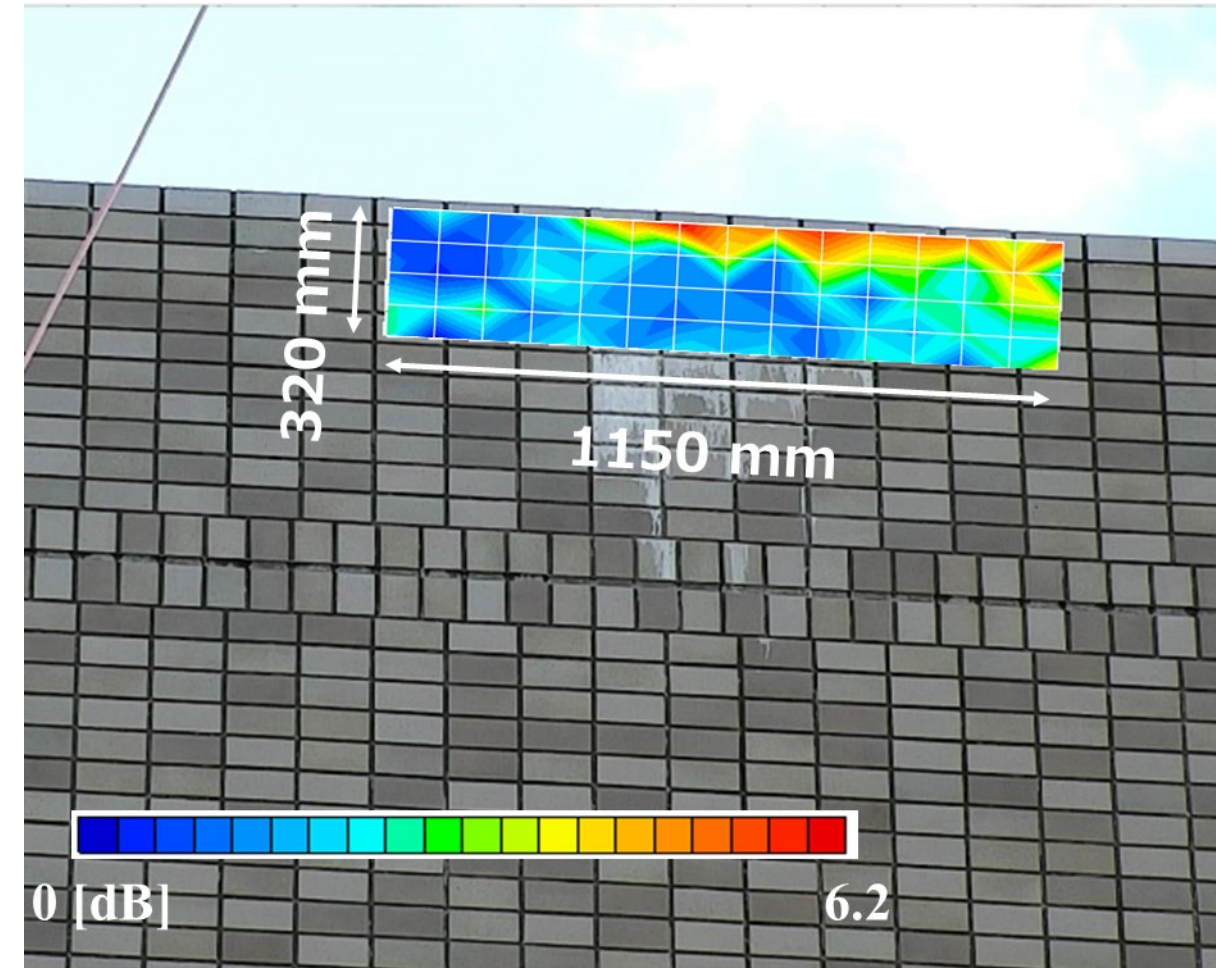


※診断(計測)ポイント数：75点 縦5点 横15点

■結果：打診診断で特定した異常箇所と同じ外壁面上端部で異常箇所を特定した。



※診断エリア



