

論文 壁面接触型ドローンに搭載したへらによる打音のウェーブレット解析を用いた外壁タイル張り仕上げの剥離診断

永井 晴己*1・田中 大貴*2・伊藤 洋介*3・河辺 伸二*4

要旨：ドローンによる打音検査はプロペラ音の影響が懸念される。先端が球のタイル用テストハンマーによる擦過では、タイル目地でタイルを複数回打撃するため、打撃位置の特定が困難である。そこで、複数回の打撃が生じにくいへらを搭載したドローンを用いて、プロペラ音の影響が小さいタイルの剥離診断をするため、プロペラ音を含む打音をウェーブレット解析した。本研究の結果、プロペラ音の回転音は打音のピーク周波数と干渉せず、乱流音は打音の最大ウェーブレット係数より小さくなった。これにより、スカログラムを用いることで、プロペラ音を分離してタイルの剥離診断ができる。

キーワード：壁面接触型ドローン、へら、ウェーブレット解析、スカログラム、外壁タイル張り仕上げ、剥離

1. はじめに

建築物の外壁タイル張り仕上げの調査において全面打診をする際、仮設足場の設置が建築物所有者等の負担となる。負担軽減のため、ドローンによる赤外線調査が行われている。しかし、ドローンによる赤外線調査では、気象条件や建物条件、周辺環境、撮影条件等の適用条件りを満たさない場合、タイルの剥離診断は難しい。

著者ら²⁾は、気象条件等の影響を受けにくいタイルの剥離診断方法として、タイル用テストハンマーを搭載した壁面接触型ドローンによる打音をFFT分析した。浮き部は、周波数スペクトルに複数のピーク周波数が現れることがわかった。しかし、FFT分析は打音の時刻歴波形を周波数スペクトルに変換するため、時間的な打音の特徴が失われ、打音の減衰を考慮した剥離診断ができない。先端が球のタイル用テストハンマーを壁面に押付けながら移動（以下、擦過とする）するとき、タイル目地の凹部で生じた段差によりテストハンマーが反発することで複数回打撃され、打撃位置の特定が困難である。

長塚ら³⁾は、時間的な打音の特徴を利用する方法として、鉄製ハンマーでモルタル法面を叩き、その打音波形をウェーブレット変換のスカログラムで表示し、スカログラムの特徴を健全度指数で表現する試みを行った。健全度指数は、等高線で囲まれた面積と重みの積から算出するため、ドローンを用いる場合、ドローンのプロペラの風切り音（以下、プロペラ音とする）によりスカログラムでの等高線で囲まれた面積が増大し、健全度指数に影響を及ぼす。

添田ら⁴⁾は、安定した打撃のできるソレノイドアクチュエータを有する打撃装置を用いてタイルを打撃した際

の打撃応答音を収録した。剥離部では、打音の音圧と時間の関係から、打撃応答音の振幅が大きくなることを確認し、打撃応答音波形の第一波の振幅値により剥離を判定した。海老原ら⁵⁾は、打音波形の減衰特性を利用した装置により、深さ40mm程度の下地剥離まで診断できる結果を得た。これらは打音の時刻歴波形をもとに剥離診断をしているが、ドローンを用いる場合、プロペラ音により打音の音圧と減衰特性を捉えることができず、タイルの剥離診断が困難であると考えられる。

そこで本研究では、タイル用テストハンマーより軽量で、タイル目地の凹部で生じた段差により反発しにくいへらをドローンに搭載してタイル壁面を擦過し、プロペラ音を含む打音の時刻歴波形をウェーブレット変換して、スカログラムで表示する。スカログラムはプロペラ音を含む打音の音圧と時刻成分だけでなく、周波数成分を表示できる。スカログラムを用いれば周波数成分により打音とプロペラ音を分離し、打音のみの音圧と減衰特性を用いてタイルの剥離診断ができると考え、その方法について検討する。

2. 疑似浮き試験体

本研究では、国土交通省 建築基準整備促進事業 T1⁶⁾の標準浮き試験体に準拠した疑似浮き試験体を使用する。表-1に疑似浮き試験体の構成材料と仕様、表-2に疑似浮き試験体の打音の計測データの種類、図-1に疑似浮きの範囲と打撃する位置、図-2に疑似浮き試験体の断面を示す。疑似浮き材料には、厚さ1mmのポリエチレン発泡シートを使用し、コンクリートと下地モルタルの界面に挟み込み、浮きを疑似的に作製する。

