

遺産的建造物の維持保全に向けた  
国内外産天然スレート屋根材の基礎物性・力学特性の評価

DC20092 金澤咲耶子

1. はじめに

スレートは、12 世紀頃からヨーロッパ、特にイギリス、北フランス、ドイツなどで一般的な屋根材として使用されていた。日本では、古来から天然スレートが硯などに用いられており、屋根材としては明治から大正、昭和初期にかけて歴史的建物の使用されたものが始まりとされている。国内にはスレート葺屋根の文化財建造物が多く現存しているが、国内におけるスレート産出量は微量であり、定期的な葺き替えが必要であるスレート屋根においても、葺き替え時に海外産のスレートをを用いることが増えている。本研究では、建造物の歴史的価値やオーセンティシティ（真正性）の確保と、持続可能な天然スレートの供給を目的とし、国内外産のスレートの品質・物性評価<sup>1)~4)</sup>を試みた。また、海外産のスレートと国内産のスレートの物性を比較し、国内産のスレートと併用・代替可能かを考察する。

図 1 は、本研究の研究フローである。研究 1 では、文献調査や採掘現場でのヒアリングを行い、研究 2 では、密度・寸法特性、力学特性、耐久性の観点から試験を行なった。

2. 研究概要

2.1 調査方法及び使用材料

表 1 に使用材料を示す。研究 1 では、調査 1 として文献調査を、調査 2 として国内における天然スレートの採掘場である雄勝明神でヒアリングを行なった。研究 2 では、主に、密度・曲げ強度・一次共鳴振動数の測定を行なった。密度の計測は、長さ 300mm×幅 180mm×厚さ 5mm 程度の寸法で、産地・石種の異なる計 6 種類の屋根材を使用した。

2.2 実験要因と水準及び実験内容

表 2 に実験要因と水準を示す。曲げ試験体は、長手方向を長さ方向(d)、幅方向(w)に区別して切断し、計 12 種類を使用した。一次共鳴振動数測定試験では、Sd を除く 5 種類の屋根材に対して、3 箇所の打点で曲げ試験体に対して 1 箇所の打点で測定した。

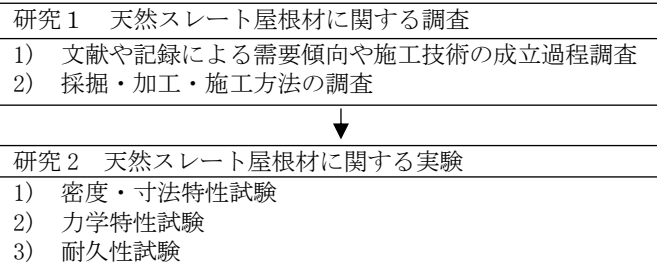


図 1 研究フロー

表 1 天然スレート屋根材の使用材料

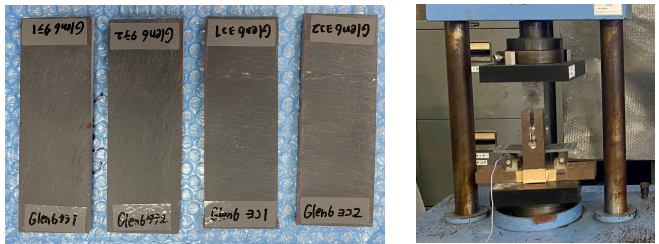
| 記号 | 産地   | 種類                 | 寸法 (長さ×幅×厚さ mm)    | 内容                     |
|----|------|--------------------|--------------------|------------------------|
| Jo | 日本   | 雄勝石                | 300.33×180.83×6.95 | 2011 年以前採掘・保管品         |
| Jt |      | 登米石                | 302.50×182.17×6.06 | 石巻地区周辺建物採取品            |
| Cg | カナダ  | Glendyne           | 300.17×181.00×5.33 | 2015 年頃採掘・輸入           |
| Sv | スペイン | Villar del Rey     | 300.67×180.17×6.69 | 2019 年頃採掘・輸入<br>現在製造不明 |
| Sc |      | CUPA 10 Excellence | 300.00×180.00×5.85 | 2019 年頃採掘・輸入           |
| Sd |      | Del Carmen         | 300.00×200.00×4.71 | 2021 年頃採掘・輸入           |

