

5年間の屋外暴露による外部影響を受けた柿葺き屋根の劣化指標提案

DB13212 中島駿介

1. はじめに

日本は世界の中で先進国でありながら、「近代的な建物」と、昔ながらの「伝統建築」とが混在する珍しい国である。また、混在していることでふと街を歩くだけで時代の流れによる日本の建築の進化の過程が分かる。そして「伝統建築」にはコンクリートや鉄が持たない自然の木や土による温かみがあり、古き良き日本の文化を象徴している。「伝統建築」はかつて都があった京都・奈良を中心に全国に存在し、古き良き日本の文化に触れられる貴重な建物として観光地などに指定され、年間多くの観光者が訪れている。しかし、現実問題として「伝統建築」にはいくつかの問題が挙げられる。主な問題として挙げられるのが技術者・職人の高齢化・減少による補修の問題である。「伝統建築」は地震が多い日本において長きにわたり木造という自然の力で耐えてきた。当時は木造が当然のことであり、自然を使って人が居住するための空間をすべて人の手によって造りだしていた。やがて時代が移り変わると、木造からRC造、S造、SRC造のような無機物の建材が使われる建物が増えていき、機械化から特別な技術が無くとも、地震に耐えうる強い建物を建築することに変化してきた。このことから、時代が経つにつれ職人が減少していくことになった。ただ、現在でも多くの「伝統建築」が日本には存在しているため問題視されているのが技術者不足であり、「伝統建築」の補修が難しくなった原因である。

そこで、今回の研究では山梨県塩山市にある9種類の柿葺きの屋外暴露試験体¹⁾を使い、あらゆる実験から柿葺き屋根の様々な劣化を数値化し、劣化指標を作成し現在の劣化状況を数値化していく。その上で柿葺き屋根の補修方法について考え、屋根に必要とされる条件を満たすことを目標とする。

本研究では、文献などによる柿葺き屋根の特性^{2) 3)}や木について学ぶ(調査1)と山梨県塩山市に保有している9種類の屋外暴露試験体を実験体とし、色々な側面から実験体を測定する(実験1)そして、実験結果を数値化し劣化の統合的指標を作成する(調査2)の三段階にて柿葺き屋根の劣化について考察していく。

2. 実験概要

表1は図で示される本研究に使用する試験体についての詳細について、表2は試験体にコーティングされている処理の塗材について、表3には本研究で行う実験の種類と方法について表4には実験の要因と水準記述している。

表1 使用材料(柿葺き試験体)

場所	人・天	種類	年数	記号	特徴
宮崎	人工	杉	35年	Mas35	試験体全体にくし状劣化(以降:くしびき)が多数見られる
秋田			45年	Aas45	試験体全体にひびが多く見られる
宮崎			80年	Mas80	試験体右上部に凹凸(以降:がたつき)を中心とする劣化
秋田			90年	Aas90	くしびきやひびが試験体全体に広がる
秋田			170年	Ans170	試験体全体に傷が少ない
秋田			170年	Ans170 II	全試験体の中で唯一1~11までの処理済み
秋田	天然	栗	50年	Ank50	全体が細かく割れている(ひび・浮き・破損)
秩父			人工	40年	Casa40
秩父	天然	さむら	40年	Cnsa40	試験体中心部に多数のがたつきあり