*1 名古屋工業大学大学院 工学専攻 (学生会員)

*2 名古屋工業大学大学院 工学専攻 修士(工学) (学生会員)

*3 名古屋工業大学大学院 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 名古屋工業大学大学院 教授 工博 (フェロー会員)

3. ウェーブレット解析

ウェーブレット解析^{7),8)}は、音の時刻歴波形をウェーブレット変換し、周波数、時刻、音の大きさを表すウェーブレット係数の絶対値の関係をスカログラムに示す時間周波数解析である。そのため、周波数ごとのウェーブレット係数の絶対値の時間的変化を捉えることができる。また、フーリエ解析と比べてウェーブレット解析の方が打音のような過渡的な現象に有効である。ここで、ウェーブレット係数 $W(a, b)$ は、 ψ ：マザーウェーブレット、 t ：時刻、 a ：スケールパラメータ、 b ：シフトパラメータ、 $x(t)$ ：打音の時刻歴波形を用いて、式(1)で示される。

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

a, b はそれぞれ周波数と時刻に対応している。本研究においてウェーブレット係数は、マザーウェーブレットのスケールを変化、シフトさせて、任意の時刻における任意の周波数のマザーウェーブレットと打音の時刻歴波形との近似の度合いにより、任意の時刻における任意の周波数の音の大きさを示す。

図-3 に周波数と時刻とウェーブレット係数の絶対値の関係を3次元グラフで示す。3次元グラフの等高線は、最大のウェーブレット係数の絶対値を10分割して表示する。スカログラムは、この3次元グラフの等高線とカラースケールを2次元（平面）で示す。

4. へらによる打音のスカログラムの特徴

写真-1 にへらの擦過による打音の計測の様子を示す。本体部から延びるばねの先端に固定したへらをばねの変形による一定の力で壁面に押付けた後、スライドレールによりタイル目地をまたぐように壁面に平行に移動する。タイル目地の凹部で生じた段差により、へらが壁面を打撃する音を計測する。写真-1 に示す壁面に接触する2つのスライドレールの間隔は、スライドレールが浮き部に接触しない間隔とする。へらの寸法は、縦30mm×横15mm×厚さ1mmで質量約3.5gとし、ばねとへらの材質はステンレスとする。静止時にへらがタイル壁面を押付ける力を約1.5N、擦過する速度を200~250mm/sとする。

表-1 疑似浮き試験体の構成材料と仕様

材料	仕様
コンクリート	縦 1150 mm×横 6300 mm×厚さ 215 mm
吸水調整材	エチレン酢酸ビニル系エマルジョン
疑似浮き材料	ポリエチレン発泡シート (発泡倍率：30倍、厚さ：1 mm) 面積：200 mm 角 / 300 mm 角
下地材	普通モルタル(セメント:砂=1:3) 厚さ：5 mm / 10 mm / 15 mm
張付け材	既調合タイル張付けモルタル
タイル	45 二丁モザイクタイル、BI類、施釉 厚さ：7 mm、裏足高さ：1.5 mm
目地材	既調合目地モルタル

表-2 疑似浮き試験体の打音の計測データの種類

No.	浮き面積	下地モルタル厚さ[mm]
1	健全部 (浮きなし)	5
2		10
3		15
4	200 mm 角浮き部	5
5		10
6		15
7	300 mm 角浮き部	5
8		10
9		15

