

遺産的建造物に使用された国内外産天然スレート屋根部材を用いた
屋外曝露・雨水流下・ATP 測定・金属溶出試験による汚れ影響の評価

DB21149 佐藤 野乃香

1. はじめに

スレートは、12 世紀頃からヨーロッパで一般的な屋根材として使用されてきた。一方、日本では古くから硯などに用いられており、屋根材としては明治から大正、昭和初期にかけて使用され、遺産的建造物として今日まで残るものが多い。持続可能な天然スレートの供給については、国指定の重要文化財である場合、オーセンティシティ（真正性）を確保する必要がある。現存する遺産的建造物のオーセンティシティを確保するためには、天然スレート屋根の保存復元は重要な課題となっている。

そこで、本研究では建造物の歴史的価値やオーセンティシティの確保と持続可能な天然スレートの供給をめざし、海外産の天然スレート屋根材が代替可能なものか、材料の観点から判断することを目的とする。本研究においては 30 年間使用された既存試験体スレートに付着する汚れに関して、色彩・つや・凹凸の物性評価¹⁾と ATP 測定²⁾を行った。

2. 研究概要

2.1 使用材料

今回報告する実験に用いた試料を表 1 に示す。研究 1 では、表 1 に示す国産から雄勝石(Jo)・登米石(Jt)の 2 種類、カナダ産から Glendyne の 1 種類(Cg)、スペイン産から Villar del Rey(Sv)・CUPA 10 excellence(Sc)・Del Carmen(Sd)の 3 種類、合計 6 種類を選定した。Del Carmen は No.1～3 までそれ以外は 1 種類につき No.1～6 まで用意した。研究 2 では埼玉県飯能市での葺替え工事で採取した国内産既存材を用いた。研究 3 では研究 2 で使用した既存材に加えて、比較用として新品未使用の雄勝石を用意した。研究 3 では研究 2 で使用した 3 枚と比較用として新品未使用の雄勝石(Jo) 1 枚を使用した。研究 4 ではパイライト含有材を登米石(Jt) 1 枚、CUPA 10 excellence(Sc) 2 枚、雄勝石(Jo) 2 枚を用意した。雄勝石は既存材である。研究 5、研究 6 は雄勝石(Jo)、CUPA 10 excellence(Sc)、Glendyne(Cg)の 3 種類を 8 枚ずつ用意した。

2.2 実験方法

表 2 に実験の要因と水準を示す。研究 1 では色感の数値化として JIS Z 8729:2004 に基づき色差計を使用した。つや感の数値化には鏡面光沢度計を使用し、JIS Z 8741:1997 の規定に基づき入射角 20° と 60° で測定を行った。光源は LED(波長 890nm)・受光部は SPD(シリコンフォトダイオード)である。測定面積は、20° の時は 4×3 mm の楕円、60° のときは 6×3 mm の楕円である。どちらも測定箇所数としては 2 箇所とする。凹凸感の数値化として、表面粗さ Ra を JIS B 0601 に基づき使用した。測定箇所の選定において、スレートの施工時はスレート

表 1 使用材料

試料名	記号	産地	枚数(枚)	内容
研究 1 天然スレートの産地ごとにおける表面特性評価				
雄勝石	Jo	日本	6	2011 年以前採掘
登米石	Jt	日本	6	石巻地区建物採取品
Glendyne	Cg	カナダ	6	2015 年採掘輸入
Villar del Rey	Sv	スペイン	6	2019 年採掘輸入 現在製造不明
CUPA 10 excellence	Sc		6	2019 年採掘輸入
Del Carmen	Sd		3	2021 年採掘輸入
研究 2 天然スレート屋根用既存材の表面特性表評価				
天然スレート 既存材	-	日本	3	2023 年 2 月採取 詳細な産地は不明
研究 3 国内産既存試験体の ATP 測定				
雄勝石	Jo	日本	1	新品未使用
天然スレート 既存材	-	日本	3	2023 年 2 月採取 詳細な産地は不明
研究 4 国内外産天然スレート屋根材の鉱物含有材屋外曝露試験				
登米石	Jt	日本	1	パイライト含有材
CUPA 10 Excellence	Sc	スペイン	2	パイライト含有材
雄勝石	Jo	日本	2	パイライト含有材
研究 5 国内外産天然スレート屋根材の屋外曝露試験				
研究 6 雨水流下試験				
雄勝石	Jo	日本	8	新品未使用
CUPA 10 Excellence	Sc	スペイン	8	新品未使用
Glendyne	Cg	カナダ	8	新品未使用