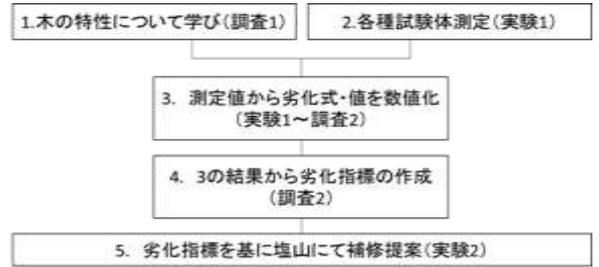


図1 研究の流れ

表2 柿葺き屋根材種類・処理方法別まとめ

No	種類	色	効果
1	高撥水シリコン系	別ア	シロネ結合基を有する無機シリコン溶液による撥水対策
2	高耐久アクリルシリコン系	白	アクリル含有シリコンの結合エネルギー増大による紫外線対策
3	無・有機シリコン系	黒	防カビ効果と黒化による熱吸収の検証
4	無・有機シリコン系	白	防カビ効果と白化による反射の検証
5	柿渋液	茶	柿タンニン[糖のエステル結合+芳香族分子]による防腐対策
6	木酢液	茶	リグニン、フェノール成分塗装による防腐対策
7	なし(銅板水切り)	なし	銅板水切りの蓄熱影響検証
8	なし	なし	基準試験体
9	フッ素樹脂系遮熱塗料	黒	赤外線を反射し吸収熱量の減少。 汚れの付着による遮熱効果の低下を防ぐ
10	フッ素樹脂系遮熱塗料	茶	
11	フッ素樹脂系遮熱塗料	肌色	

表3 実験項目・方法

		項目	方法・内容
調査	調査A	文献調査	劣化・再生分野の論文/過去の実験データ/ロジスティック曲線式について/劣化の式化
	調査B	比較	試験体に使われていない未使用材と暴露試験体との比較
	調査C	性能検査	通常の屋根に求められる特性/柿葺きに求められる特性/満たさなければならない条件
実験	1	表面貫入力(強度)	デジタルフォースゲージにて表面貫入力を調査する。試験体の測定と未使用材の測定による比較(耐風・耐衝撃性)
		色彩劣化(景観)	色差計にて色彩値「L*」「a*」「b*」を測定する。竣工当時の2009年12月のデータからの経年劣化をロジスティック曲線式にて数値化(耐食性)
		含水率(水)	含水率計・電子天秤を用い、含水率と質量の時間変化を数値化する。減少速度を考える。(耐露性・防水性)
		質量変化率(温度)	電子天秤と測定器を用い、劣化後の薄板の質量と施工当時の薄板の質量を比較。厚みによる耐温度の変化を調べる。(耐寒性・耐熱性)
		赤外線反射率(環境)	施工当時の薄板と暴露後の薄板をそれぞれ測定。薄板への天候(紫外線)の影響について調べる。
		劣化箇所・種類	表面でわかる劣化について、屋根材の「がたつき」「くしびき」(楕状の破損)「破損」の三段階にて評価
調査	2	実験結果をそれぞれ式化・数値化。全てを統合化しうえで劣化を判断する。	

表4 実験要因・水準

		実験要因	水準	
調査	調査①	文献調査	保存再生分野・劣化についての論文、過去のデータ	
	調査②	比較	試験体木材、暴露試験体未使用材	
	調査③	性能研究	屋根の性能・柿葺きの性能	
実験	1	塩山試験体劣化状態評価	・表面貫入力(デジタルフォースゲージ (N/mm ²)) ・表面色彩値の測定(色差計(L*a*b*))・モザイクでの劣化箇所分布・壊れ方の種類を画像解析(箇所/面積)・吸水、撥水性の調査(mm ² /sec・g)・含水率(%)・質量変化率(cm ³ ・g)・赤外線反射率	
			測定位置	上部2カ所(上部銅板の上下) a, a" 中部2カ所(中部銅板の上下) b, b"
			測定材料	上記使用材料全て

3. 本研究における予備調査

3.1 屋根の性能・必要条件

表5で示すとおり、屋根とは建物の上部を覆う構造物で「天候の変化」「気温の変化」「大気中の粉塵などを防ぐ」などの目的があり、屋根には「防水性」「耐風性」「耐衝撃性」「耐候性」「耐食性」「耐寒性」「耐熱性」「耐露性」の性能が求められている。そこで本研究では、これらの性能を満たすかどうかを基準とした「強度」「景観」「水」「温度」「環境」の5つの分野についてそれぞれ実験・測定を行った。