※振動エネルギー比の解析結果
レーザー距離:18.2m 音源周波数:700-4100Hz

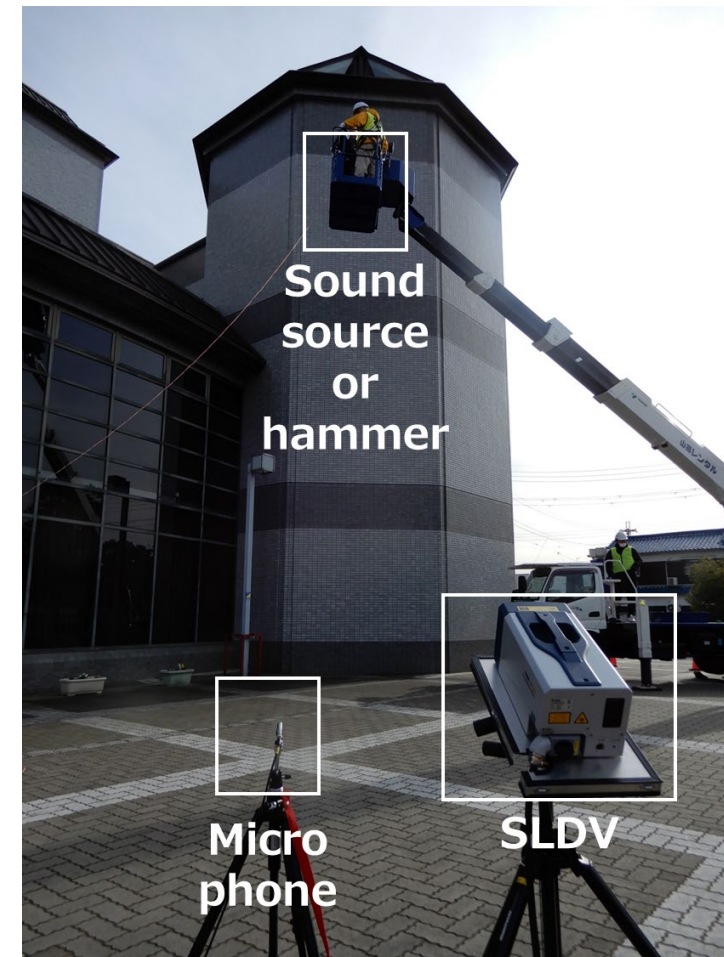
■実施日：令和5年12月18日(月)、19日(火)