表 2 実験の要因と水準

要因	水準
研究 1 天然スレートの産地ごとにおける表面特性評価	
色差	1 試験体につき 2 箇所
鏡面光沢度[°]	20°, 60° (1 試験体につきそれぞれ 2 箇所)
表面粗さ[μm]	長手方向(表面), 幅方向(表面) 1 試験体につきそれぞれ 9 箇所
研究 2 天然スレート屋根用既存材の表面特性表評価	
画像解析	汚れ箇所全て測定 4 種類に汚れを分類 カビ汚れ/苔汚れ/土汚れ/錆汚れ
研究 3 国内産既存試験体の ATP 測定	
ATP 測定	汚れ箇所 計 13 か所を測定
研究 5 国内外産天然スレート屋根材の屋外曝露試験	
ATP 測定	各産地で表面、裏面、重なり部、端部の 4 か所
研究 6 雨水流下試験	
雨水流下	30 秒かけて 100 ml を流下

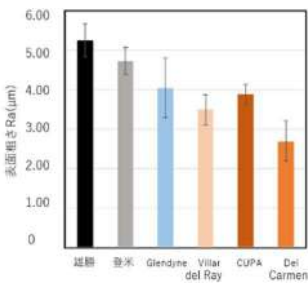


図 1 算術表面粗さ Ra



写真 1 森の家外観



写真 2 採取した試験体

の薄い方が上側になるためスレートの「上」とする方を見極め、下方向に流れる長手方向と、その直行方向を示す幅方向それぞれ9箇所の測定を条件とした。研究2では画像解析ソフトウェア「ImageJ」を用いて、試験体全体面積と曝露面積、各汚れの面積を算出した。研究3では 森の家から採取した雄勝産既存試験体について、汚れの種類やその量を調査するために、ATP 測定を行った。研究4、研究5については試験体の設置と初期値、それぞれ1年間、6か月露後の ATP 値測定結果について、研究6では屋外曝露試験体を用いて行った雨水流下試験について報告する。

2.3 天然スレートの産地別表面特性評価（研究1）

図1の算術表面粗さ Ra を見ると、海外産の試料に比べて国産の2つの試料が大きい値となっていた。

2.4 天然スレート既存材の表面特性評価（研究2）

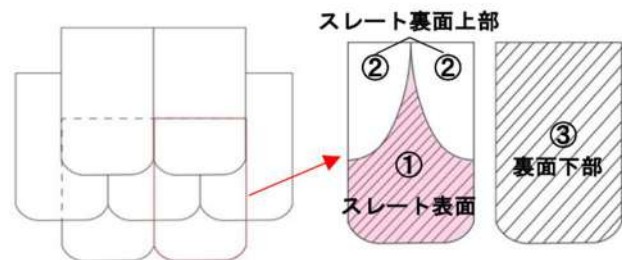
研究2の汚れ分析では採取した既存材を用いて、汚れの画像解析を行った。既存材採取において、写真1に示した埼玉県飯能市にあるトーベ・ヤンソンあけぼの子どもの森公園の森の家(以下、森の家)にて現地調査を行った。森の家は1993年に竣工されたが、陽の当たらない部分での雨水の溜まりや凍結の恐れからスレート落下の可能性があるため、2023年2月に落下を防ぐ為の葺替え工事が行われた。その際に採取した試験体(写真2)を用いて研究2を行った。