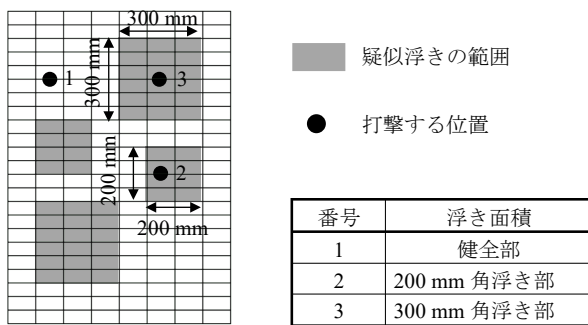


図-1 疑似浮きの範囲と打撃する位置

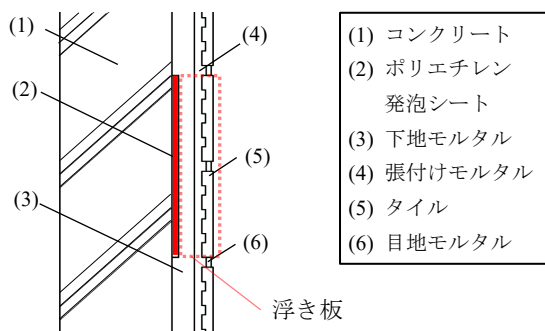


図-2 疑似浮き試験体の断面

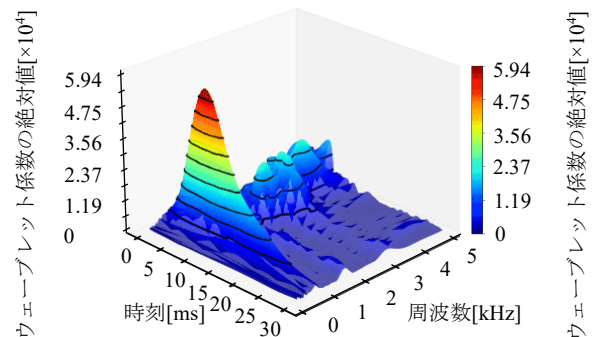


図-3 周波数と時刻とウェーブレット係数の絶対値の関係

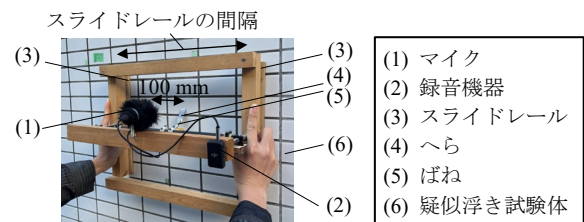


写真-1 へらの擦過による打音の計測の様子

マイクは壁面から面外方向に 100 mm 離し固定する。

図-4 に下地モルタル厚さ 5 mm の健全部, 図-5 に下地モルタル厚さ 5 mm の 300 mm 角浮き部の打音のスカログラムを示す。縦軸に周波数[kHz], 横軸に時刻[ms], ウェーブレット係数の絶対値を等高線とカラースケールで示す。ここで, 打撃時刻近傍の等高線の時刻軸方向の最大の長さを残響時間, 残響時間を構成する等高線内の最大のウェーブレット係数の絶対値を最大ウェーブレット係数とする。浮き部では, 健全部より残響時間が長く, 最大ウェーブレット係数が大きくなる。また, 浮き部の最大ウェーブレット係数における周波数をピーク周波数とする。図-5 より, 下地モルタル厚さ 5 mm の 300 mm 角浮き部の打音のピーク周波数は 0.76 kHz である。

5. 壁面接触型ドローンに搭載したへらによる実験

5.1 壁面接触型ドローン

本研究では, 前方にホイールを 4 つ設置するドローン (以下, 壁面接触型ドローンとする) を用いて, 壁面に接触しながら上下移動を行う。写真-2 に壁面接触型ドローンを示す。壁面接触型ドローンには, ばねの先端に固定したへら, マイク, 録音機器を搭載する。

5.2 実験方法

壁面接触型ドローンを壁面に接触させ, 下降することでタイル壁面を擦過し, タイル目地の凹部で生じた段差により, へらが壁面を打撃する音を計測する。写真-3 に壁面接触型ドローンによる実験の様子を示す。

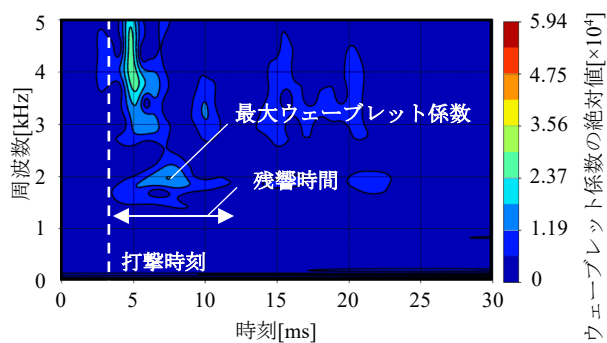


図-4 打音のスカログラム No. 1
(下地モルタル厚さ 5 mm, 健全部)