■両日ともドローンに音源を搭載して実験を実施、強風時は高所作業車に音源を搭載して実験を実施

■ハーモニーホールでの実験では、検出精度を試験した。



※ドローンでの実証実験

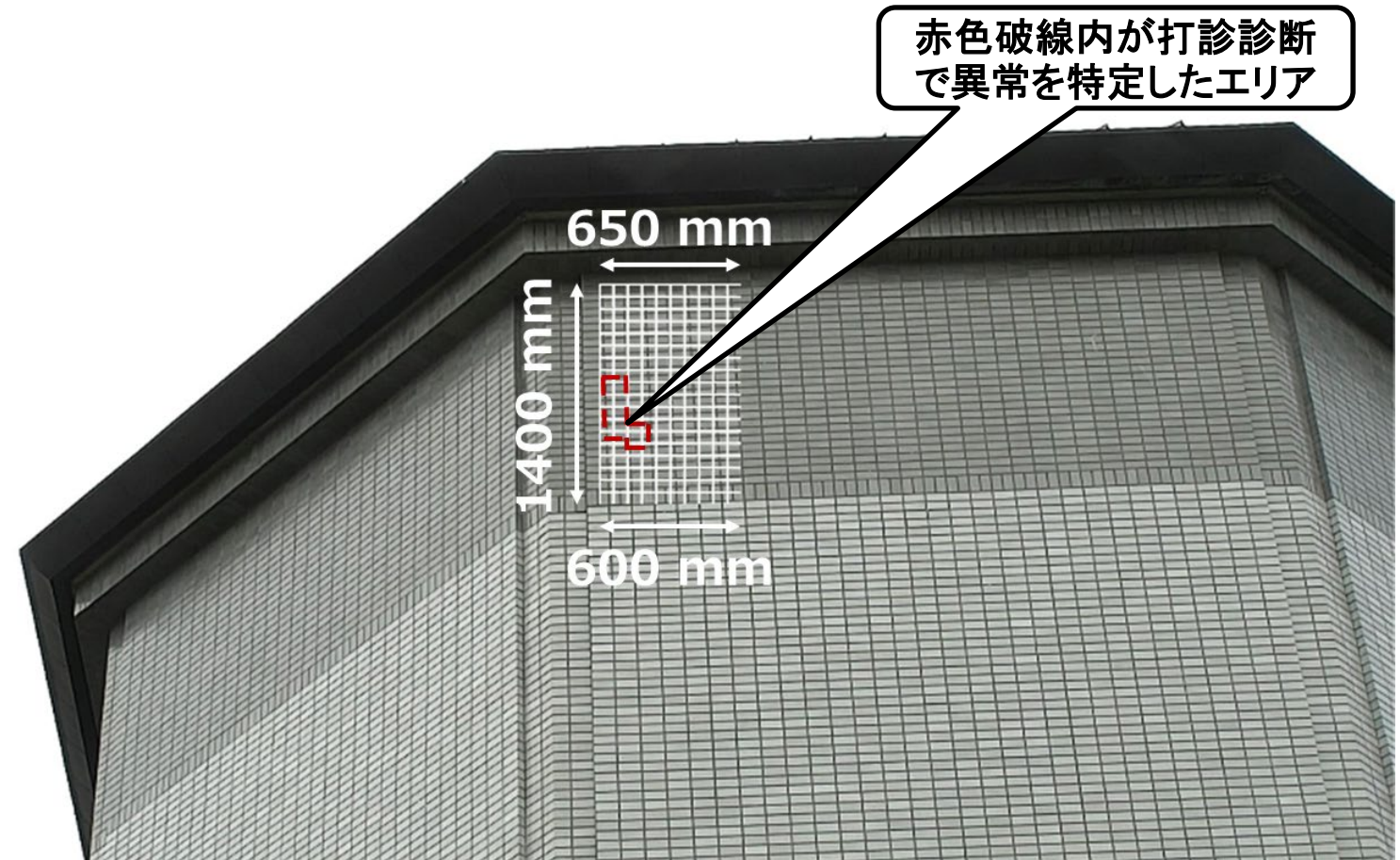