3.2 柿葺きの特徴

表6にあるように柿葺き（こけらぶき）は屋根葺き手法の1つ。木材の薄板を用いて施工し、板の厚さによって名称が決まっている。文化財の屋根に用いられる。材料は「ヒノキ」「さわら」「杉」「榎」特徴として、筋目がよく通っており、削ぎやすい。また水に強い木材である。板は年輪に沿って割られたものを用いる。柿葺きの歴史は茅葺きに次いで古く、法隆寺の五重塔にも使われており、古墳時代から屋根材として活用されている。葺き方は共通で、幅9~10cm長さ24~30cmの板をずらし、下から平行に重ね並べ、竹釘で止める。板の間の隙間が軒裏への通気を促して木材の耐久力の向上を図っている。通常40年程度の耐久性がある。しかし、機械化のため手作業時より耐用年数が劣っている。

4. 試験体における測定器を用いた実験(実験1)

4.1 試験体の劣化箇所・種類の分布

図2に代表的な屋根材の結果を示す。図3にある9つの試験体の表面の劣化について種類分けを行い、それぞれの分布・種類・量を明らかにするものである。この結果から他の試験との関係性や屋根材の劣化の特徴を判断する材料とした。図にあるように劣化位置については全体に広がっていることが分かり、表面にがたつきやくしびきなど劣化に違いが見受けられ、材木ごとの違いも見られた。

4.2 屋根材の表面貫入力測定

図4に代表的な屋根材の結果を示す。図3にある9つの試験体の処理種類ごとに6ヶ所(a, a", b, b", c, c")をデジタルフォースゲージにて貫入力の測定を行った。本研究では、屋根材の耐風性・耐衝撃性を表す強度の分野について貫入力を用いる。5年暴露経過時の屋根材と施工時の未使用材とを比較し今後の強度の劣化についての判断材料とした。図にあるようにどの屋根材も表面貫入力が増加傾向にあり、特に杉栗は短い期間にも低下していることが分かった。



図3 山梨県甲府市塩山にある暴露試験体写真

表5 屋根材に求められる性能

防水性(A)	雨水を室内に浸透させない、屋根面からスムーズに流排出させる。
耐風性(B)	室内への風の吹き込み防止、強風による屋根材の剥離・離散防止。変形や緩みを生じない。
耐衝撃性(C)	飛来物によって容易に損傷しない。運搬・施工時の荷重や衝撃でも容易に損傷しない。
耐候性(D)	太陽光(紫外線)・雨水・気温変化・大気中の汚染物質などによる劣化・損傷が少ない。
耐食性(E)	大気中の海水微粒子・腐食性ガス・酸性雨による腐食が少ない。
耐寒性(F)	雪や雨による凍結・融解がない。積雪による荷重・吹込み・すがもれ・滑雪に耐えられる。
耐熱性(G)	日射などによる熱変動に耐える。熱による収縮、応力による破損がない。
耐露性(H)	温度・湿度による屋根の下面や下地金具の結露を防ぐ。

表6 木材薄板屋根の種類

名称	特徴・違い
柿(こけら)葺き	最も薄い板(薄板)厚さ2~3mm
木賊(とくさ)葺き	少し厚い板(木賊板)厚さ4~7mm
栂(とち)葺き	最も厚い板 厚さ10~13mm