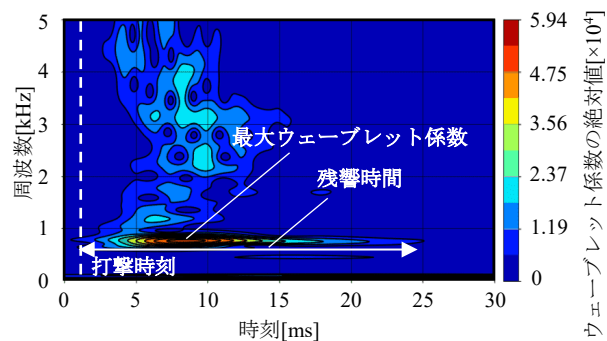


図-5 打音のスカログラム No. 7
(下地モルタル厚さ 5 mm, 300 mm 角浮き部)

5.3 実験結果と考察

(1) プロペラ音を含む打音の時刻歴波形

代表例として, 図-6 に下地モルタル厚さ 5 mm の健全部, 図-7 に下地モルタル厚さ 5 mm の 300 mm 角浮き部の壁面接触型ドローンによる打音の時刻歴波形を示す。計測時刻全体にわたってプロペラ音の音圧を含むため, 打音の音圧が特定できず, 既往の研究⁵⁾で用いられた手法では打音の減衰特性を捉えることができない。

(2) プロペラ音のスカログラム

図-8 にプロペラ音のみのスカログラムを示す。回転翼に起因する騒音は主として, ピーク性の周波数特性を

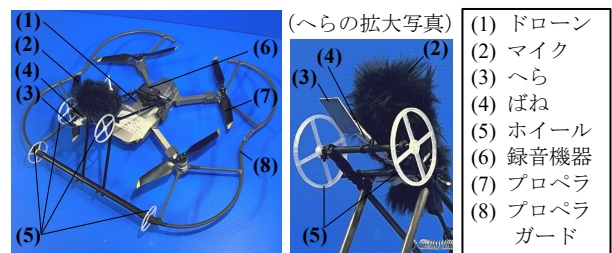


写真-2 壁面接触型ドローン

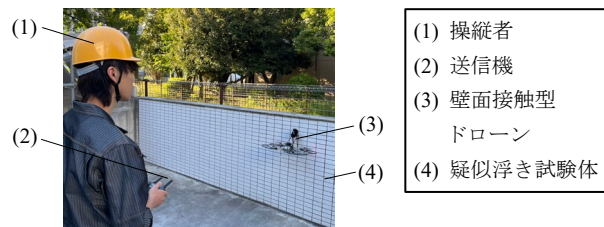


写真-3 壁面接触型ドローンによる実験の様子

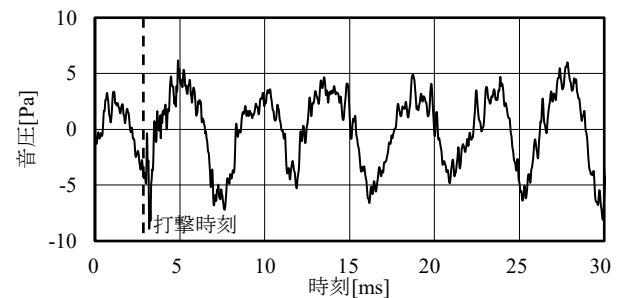


図-6 壁面接触型ドローンによる打音の時刻歴波形
No. 1 (下地モルタル厚さ 5 mm, 健全部)

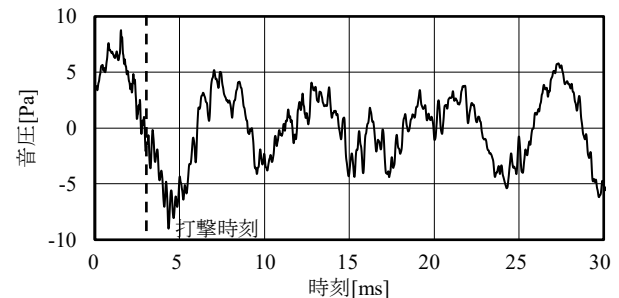


図-7 壁面接触型ドローンによる打音の時刻歴波形
No. 7 (下地モルタル厚さ 5 mm, 300 mm 角浮き部)

もつ回転音と、ランダムな周波数成分をもつ乱流音に分類 9) できる。ドローンのプロペラ音についても回転音と乱流音に分類できる。本研究では、プロペラ音の回転音により、周波数 0.25 kHz 付近にピーク周波数が現れる。

図-5 より、下地モルタル厚さ 5 mm の 300 mm 角浮き部の打音のピーク周波数は、0.50 kHz 以上である。周波数 0.50 kHz 以上に着目することで、プロペラ音の回転音を分離できると考える。