※高所作業車での実証実験

■診断位置：詳細な打診診断結果を知らせず、大まかな位置を音響探査で診断(計測)した。



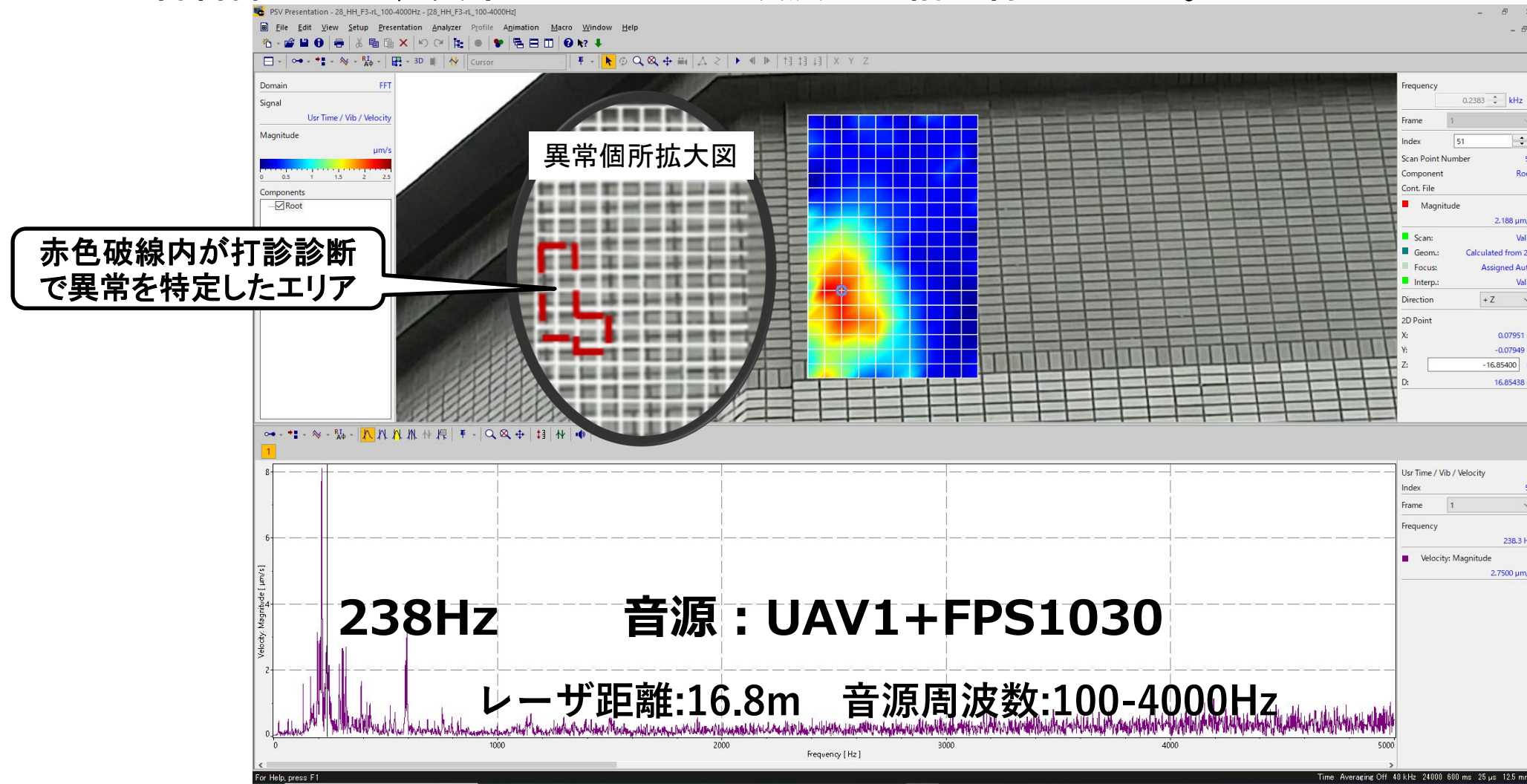
※診断位置



赤色破線内が打診診断
で異常を特定したエリア