表 2 実験要因と水準

| 実験要因 |                | 水準                                                                 |
|------|----------------|--------------------------------------------------------------------|
| 研究 1 | 文献調査           | スレート屋根材の歴史に関する論文 <sup>5)6)7)8)10)</sup> 、修理報告書 <sup>9)11)12)</sup> |
|      | 専門加工・工事業者ヒアリング | 採掘場所、加工方法、施工方法、各種年代                                                |
| 研究 2 | 密度評価試験         | 屋根材原盤                                                              |
|      | 曲げ試験           | スレート材長さ方向(d)、スレート材幅方向(w)                                           |
|      | 長手切断方向         | 国内外全 6 種×2 方向(d,w)                                                 |
|      | 曲げ試験体種類        | 国内外全 5 種(Jo,Jt,Cg,Sv,Sc)                                           |
|      | 打診時共鳴振動数試験体    | 下部①、中部②、上部③(原盤)                                                    |
|      | 打診時共鳴振動数測定位置   | 中央(曲げ試験体)                                                          |
|      | 打診時共鳴振動数評価値    | 一次共鳴振動数                                                            |

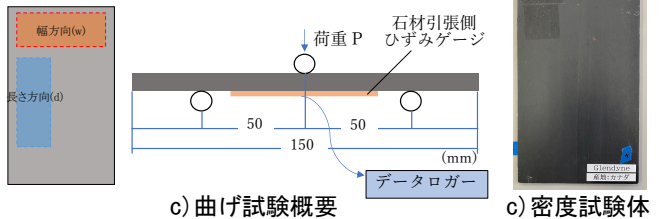
表 3 試験項目

| 分類   | 試験項目      | 試験内容                                                              |
|------|-----------|-------------------------------------------------------------------|
| 研究 1 | 文献調査      | スレート屋根材の需要傾向と施工技術の成立過程について                                        |
|      | 雄勝現地調査    | スレート屋根材の採掘場所(雄勝明神)、加工方法、施工方法について                                  |
| 研究 2 | 基礎物性      | 寸法・質量: スレート屋根材原品<br>密度(g/cm <sup>3</sup> ): 原品 6 枚の平均 (Sd のみ 3 枚) |
|      | 時刻歴吸水乾燥試験 | スレート屋根材原盤<br>湿潤状態から乾燥状態の質量変化を時間ごとに計測                              |
|      | 強度試験      | 天然スレート JIS A 5102 (約 50×150mm)<br>ひずみ(μ): 石材引張側 60mm ひずみゲージ       |
|      | 非破壊試験     | スレート屋根材原盤、曲げ試験体<br>一次共鳴点の周波数(Hz)を各打点 15 回ずつ測定                     |
|      |           |                                                                   |



a) 曲げ試験体 (約 50×150mm)

b) 曲げ試験装置



c) 曲げ試験概要

c) 密度試験体

図 2 曲げ試験体の曲げ強さ一変形試験概要

表3に試験項目、図2に曲げ強さー変形試験の概要、図3に一次共鳴振動数測定試験の概要を示す。研究2では、まず、基礎物性調査として、計6種類の試験体の、寸法・質量を計測し、密度を比較した。また、JIS A 5102 に従い、試験体を空気乾燥機を用いて絶乾状態とし、乾燥時の質量を計測した後、水中に浸し、2 時間おきに水中から取り出した試験体の計長を直ちに計測した。次に、密度試験に用いた試験体を、JIS A 5102 の規定に従い、長さ方向(d)と幅方向(w)を長手方向として、50mm×150mm の寸法に切断した計 12 種類の試験体に対して、図1の曲げ強さー変形試験を行なった。試験体の裏側の石材引張側に 60mm ひずみゲージを貼り付け、表側からアムスラー式圧縮試験機によって徐々に荷重を加えた。データロガーを用いて、試験体が破壊するまでの荷重(N)とひずみ( $\mu$ )を計測した。一次共鳴振動数解析では、打診音測定機器として、コンクリートの浮き・剥離診断機器「打音チェッカ PDC-100」を使用した。屋根材原盤では、図3a)のように、下部①～上部③を、曲げ試験体では中央を測定点とした。図3b)のように、試験体の下に防振シートを敷き、測定点とマイクとの距離を 100mm 一定として打撃反発音を各 15 回ずつ収集した。打撃強さは磁力を用いた装置により、概ね一定となるようにした。