周波数 0.50 kHz 以上では、プロペラ音の乱流音による

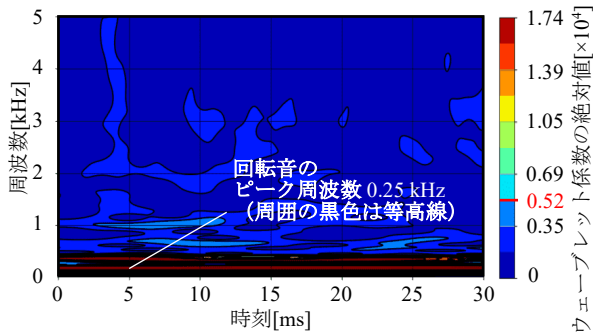


図-8 プロペラ音のスカログラム (壁面接触型ドローン)

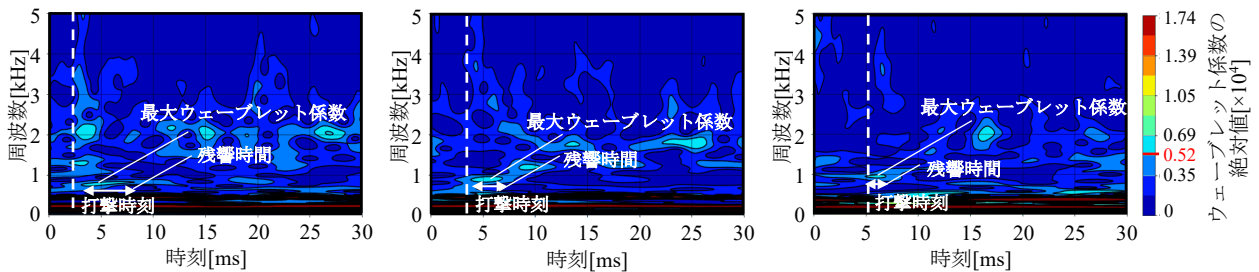
等高線が現れるが、乱流音のウェーブレット係数の絶対値は 0.51×10^4 以下である。打音の最大ウェーブレット係数がこれを超過していれば、ウェーブレット係数の絶対値 0.51×10^4 より高い等高線のみに着目することで、プロペラ音の乱流音を分離できると考える。

(3) プロペラ音を含む打音のスカログラム

図-9 に健全部、図-10 に 200 mm 角浮き部、図-11 に 300 mm 角浮き部の下地モルタル厚さ 5 mm, 10 mm, 15 mm における打音のスカログラムを示す。表-3 にスカログラムから得られた打音の特徴を示す。

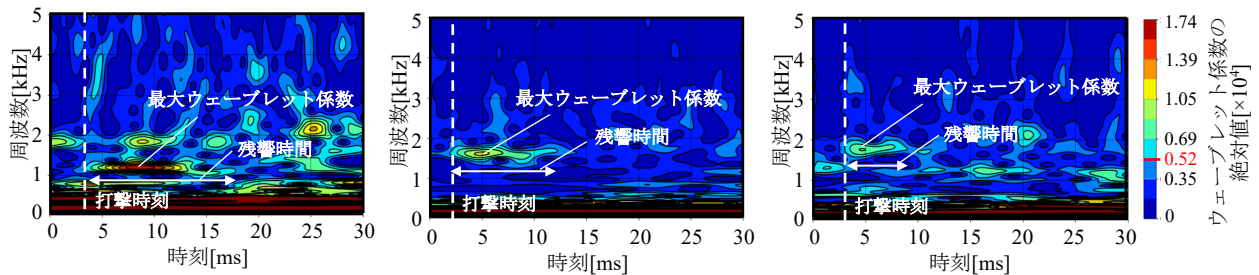
図-9 から図-11 と表-3 より、浮き部の打音のピーク周波数はいずれの下地モルタル厚さと浮き面積においても周波数 0.50 kHz 以上であり、プロペラ音の回転音のピーク周波数 0.25 kHz と干渉しない。そのため、周波数 0.50 kHz 以上に着目することで、浮き部の打音とプロペラ音の回転音を分離できる。

また、周波数 0.50 kHz 以上では、いずれのスカログラムでも、スカログラム全体にプロペラ音の乱流音が生じるが、乱流音のウェーブレット係数の絶対値は 0.51×10^4