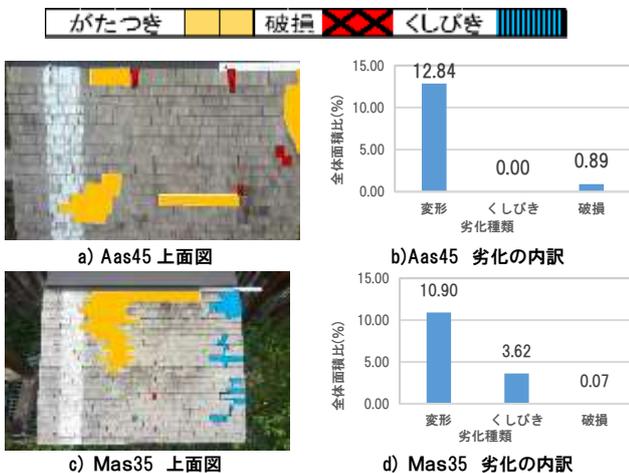


図2 屋根材の劣化箇所・種類の分布

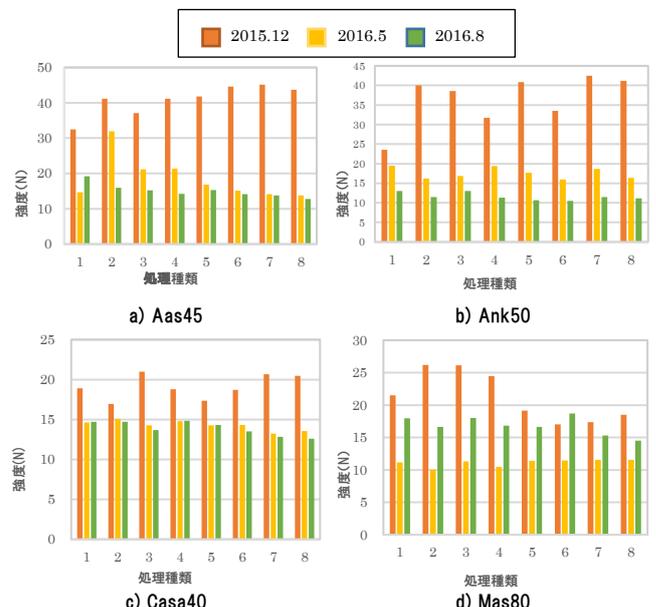


図4 2015.12と2016.5と2016.8における表面貫入力の比較

4.3 屋根材の色の变化の測定

図5にAas45とMas80の結果を示す。図3にある9つの試験体の処理種類ごとに6ヶ所(a, a", b, b", c, c")を色差計にて色彩値の測定を行った。本研究では屋根材の耐食性を表す景観の分野について色彩値の変化を用いる。また、色彩値の変化については2009年12月から継続して測定が行われており、現在までの変化をロジスティック曲線式にて数値化し、景観の劣化についての判断材料とした。結果として暴露試験が5年を経過した時点から変動具合が落ち着きを見せ、ロジスティック曲線式に合うものが出始めている。完璧にあっていないものに関しては今後の測定によってより精度の高いロジスティック曲線式に近づけていけると考えられる。

4.4 試験体から薄板を採取する方法

図6に以下の3つの実験に使用した薄板試験体の採取方法を示す。図3の試験体の処理種類につき各6枚の薄板試験体を右から5年目・10年目・15年目・20年目・25年目とし、今後5年周期の実験の準備とする。また幅を処理種類範囲の1/5、長さは自由、採取位置は銅板の上下付近とした。

4.5 屋根材の赤外線反射率

図8にCnsa40の結果を示す。図6に示される採取方法による試験体4枚と同種類の未使用材の薄板1枚を使用した。本研究では屋根材の耐候性を表す環境の分野にて赤外線反射率を用いた。本研究のみ外部に計測を依頼した。暴露試験材の赤外線反射率を(U₁)、未使用材の赤外線反射率(U₀)とし比較する。

$$U(\%) = U_1/U_0 - \text{①}$$

結果として未使用材0に比べ暴露試験体2Cが可視光線、赤外線共に値が低くなっていることが分かった。

4.6 屋根材の質量変化率

図9にMas80の結果を示す。図6に示される採取方法による試験体408枚を電子秤で計測した。薄板の元の質量(M₀)と採取した薄板の質量(M₁)の比率(R)を処理種類ごとに求め劣化を考える。それぞれは以下のように求めた。

$$R(\%) = M_1/M_0 - \text{②}$$

$$M_0(g) = V_1(\text{採取した薄板の体積}) \times \rho(\text{施工当時の密度})$$

M₁は電子秤にて計測した。結果として比率の平均値が処理2のみ100%を超えたが、その他の処理は平均が100%を下回っており、質量の減少、劣化が認められた。

4.7 屋根の水分吹き付け時の含水率測定・時間変化

図11にMas35の結果を示す。図6に示される採取方法による試験体408枚を含水率計、電子秤で計測した。本研究では屋根材の対露性・耐水性を表す水の分野にて含水率と質量の時間変化を用いた。自然状態の太陽光のみによる乾燥を想定した赤外線ランプを常識的気温の範囲(~40℃)で照射した時の試験体の値が含水後g_tから含水前g₀に戻るまでの時間を計測した。g_tは試験体に塩山の1分間の過去最大降水量の水分(2.5ml)を噴射した物とし、以下の式によるGの時間変化による減少速度(角度)G_vを求めた。