### 2.3 天然スレート屋根材の専門加工・工事業者のヒアリング

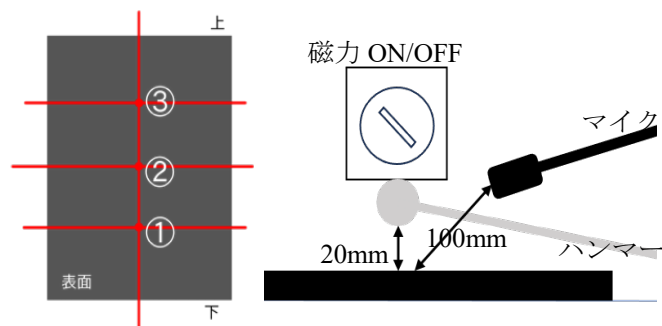
天然スレート屋根材の調査として、宮城県石巻市雄勝町明神で、ヒアリングを行なった。

図4は、採掘現場と切断の様子である。明神の岩肌は赤土に似た粘土質で、掘り下げるほどに硬くなる。採掘後は、湿式のダイヤモンドカッターで、摩擦熱を冷やししながら切断する。その際に、川の流れによって、粒子が沈降する際にできた緻密で縞状の模様が表面に現れる。この模様に対して垂直方向に割ると壊れやすいので、通常並行方向に割るが、登米石などの一部の石では方向による強度の違いはない。

図5は、スレートの施工の様子である。まず、スレートを施工する際の寸法にカットする。カットには、ラフカット・ストレートカットの2種類があり、ラフカットは端部の水切りが良く、逆にストレートカットは、界面張力で水が溜まりやすいという特徴がある。カット後は、スレート上部の2箇所、釘を打つための穴をあけ、そのまま野地板、防水シートの上に、薄い方を上部にして釘で打ち付けて施工する。施工後は、安全性の確保のため、定期的な葺き替えが必要である。葺き替え時には、専用の器具を用い、釘周りのスレートを砕くことで野地板からスレートを外し、新しいスレートを打ち付ける。

### 2.4 国内外産天然スレート屋根材原盤の密度評価

図6に密度試験の結果を示す。Jo、Cg、Sc、Sdは $2.5\text{g/cm}^3$ で、ばらつきはどれも少ない。Svは、約 $2.7\text{g/cm}^3$ でその他の試験体と比較して密度が大きく、Jtは約 $2.2\text{g/cm}^3$ で、密度が小さい。Jtのみ建物採取品であること、産出年代や場所、保管状態等の影響が考えられるため、更なる検討が必要と言える。