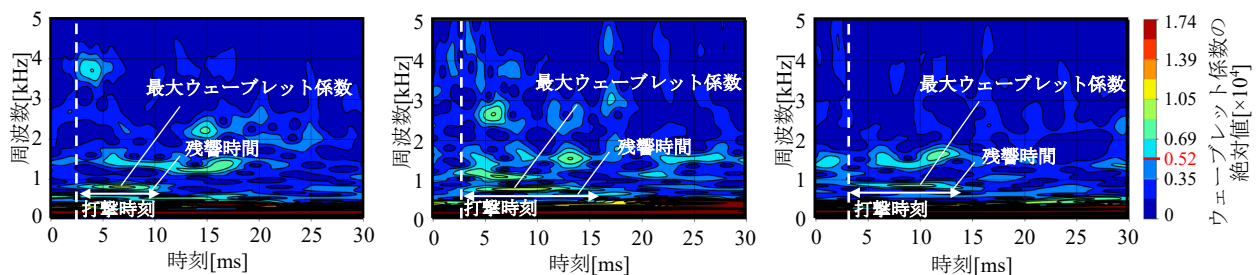
(a) 下地モルタル厚さ 5 mm No.1 (b) 下地モルタル厚さ 10 mm No.2 (c) 下地モルタル厚さ 15 mm No.3

図-9 打音のスカログラム(壁面接触型ドローン, 健全部)



(a) 下地モルタル厚さ 5 mm No.4 (b) 下地モルタル厚さ 10 mm No.5 (c) 下地モルタル厚さ 15 mm No.6

図-10 打音のスカログラム(壁面接触型ドローン, 200 mm 角浮き部)



(a) 下地モルタル厚さ 5 mm No.7 (b) 下地モルタル厚さ 10 mm No.8 (c) 下地モルタル厚さ 15 mm No.9

図-11 打音のスカログラム(壁面接触型ドローン, 300 mm 角浮き部)

以下であり、健全部の最大ウェーブレット係数は 0.56×10^4 以上、浮き部の最大ウェーブレット係数は 0.75×10^4 以上である。そのため、打音の最大ウェーブレット係数は、プロペラ音の乱流音のウェーブレット係数の絶対値より大きくなる。よって、プロペラ音の乱流音のウェーブレット係数の絶対値 0.51×10^4 より高い 0.52×10^4 以上の等高線のみを参照することで、打音とプロペラ音の乱流音を分離できる。

以上より、スカログラムで周波数 0.50 kHz 以上とウェーブレット係数の絶対値 0.52×10^4 以上に着目することで、いずれの下地モルタル厚さと浮き面積においても、浮き部は健全部より最大ウェーブレット係数は高く、残響時間は長くなる。プロペラ音を含む打音の場合でも、スカログラムを用いることでタイルの剥離診断ができる。

図-10 と図-11、表-3 より、浮き部の打音は、下地モルタル厚さと浮き面積によりピーク周波数が異なる。これは、図-2 に示す浮き部の下地モルタル、張付けモルタル、目地モルタルとタイルから構成される四辺が半固定された板状部分（以下、浮き板とする）の固有振動の違いによるものと考えられる。図-12 にピーク周波数と下地モルタル厚さの関係を示す。下地モルタル厚さ 5 mm の 300 mm 角浮き部を除き、下地モルタル厚さが大きくなるとピーク周波数は高くなる。

表-3 スカログラムから得られた打音の特徴
(壁面接触型ドローン)

浮き面積	下地モルタル厚さ[mm]	残響時間 [ms]	最大ウェーブレット係数[$\times 10^4$]	ピーク周波数[kHz]
健全部	5	5.3	0.58	なし
	10	3.1	0.61	なし
	15	2.1	0.56	なし
200 mm 角浮き部	5	14.6	1.74	1.20
	10	10.4	1.09	1.61
	15	6.0	0.89	1.81
300 mm 角浮き部	5	8.0	0.93	0.81
	10	13.6	1.01	0.77
	15	10.8	0.75	0.87

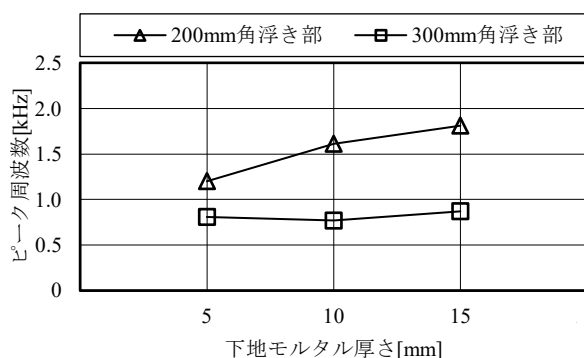


図-12 ピーク周波数と下地モルタル厚さの関係
(壁面接触型ドローン)