本試験では、汚れ試験体の汚れを黒カビ汚れ・苔地衣類汚れ・サビ溶出汚れ・黄色カビ汚れの4種類に分類し、汚れごとに色分けをおこなった。黒カビ汚れを黒色、苔地衣類を緑色、錆汚れをオレンジ色、黄色カビ汚れを黄色とする。

腐朽菌の繁殖は養分、湿気、温度、空気の状態によって変わり、条件が変わると汚れの種類も異なるため、汚れ区分をこの4種類とした。これらに基づいた分類表を表3に示す。その色分けに基づき、画像解析ソフトウェア「ImageJ」を用いて、試験体全体面積と曝露面積、各汚れの面積を算出した。汚れの割合算出に関しては全体面積に対しての曝露面積割合を算出することとする。

本試験で扱う既存試験体において、汚れが顕著に現れているため、既存試験体1のみ画像解析をおこなった。腐朽菌は4つの条件によって変わるため、条件に基づき位置の分類を行った。位置の分類は①スレート表面汚れ、②スレート表面上部汚れ、③裏面汚れの3種類に分類した。図3には3枚重ね/鱗葺きにおける施工図とセクション分類を行った図を示す。

既存試験体1における解析範囲を図示したものを図3のa)に示した。結果を図3のb)～d)に示す。b)に示した①では、苔汚れ・黒カビ汚れが確認できた。苔汚れは主に①と②の境界部分に出現することが分かった。原因として、雨水が境界部分で溜まりやすいことが考えられる。c)に示した②では黒カビ汚れが確認できた。この部スレート同士が重なるため、黒カビが発生しやすい。d)に示した③では黒カビ汚れ・サビ溶出汚れ・黄色カビ汚れが確認できた。近年では落下防止のために接着剤を用いることもあり、その部分に重なる③のセクションではカビ汚れが顕著に確認できた。

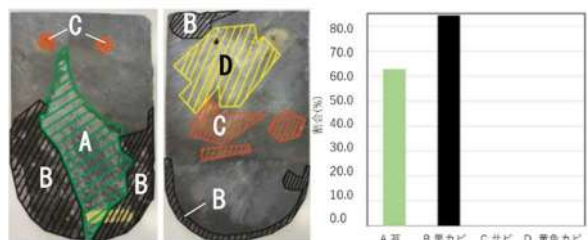


a) 3枚重ね/鱗葺き施工図 b) 汚れの位置のセクション

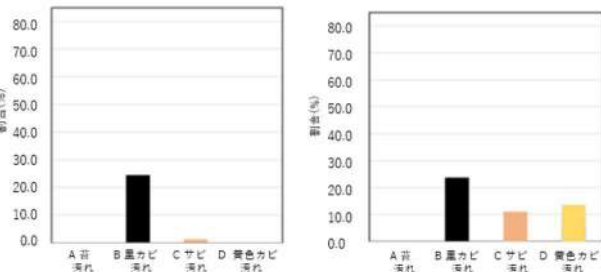
図2 汚れ位置の分類(研究2)

表3 試験体に付着している汚れの分類(研究2)

	汚れの種類	色	原因
A	苔汚れ	緑	継続的な雨水流れによるスレート表面への苔繁殖
B	黒カビ汚れ	黒	スレート重なり部分での乾漆繰り返しによる黒カビ繁殖
C	サビ溶出汚れ	オレンジ	釘による釘穴からの錆溶出による錆汚れ
D	黄色カビ汚れ	黄	粘着層付ルーフィング等との接着による黄色カビ繁殖



a) 既存試験体1の解析範囲 (左:表面 右:裏面) b) ①スレート表面汚れ (ABCD汚れ区別)



c) ②スレート表面上部汚れ d) ③裏面汚れ

図3 既存試験体1における汚れ割合評価(研究2)¹⁾



a) 試験体1 b) 既存試験体1
雄勝産新品スレート 左:表面 右:裏面

写真3 試験体と測定位置(研究3)