a) 屋根材打点位置①～③ b) 一次共鳴振動数試験方法



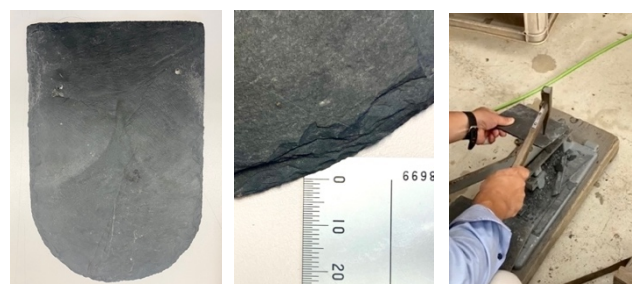
c) 打音チェッカーPDC-100 d) 一次共鳴振動数測定の様子

図3 屋根材原盤の一次共鳴振動数測定概要



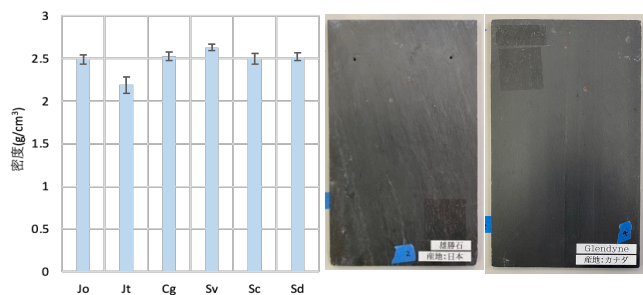
a) 明神岩肌 b) 湿式ダイヤモンドカッター

図4 採掘・切断の様子



a) ラフカット全体(左:全体、右:細部) b) 釘穴打掘の様子

図5 施工の様子



a) 密度比較 b) 密度試験体 (左: Jo、右: Cg)

図6 屋根材原盤の基礎物性評価

## 2.5 国内外産天然スレート屋根材原盤の吸水率評価

図7a)は質量増加率を、b)は質量変化速度を示している。また、c)では吸水率を、d)では質量変化速度を比較している。ここから、すべての試験体が JIS 規定を満たしていることや、Cg,Sc では、吸水率が 0.2%を下回っているということ、Sv の吸水・乾燥速度が他の試験体よりも早く、Cg と Sc、特に Sc は、吸水乾燥速度が低いということが確認できる。

## 2.6 国内外産天然スレート曲げ試験体の曲げ強さ評価

図8a)～e)は各試験体の曲げ応力—ひずみ曲線で、図8f)は各試験体の曲げ強度を、JIS の曲げ強度規定と比較している。併せて見ると、Jo,Sv,Sd では、長さ方向に切断した試験体(d)が、幅方向に切断した試験体(w)より曲げ強度が大きくなっていることが分かる。中でも、Jo と Sd ではその差が顕著で、破壊する際も、長さ方向(d)は割れ目ができる程度であったのに対し、幅方向(w)では堆積界面に沿う劈開性の割れ影響により、弱い抵抗力で脆性的な割れ状態で破断する様子が確認できた。一方、Jt,Cg,Sc では、d の曲げ強度が w より大きくなった。また、f)からは、Jo-w を除く全ての試験体が JIS 規定  $29.42\text{N/mm}^2$  を満たしていることが分かる。また、Sc-d と Jo-w は、曲げ強度のばらつきが大きかったが、ばらつきの原因は、天然スレートの材料特性に加え、採掘後の経年や保管状況等の影響が考えられるため、更なる検討が必要である。

図8g)は、密度と曲げ強さの相関図を表している。曲げ強度は、JIS 規定に従い、w、d のうち小さい安全側の値とした。ここから、適正な範囲の密度であれば、曲げ強度に与える影響は小さいと言える。