図-13 に残響時間と下地モルタル厚さの関係を示す。下地モルタル厚さ 5 mm の 300 mm 角浮き部を除き、下地モルタル厚さが大きくなると残響時間は短くなる。これは、下地モルタル厚さが大きくなるとピーク周波数が高くなり、打撃による浮き板の振動が減衰しやすくなるためと考える。また、下地モルタル厚さ 5 mm の 300 mm 角浮き部を除き、300 mm 角浮き部より 200 mm 角浮き部の方が残響時間は短くなる。これも同様に、200 mm 角浮き部の方が 300 mm 角浮き部よりピーク周波数が高く減衰しやすくなるためと考える。

図-14 に最大ウェーブレット係数と下地モルタル厚さの関係を示す。浮き部では、下地モルタル厚さ 5 mm の 300 mm 角浮き部を除き、下地モルタル厚さが大きくなると、最大ウェーブレット係数は小さくなる。水澤ら¹⁰⁾は、鋼球が衝突する鋼板の板厚が大きくなると、鋼板の局所変形が小さくなるため、衝撃パルス音のピーク値は減少することを示した。浮き板についても下地モルタル厚さが大きくなると浮き板の厚さは大きくなり、局所変形が小さくなるため、音の大きさを表す最大ウェーブレット係数が小さくなると考える。

図-13 と図-14 より、300 mm 角浮き部では、下地モルタル厚さ 5 mm よりも下地モルタル厚さ 10 mm の方が残響時間は長くなり、最大ウェーブレット係数は大きくなる。要因として打音とプロペラ音の合成波による影響

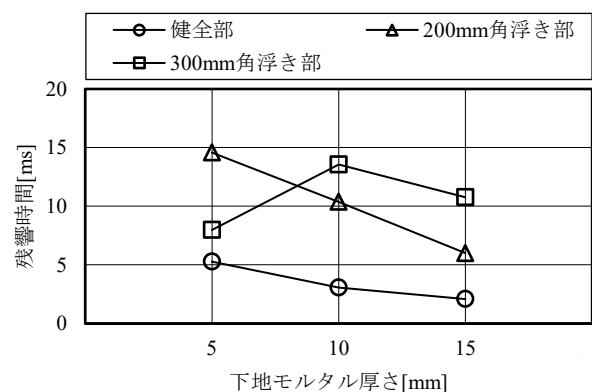


図-13 残響時間と下地モルタル厚さの関係
(壁面接触型ドローン)

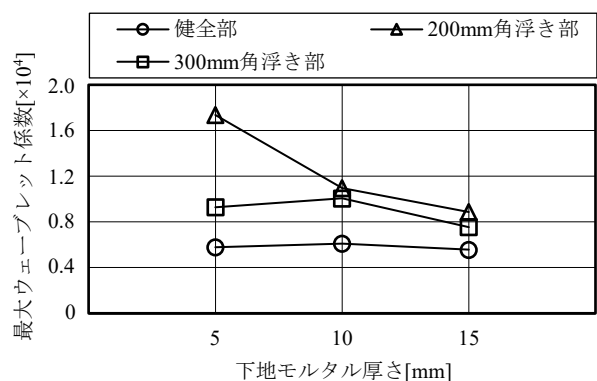


図-14 最大ウェーブレット係数と下地モルタル厚さの関係
(壁面接触型ドローン)

や、300 mm 角浮き部の横に直立する壁の影響で壁面接触型ドローンの飛行が不安定になり、擦過時のへの押圧力と壁面を擦過する速度に変化が生じた影響が考えられる。影響要因について、現時点では明確でないため、今後継続して検討を行う。

(4) スカログラムによる剥離診断

図-15に最大ウェーブレット係数と残響時間の関係を示す。壁面接触型ドローンによる打音のスカログラムからタイルの剥離診断をするため、最大ウェーブレット係数と残響時間に閾値を設ける。下地モルタル厚さと浮き面積によらず、最大ウェーブレット係数と残響時間それぞれの健全部の最大値と浮き部の最小値の平均値を閾値とすることでタイルの剥離診断が可能であると考えられる。最大ウェーブレット係数は、健全部の最大値が 0.61×10^4 、浮き部の最小値が 0.75×10^4 であるため、閾値を 0.68×10^4 とする。残響時間は、健全部の最大値が 5.3 ms、浮き部の最小値が 6.0 ms のため、閾値を 5.7 ms とする。