2.5 国内産既存試験体のATP 測定（研究3）

森の家から採取した雄勝産既存試験体について、汚れの種類やその量を調査するために、ATP 測定を行った。測定箇所は写真3の白枠で示した①～⑬の13箇所とした。

ATP（アデノシン三リン酸）とは全ての生物の細胞内に存在するエネルギー物質である。ATP はルシフェラーゼなどの酵素物質と反応することで AMP や ADP に変化し、その際にエネルギーを放出して発光する。その光を読み取り、対象の生物学的エネルギー量を測定するのが ATP 測定である。ATP 量が多いほど発光量が増し、測定値も大きくなる。従来の ATP 測定では ATP の汚れのみを検出していたが、今回使用した ATP 測定装置は ATP が分解された AMP、ADP も測定することで、より幅広い種類の汚れを高感度に検出することを可能にしている。

ATP 測定の手順としては、まず ATP 測定装置とスマートフォンを Bluetooth で接続する。冷蔵保存していた酵素入り専用湿潤綿棒を室温に戻しておき、綿棒部分をしならせるようにし、回転させながら縦横 10 往復で検査対象を拭き取る。綿棒を容器本体に戻し、容器内で分離している酵素液と基準液を十分に振り混ぜる。ATP 測定装置に酵素入り専用湿潤綿棒を入れカバーを閉じ、約 10 秒で測定が完了する。

ATP 値の測定結果を図4に示す。比較用として測定した測定箇所①の新品雄勝産天然スレートは 1136 RLU であった。測定箇所②、④、⑨、⑩のようなスレート表面は高い ATP 値を示していた。この部分は風雨にさらされていたため、カビやコケの胞子が飛来し付着後、上に重なるスレートから流れてきた水や栄養分などを吸収して繁殖したと考えられる。測定箇所⑤、⑥はどちらも釘穴付近であるが、ATP 値はそれぞれ 4632 RLU、445 RLU と 10 倍以上の差がある。この原因として、⑤は表面である一方、⑥はスレート裏面であり、釘から金属イオンが溶出したことでカビやコケの発生が抑えられ、ATP 値が低い値になったと推測できる。また、ATP 値が低い値になったことから、⑥はカビによる汚れではなく、サビ溶出汚れだと考えられる。

2.6 国内外産天然スレート屋根材の鋳物含有材屋外曝露試験（研究4）

研究4ではパイライト（黄銅鋳）を含む試験体を屋外曝露し、パイライトから錆が溶出するか試験を行った。曝露試験体の様子を写真4に示す。東京駅丸の内駅舎の屋根勾配 30° と同じ条件で試験体を作成した。

図5に1年間曝露後の ATP 値を示す。各試料でパイライト部、通常部それぞれ3か所を測定し、その平均値を算出した。すべての試料において、通常部よりパイライト部の方が低い ATP 値を示していた。これは雨にさらされたパイライトから金属イオンが溶出し、カビやコケ汚れの発生が抑えられたためだと考えられる。

2.7 国内外産天然スレート屋根材の屋外曝露試験（研究5）

研究5として雄勝石、CUPA 10 excellence、Glendyne の3種類のスレートを使用し、屋外曝露試験を行った。使用材料と枚数は表1の通りである。研究4と同様に、東京駅丸の内駅舎の屋根勾配 30° と同じ条件で試験体を作成した。（写真5）