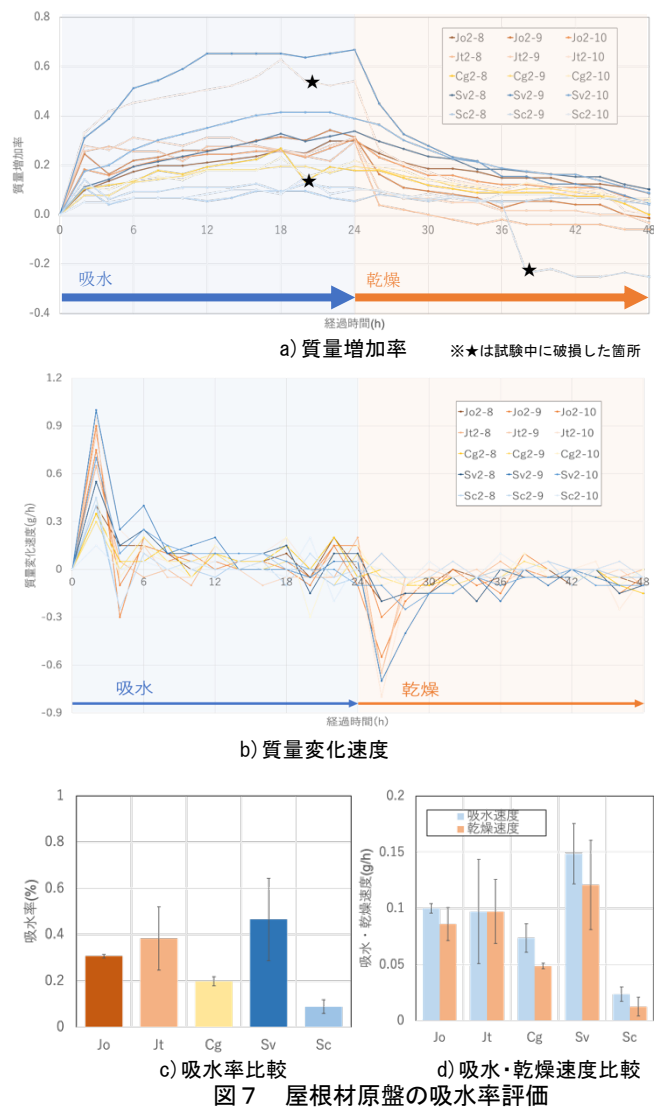


図7 屋根材原盤の吸水率評価

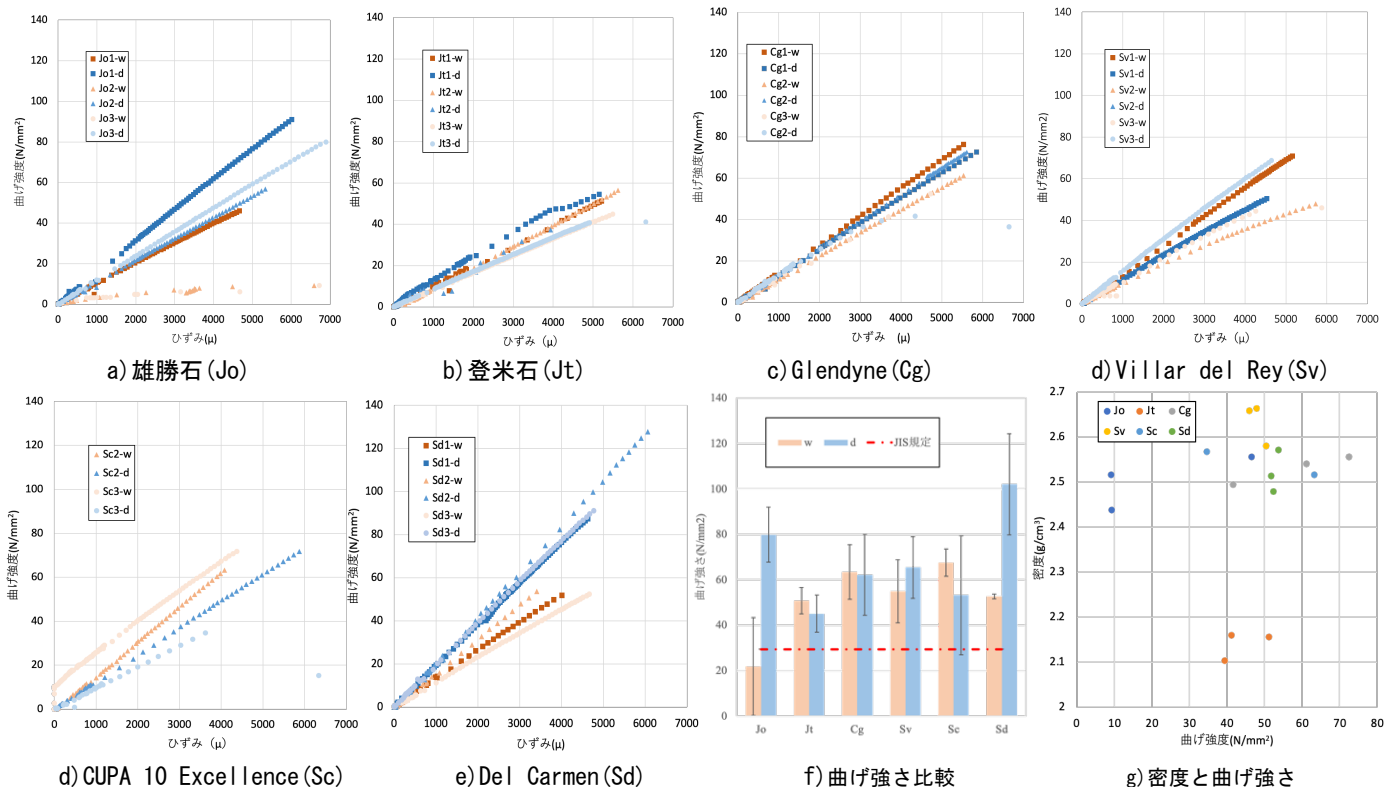


図8 曲げ試験体の曲げ応力—ひずみ評価

## 2.7 国内外産天然スレート屋根材の一次共鳴振動数評価

図9 a)～e)は、屋根材原盤で測定したピーク周波数を試験体と打点ごとに分けて、最大最小の範囲を示したグラフである。全体的にピーク周波数には試験体ごとにばらつきが見られるが、雄勝石(Jo)の打点②ではばらつきが少ないことが確認できる。また、Cg、Sv、Scでは、グラフが左から右にいくにつればらつきが少なくなっており、スレート屋根材の上部の方が安定した周波数を計測できるということが確認された。

図9 f)は、ピーク周波数と曲げ強さの平均値の相関グラフである。グラフの相関係数は0.92で、正の相関が見られる。ここから、ピーク周波数が高いほど曲げ強度も大きくなるということが予測される。また、強度予測式をもとにすると、JIS規定の29.42N/mm<sup>2</sup>を満たすためには約1kHzの周波数が必要であると推測できる。

図10 a)は、曲げ試験体のピーク周波数の平均値を、種類ごとに比較している。全体的に屋根材原盤よりも高いピーク周波数が収集され、Jo-dとSv-wを除いては、おおよそ5kHz～10kHzの範囲にまとまっており、大きな差は見られないということが分かる。図10 b)は、曲げ試験体のピーク周波数と曲げ強度の相関を示しており、ここから相関はないということが分かる。