$$G(\%) = g_t/g_0 - \text{③}$$

$$G_v(\%/m) = (G_1 - G_0)/(t_1 - t_0) - \text{④}$$

結果は図にあるように角度が急なもの角度が緩いものがあり、角度が緩いもの、特に処理2のように処理が残っているものは比較的劣化が少ない。反対に処理が残っていないものは痛んだ部分が多く、水を分散吸収することでより減少速度が速くなった。

4.8 柿材の統合劣化指標について

図7に統合的な劣化指標の作成について示す。現段階(暴露試験開始から5年目)での各試験体の劣化状況について上

記までに計測した5つの分野を図のような方法で統合し劣化の指標とした。但し、柿葺きの寿命は25年程度とされていることから暫定的な劣化指標である。

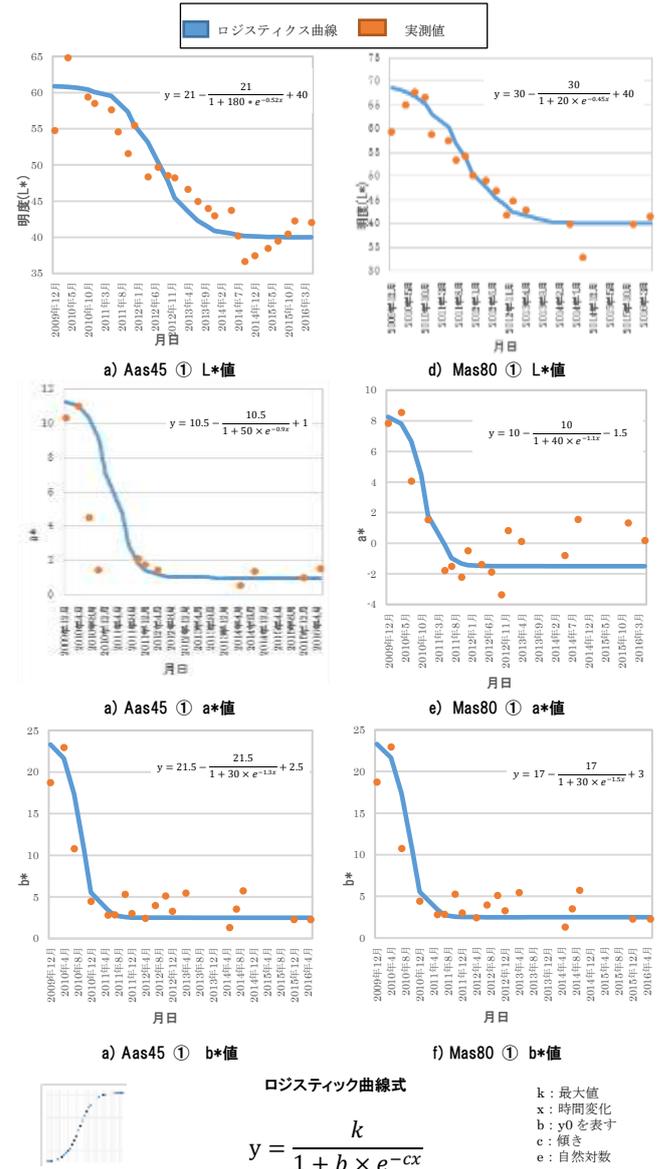


図5 屋根材におけるL*値 a*値 b*値の経年変化

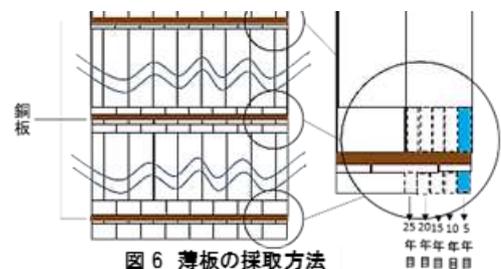


図6 薄板の採取方法

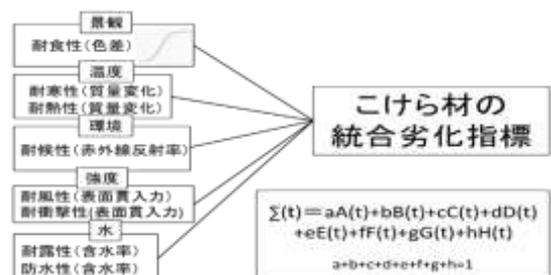
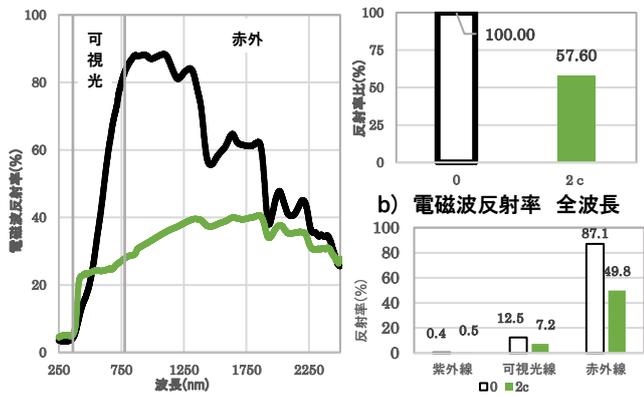


図7 柿材統合劣化指標の作成概念



a) Cnsa40 電磁波反射率 b) 電磁波反射率 全波長 c) スペクトル別反射率
 図 8 Cnsa40 の電磁波反射率

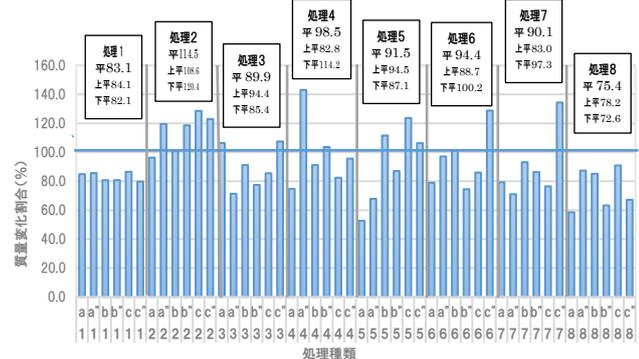


図 9 5年間の暴露試験による質量減少率(Mas80)

5.まとめ

本研究より以下の知見が得られた。