c) 既存試験体 2 d) 既存試験体 3
左:表面 右:裏面 左:表面 右:裏面
写真3 試験体と測定位置（研究3）

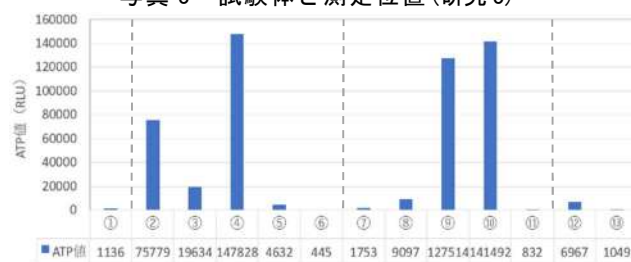


図4 ATP 値測定結果（研究3）

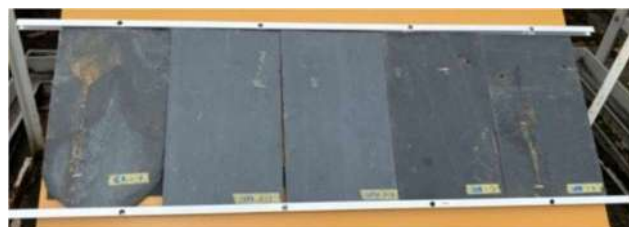


写真4 鋳物含有材の屋外曝露試験の様子（研究4）

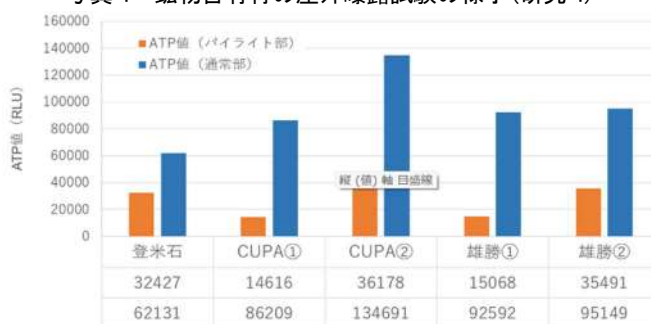


図5 鋳物含有材の ATP 値（研究4）



写真5 屋外曝露試験体の様子（研究5）

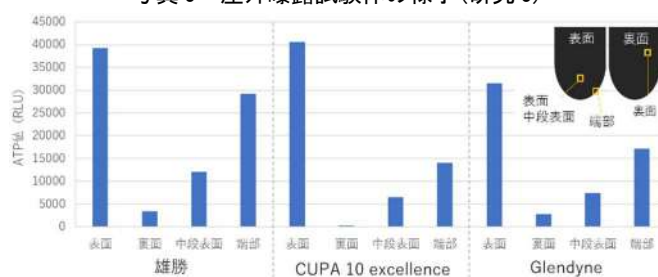


図7 屋外曝露試験体の ATP 値（研究5）

図7に6か月間曝露後のATP値を示す。各試料について、表面、裏面、中段表面(スレート重なり部分)、端部の4か所で測定した。測定結果としては、3種類すべての試験体において、表面、端部、中段表面、裏面の順で高い値であった。

2.8 雨水流水試験 (研究6)

研究5の屋外曝露試験体を用いて、雨水がどのような流れ方をするのか試験を行った。試験体の上段中央のスレートの中心部分に30秒かけて水100mlを流下した。

写真6に流下後の様子を示す。端部のラフカット部分において毛細管現象が起こり、下段の左右のスレートの中央部からも水が流れた。さらに、写真7～9の温度変化に注目すると流水後の各スレートの下側は、中央部に比べて温度上昇が抑えられており、端部に水分が溜まりやすいことが分かった。

2.9 屋外曝露試験体の試験環境の測定

研究5、研究6で使用している屋外曝露試験体に関して、試験環境の調査のため、表面/裏面温度、表面/裏面湿度、表面/裏面含水率、紫外線強度、気温、湿度を測定した。2024年9月17日と2024年12月10日の2回測定を行ったのでその結果を報告する。測定時間は、朝(10:00)、昼(13:00)、夕(16:00)、夜(19:00)の1日4回である。

計測結果を見ると、スレートの表面温度は夏には50℃以上になることもある一方で、冬の夜間には0℃を下回ることもあるということが分かった。湿度、含水率は夏、冬ともに日中は低く、夕、夜にかけて高くなっていく傾向があった。