## 3. まとめ

本研究で以下の知見が得られた。

- 1) 登米石(Jt)は、他の天然スレート屋根材と比べて密度が小さい。
- 2) 吸水率評価では、すべての試験体がJIS規定を満たしており、Glendyne(Cg)、CUPA 10 Excellence(Sc)では、吸水率が0.2%を下回っている。
- 3) Villar del Rey(Sv)の吸水・乾燥速度が他の試験体よりも早く、Glendyne(Cg)とCUPA 10 Excellence(Sc)の吸水乾燥速度が低いということが確認できる。
- 4) 雄勝石(Jo)、Villar del Rey(Sv)、CUPA 10 Excellence(Sc)、Del Carmen(Sd)には、幅方向(w)に切断するより、長さ方向(d)に切断した方が曲げ強度が出やすいという特性があり、中でもJoとSdでは明確な差があった。
- 5) 幅方向に切断した雄勝石(Jo-w)以外は、JIS規定の曲げ強度を十分に満たしている。
- 6) 天然スレート屋根材の共鳴振動数計測時は、屋根材下部より上部の方が安定した値を計測できる。
- 7) 屋根材原盤のピーク周波数と曲げ強さには強い正の相関が見られ、ピーク周波数が高いほど曲げ強度も大きくなると予測されるが、曲げ試験体のピーク周波数と曲げ強さには相関はないため、非破壊での品質確認の方法としては、屋根材原盤でのピーク周波数評価が有用であることが確認された。