最大ウェーブレット係数と残響時間それぞれの健全部と浮き部で差が生じにくい下地モルタル厚さや浮き面積があり、最大ウェーブレット係数と残響時間のどちらか一方のみではタイルの剥離診断が困難な場合がある。そのため、最大ウェーブレット係数と残響時間の2つの特徴を考慮したパラメータにより評価することで、より高い精度でタイルの剥離診断ができると考える。

6. まとめ

本研究の範囲内で以下のことがわかった。

- 1) 周波数 0.50 kHz 以上に着目することで、浮き部の打音とプロペラ音の回転音を分離できる。
- 2) プロペラ音の乱流音のウェーブレット係数の絶対値 0.51×10^4 より高い 0.52×10^4 以上の等高線のみを参照することで、打音とプロペラ音の乱流音を分離できる。
- 3) スカログラムで周波数 0.50 kHz 以上とウェーブレット係数の絶対値 0.52×10^4 以上に着目することで、いずれの下地モルタル厚さと浮き面積においても、浮き部は健全部より最大ウェーブレット係数は高く、残響時間は長くなる。プロペラ音を含む打音の場合でも、スカログラムを用いることでタイルの剥離診断ができる。
- 4) 最大ウェーブレット係数と残響時間の2つの特徴を考慮したパラメータにより評価することで、より高い精度でタイルの剥離診断ができる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP19K04708 の助成を受けたものです。実験の実施にあたり有限会社エムアンドティー渡辺正雄氏、中島圭二氏、名古屋工業大学山本純平

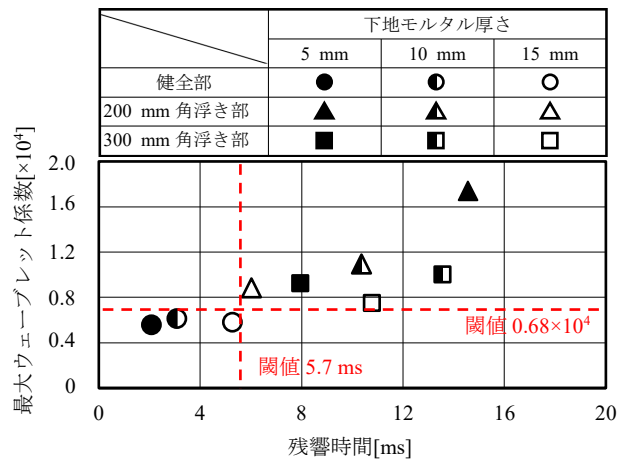


図-15 最大ウェーブレット係数と残響時間の関係 (壁面接触型ドローン)

氏に協力を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 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 : <https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/content/001474154.pdf> (閲覧日 : 2024 年 1 月 4 日)
- 2) 河辺伸二, 田中大貴, 渡辺正雄, 伊藤洋介 : 壁面接触型ドローンによる外壁タイル張り仕上げの打音検査と打音の解析 (その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp.1405-1406, 2019.9
- 3) 長塚文昭, 渡辺文雄, 笠原慶一 : ウェーブレット変換を利用した打音検査, 土と基礎, Vol.41, No.6, pp.53-58, 1993.6
- 4) 添田智美, 三上貴正 : 外装タイル剥離診断装置の開発に関する基礎研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.729, pp.1779-1787, 2016.11
- 5) 海老原正明, 矢島四朗 : 打音解析によるタイル剥離診断装置, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.993-994, 1987.10
- 6) 国土交通省 平成 27、28 年度 建築基準整備促進事業 T1. 湿式外壁等の定期調査方法の合理化の検討 : <https://www.mlit.go.jp/common/001183683.pdf> (閲覧日 : 2024 年 1 月 4 日)
- 7) 榎原進 : ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, 1995.5
- 8) 赤間世紀 : ウェーブレット変換がわかる本, 工学社, 2015.10
- 9) 藤田肇 : 流体騒音の発生メカニズムと抑制法, ターボ機械, 第 23 巻, 第 6 号, pp.354-359, 1995.6
- 10) 水澤富作, 近藤八重, 滝沢宣人, 河原田豊 : 球体の衝突を受ける平板から発生する衝撃音に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.766, pp.47-57, 2004.7