3. まとめ

本研究で以下の知見が得られた。

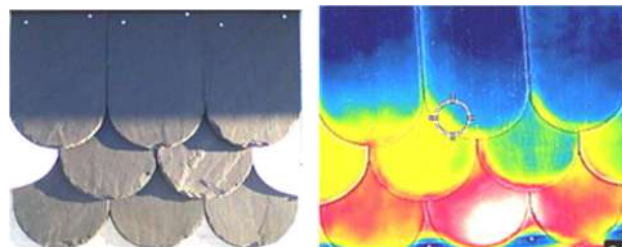
- 1) 既存試験体に関して、色から汚れを大まかに4種類に分類した。スレートの場所により発生しやすい汚れが分かっている。
- 2) 研究3では、新品未使用の試験体と既存試験体のATP値を測定し、比較を行った。目視では判別できなかった、黄色カビ汚れとサビ汚れの違いをATP値の違いから判別することができた。
- 3) 研究4ではパイライト含有材について、パイライト部と通常部では汚れの量が異なることが分かった。
- 4) 研究5では屋外曝露試験を行い、スレートの種類に関わらず、スレートの位置によって汚れの量が異なることが分かった。
- 5) 研究6ではスレートに流れた水がどのような道筋をたどっていくのか、またスレート表面の温度変化にどのような影響をもたらすのかが分かった。

[参考文献]

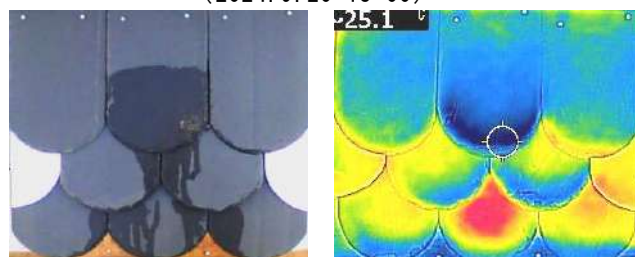
- 1) 鎌田理沙ほか: 遺産的建造物に使用された国内外産天然スレート屋根材の持続的利用に向けたテクスチャー評価、日本建築学会関東支部、2024.3
- 2) 佐藤野乃香ほか: 遺産的建造物に使用された国内外産天然スレート屋根材の持続的利用に向けた汚れ物性・ATP評価、日本建築工上学会研究報告集、2024.10



a) 流下後の全体の様子 b) 流下後の端部の様子
写真6 雨水流下試験の様子(研究5)



a) 可視画像 b) 赤外線画像
(日陰部: 上 日射部: 下) (日陰部: 30℃ 日射部: 45℃)
写真7 屋外曝露環境における表面温度分布
(2024.9.20 13:00)



a) 可視画像 b) 赤外線画像
(日陰部: 上 日射部: 下) (日陰部: 25℃ 日射部: 40℃)
写真8 屋外曝露環境における注水乾燥後表面温度分布
(2024.9.20 13:11)

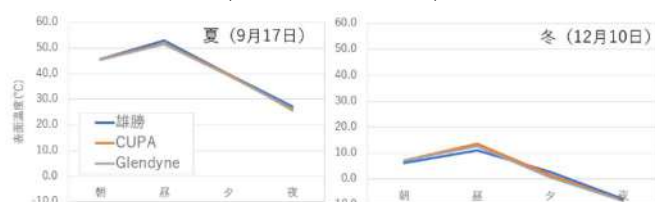


図8 各種スレート表面温度

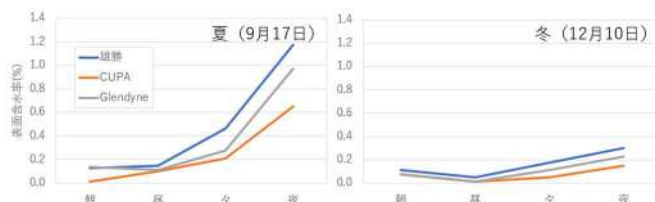


図9 各種スレート表面含水率

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、工学院大学総合研究所後藤治教授、熊谷産業金沢潤太氏に助力を得た。