※診断(計測)ポイント数：209点 縦19点 横11点

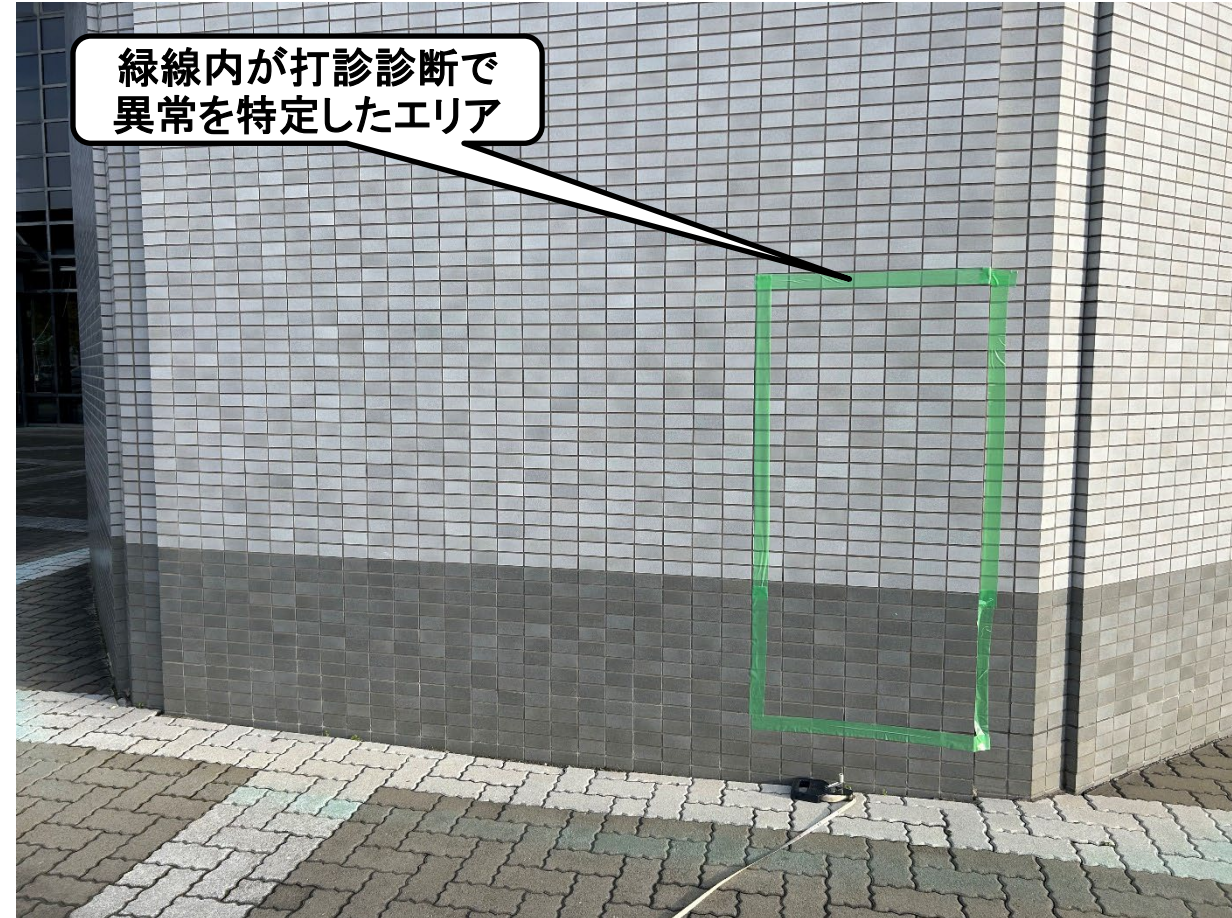
- 結果：異常個所の異常レベル（例えば外壁材の浮き厚さなど）は、打診診断では不明ですが、音響探査では、異常レベルが色の濃淡や色相で特定できた。