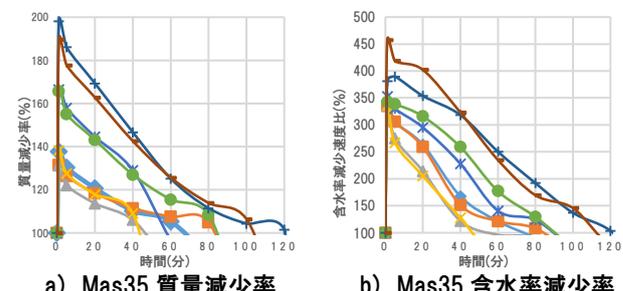
- 1) 表面貫入力ほどの屋根材も強度が低下傾向にあり、特に試験体において「杉」「栗」は短い期間にも低下していることが分かった。
- 2) 劣化位置について全体に広がっていることが改めて分かった。木の樹齢や種類によって劣化の違いも判明した。試験体上部に劣化が起りやすいことがわかった。
- 3) 色彩値には各樹木の特性がロジスティック曲線式にて明らかとなった。暴露試験開始から5年目となり落ち着いた変化となってきたので、今後の観察次第でより精度を高く持ったロジスティック曲線式に近づけられると考えられ
- 4) 屋根材の質量変化について半数以上が 100%以上を保っていることが分かった。ただ、原因として屋根材の表面に塗料が塗ってあったこと、劣化による菌などの付着、採取直前の雨水の吸収などが関係していると思われる。
- 5) 赤外線反射率測定について全波長、可視光、赤外線値全てが5年暴露材に比べ未使用材の方が高く劣化が認められた。暴露材に劣化による黒色化が発生してきていて、波長を吸収しているのが原因であると考えられる。
- 6) 含水率の減少率について角度が急であるほど一気に水を放出していると考えられるため、木自体の劣化はまだあまり進んでいないと考えられ、緩いと放出が遅いことから劣化していると考えられる。但し劣化の仕方によっては角度が急になり、木が強すぎると吸水しなくて角度が緩いといったことがあるので数値に注意が必要。
- 7) 統合的な指標について、柿茸き自体の寿命は25年ほどあり、5年目ではすべての結果として提示するには根拠が弱いため暫定的な結果となった。