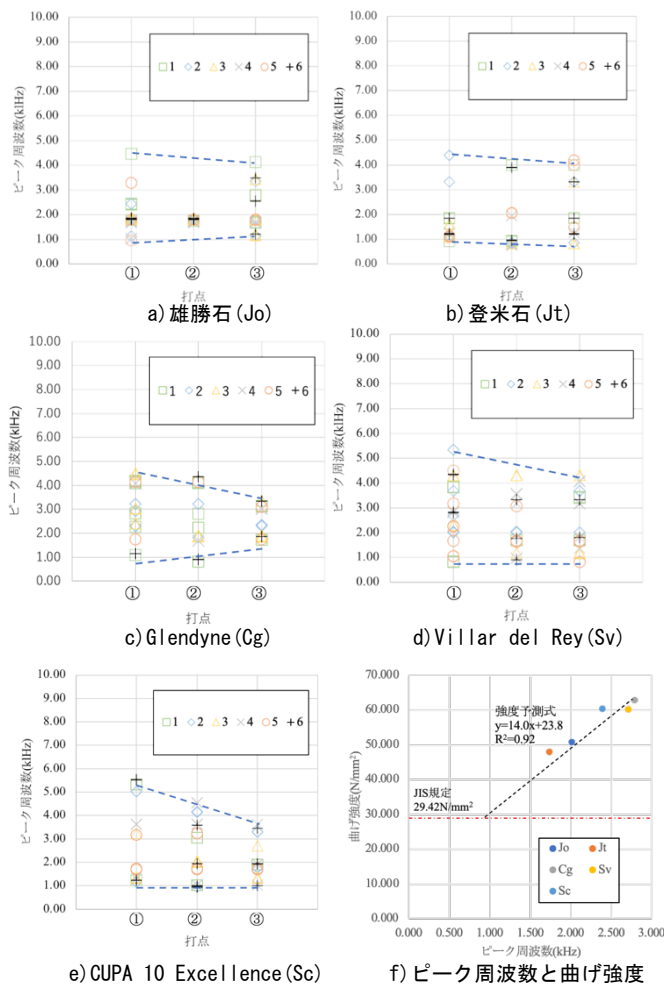


図9 屋根材原盤の一次共鳴振動数評価

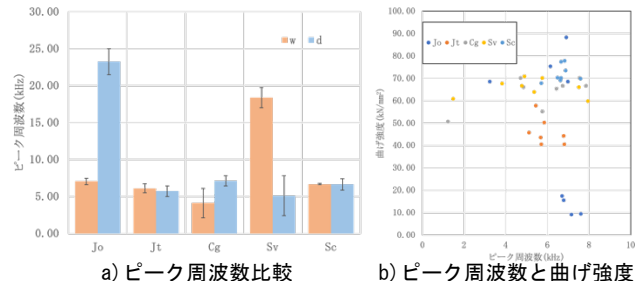


図10 曲げ試験体の一次共鳴振動数評価

## 参考文献

- 1) 清水侯二ら,建築物の LCM における維持保全と保存的活用ストラテジー その18 天然スレート屋根材の需給傾向と施工技術の成立過程 仕上げに関する経年劣化抑制技術の検討,2023 年度日本建築学会研究報告集,pp.435-436,2023.7
- 2) 松山祐子ら,その19 天然スレートの国際市場状況と色調について,2023 年度 日本建築学会研究報告集,pp.437-438,2023.7
- 3) 鎌田理沙ら,その20 天然スレート屋根材の表面粗さと光沢度の評価,2023 年度 日本建築学会研究報告集,pp.439-440,2023.7
- 4) 金澤咲耶子ら,その21 天然スレート屋根材の密度・物性調査,2023 年度 日本建築学会研究報告集,pp.441-442,2023.7
- 5) 金澤咲耶子ら,遺産的建造物の維持保全に向けた国内外産天然スレート屋根材の基礎物性・力学特性の評価,日本建築学会関東支部研究報告書,2024.3

## 謝辞

本研究は、工学院大学と有限会社熊谷産業の共同研究によるものであり、実施に際し、工学院大学総合研究所後藤治教授、熊谷産業金澤翔太氏、雄勝硯生産販売協同組合沖津俊一氏、山下淳氏のご助力をいただきました。関係各位に感謝致します。