■診断位置：打診診断結果を基に、その周囲を音響探査で診断(計測)した。



※診断位置

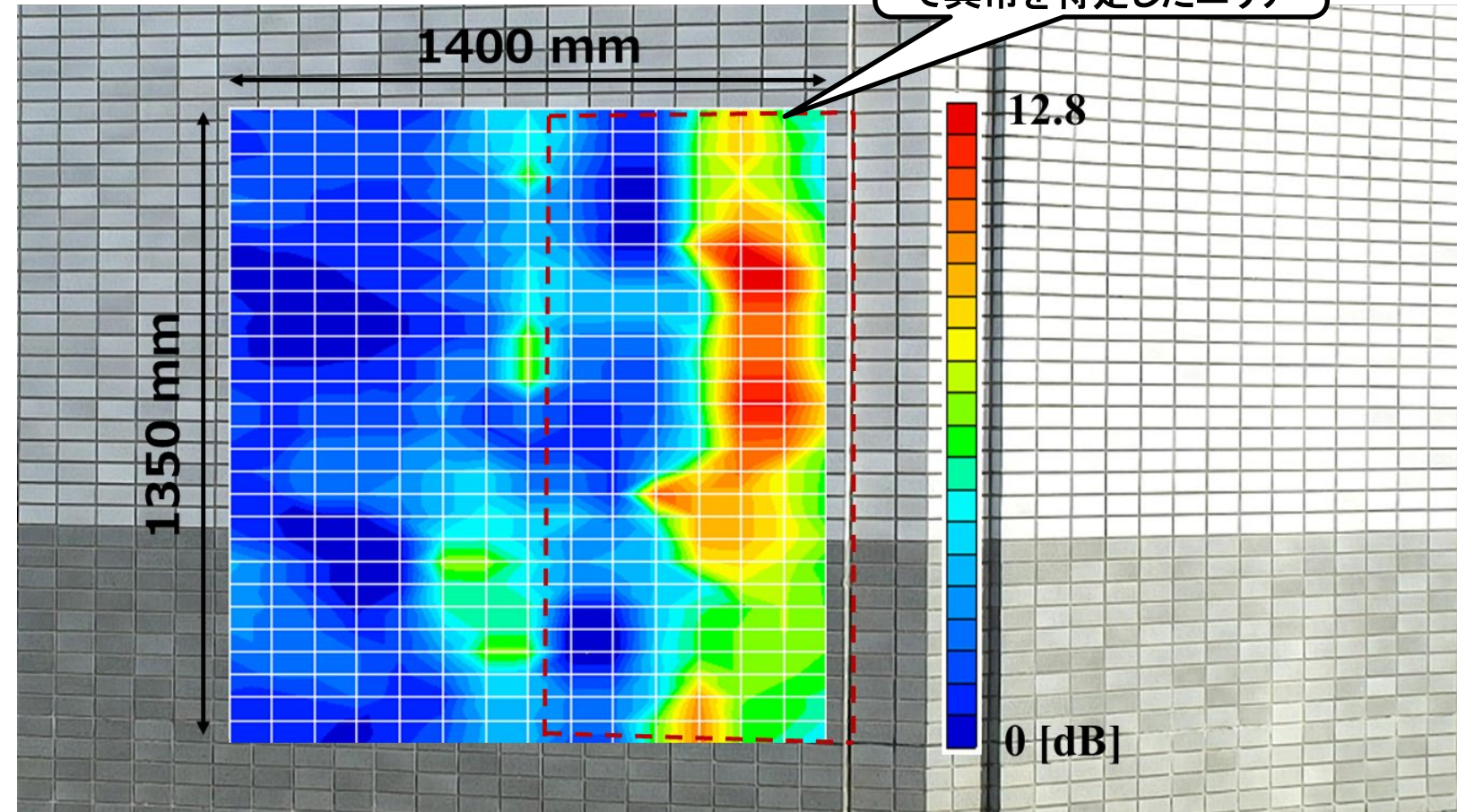


※打診による異常箇所

■結果：打診診断による広範囲の異常箇所も音響周波数を変えることで特定できた。

赤色破線内が打診診断で異常を特定したエリア

緑線内が打診診断で異常を特定したエリア



※診断位置

※診断(計測)ポイント数：435点 縦29点 横15点
レーザ距離:6.9m 音源周波数:100-4000Hz

■診断精度

- ・ **赤外線診断では異常個所の特定が困難な箇所も音響探査では異常個所の特定ができた。**
- ・ 打診診断と音響探査の検出精度比較では、異常個所エリアの精度は打診の方が明確であるが、大まかな異常個所は特定できた。
- ・ 異常個所の異常レベル（例えば外壁材の浮き厚さなど）は、打診診断では判別不能だが、音響探査では、異常レベルが色の濃淡や色相で特定できた。