参考文献

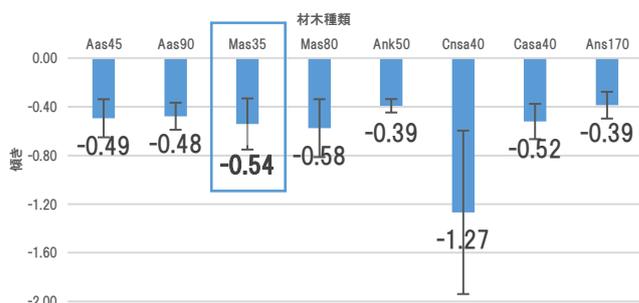
- 1) 柴田圭、田村雅紀 屋外暴露したこけら葺き屋根の物理的経年劣化とむくりの処理の評価 2015年度 建築学部卒業論文梗概集 p359-362
- 2) 清永美奈子、田村雅紀、山本博一、後藤治 伝統的木造建築に用いられるこけら材の高度維持・保存に関する研究 p123-126、学術講演会研究発表集、日本建築工学会 2009
- 3) ANTONIO AGUADO¹, JAINE C. GALVEZ², DAVID FERNANDEZ ORDONEZ³, ALBERT DE LAFUENTE¹, SUSTAINABILITY EVALUATION OF THE CONCRETESTRUCTURES、SICCS2016



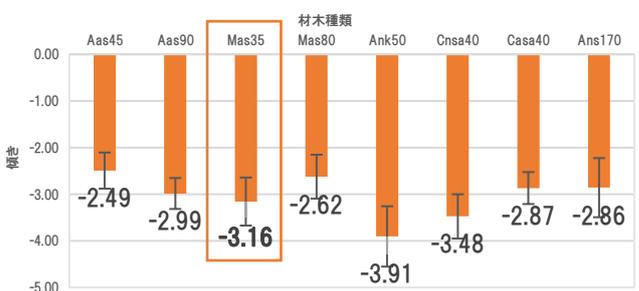
図 10 赤外線ランプ照射試験の様子



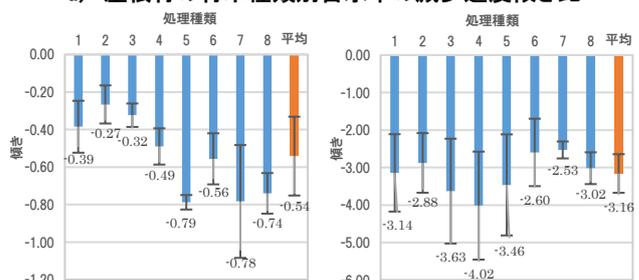
a) Mas35 質量減少率 b) Mas35 含水率減少率



c) 屋根材の材木別含水質量の減少速度の傾き比



d) 屋根材の材木種類別含水率の減少速度傾き比



e) Mas35 処理種類別の質量減少率傾き f) Mas35 処理種類別の含水率減少率傾き
 図 11 含水質量・含水率の時間変化による減少速度

- 4) 大城宜毅、田村雅紀 カビ劣化が顕著なこけら葺き材の無機改質処理と色彩劣化調査に関する研究 2012年度 卒業論文

謝辞

本研究は、H28年度科研費補助金研究(代表山本博一東大教授)の一部であり、山梨県塩山市の石川工務店、島津製作所の齋藤洋臣氏、工学院大学の教職員、学生各位より多大な助力を賜り大変感謝致します。