■現時点でのコスト比較

- ・ 音響探査と赤外線診断のコストは、高価な機材が必要なことから音響探査がコスト高となる。
- ・ 音響探査と打診診断のコストは、建築物の規模などに大きく左右されるため、優劣はつかない。

■優位性

- ・ **赤外線診断が困難な場所でも音響探査では診断が可能のため、優位性がある。**

■その他

- ・ 音響探査作業やその解析作業には高度な専門的知識が必要である。
- ・ 超高層建築物(タワーマンション等)では、ドローンを用いた音響探査の事例がなく、未知である。

課題① 外壁面の振動を検出するレーザードップラ振動計などが高価なため、**作業コストも割高となる。**

⇒ 現状での社会実装は難しく、**作業コストの縮減が必要**である。

課題② **解析作業には高度な専門的知識が必要**

⇒ 検証を更に繰返し、**簡易な解析プログラムの開発等が必要**である。

課題③ 異常個所を特定する**音響波周波数が診断個所で異なった**



兵庫県立大 音源



ハーモニーホール 音源

⇒ 検証を更に繰返し、異常個所を特定できる音響周波数を整理・検証していく必要がある。

課題④ 超高層建築物の診断では音源位置やレーザードップラ振動計の受信位置の設定が未知である。

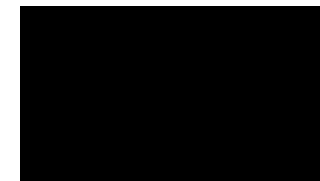
⇒ 超高層建築物の診断を実施し、検証する必要がある。

【T&T】

- ・今回の実証において、**赤外線診断が困難な外壁面でも異常個所を特定することが可能であることが分かった。**
- ・異常個所の異常レベル（例えば外壁材の浮き厚さなど）は、打診診断では不明だが、音響探査では、異常レベルが色の濃淡や色相で特定できた。
- ・現状では作業コスト、必要機材、専門的な知識の面から解決しなければならない課題があり、今すぐの社会実装には時間を要する。
- ・音響探査は赤外線診断の課題を解決できると強く実感でき、今後さらなる研究開発に取り組みたい。

【桐蔭横浜大学杉本研究室】

- ・ドローンからの音波照射加振を用いた音響探査により、初めて実際の外壁タイルにおける内部欠陥の検出に成功した（従来は主として外壁供試体による結果）。
- ・打診診断及び赤外線診断との比較も行われ、提案手法による異常個所の特定結果の妥当性が確認された。
（従来の供試体では打診との比較のみ）



出典資料

- ・ 桐蔭横浜大学杉本研究室研究資料

参考資料

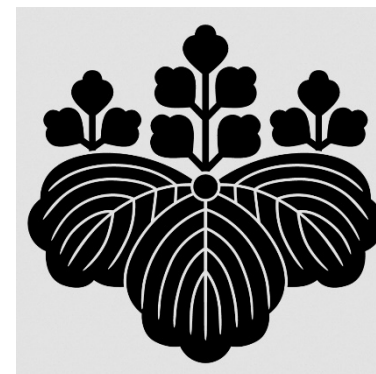
- ・ 建築基準法
- ・ H 2 0 国土交通省告示 2 8 2 号
- ・ H 2 9 国土交通省報告書（非接触方式による外壁調査の診断手法及び調査基準に関する検討）
- ・ H 3 0 国土交通省報告書（非接触方式による外壁調査の診断手法及び調査基準に関する検討）
- ・ ドローン赤外線外壁調査／国土交通省
- ・ 定期報告制度における赤外線調査（無人航空機による赤外線調査を含む）による外壁調査ガイドライン
- ・ 建物外壁材の落下事故事例



ドローン技術を活用し、安心安全な社会の実現を目指します。



株式会社 T&T
TECHNICAL & TECHNOLOGY



桐蔭横浜大学 杉本研究室

ご清聴ありがとうございました。