

焼杉に関する研究

—外装材・内装材としての性能評価—

主査 岡村 健太郎*1

委員 腰原 幹雄*2, 安井 昇*3, 今本 啓一*4, 大塚 亜希子*5,
加來 千紘*6, 本間 健太郎*7, 林 憲吾*8, 菅原 彬子*9

本研究は、2016年に本研究グループが実施した研究に引き続き、日本の伝統的な建材とされる焼杉を対象とし、その性能評価を行うものである。2016年の研究ではコーンカロリメータを使ったサンプルを使用したのに対し、今回の研究では伝統的な作成方法に基づくサンプルおよび機械によるサンプルを用い、前回研究では十分に明らかにすることができなかった外装材としての各種性能および内装材としての音響性能を有することを科学的に明らかにした。また、焼杉の地域分布に偏りがある点についても、2016年の研究に加えた新たな知見を得ることができた。

キーワード：1) 焼杉, 2) 伝統建材, 3) 性能評価, 4) 外装材, 5) 内装材,
6) 地域分布, 7) 木材, 8) 対候性能, 9) 音響性能

RESEARCH ON YAKISUGI

- Performance evaluation as exterior and interior materials -

Ch. Kentaro Okamura

Mem. Mikio Koshihara, Noboru Yasui, Keiichi Imamoto, Akiko Otsuka,
Chihiro Kaku, Kentaro Honma, Kengo Hayashi, Akiko Sugahara

This research, following the research conducted by this research group in 2016, is to evaluate the performance of Yakisugi, which is considered to be a traditional Japanese building material. The current study used samples based on traditional preparation methods and machine samples, which the previous study was unable to fully clarify. It has been scientifically clarified that it has various performances as an exterior material and acoustic performance as an interior material. In addition, we were able to obtain new knowledge in addition to the 2016 research on the fact that there is a bias in the regional distribution of Yakisugi.

1. はじめに

1.1 背景

近年、日本において戦後に造林された人工林が利用可能な樹齢に達しており、木材供給ポテンシャルが高まっている。また、国内の森林資源の有効活用や林業の活性化、炭素貯蔵効果等の地球環境問題への貢献などの社会的要請もあり、木材需要の掘り起こしや利用促進に向けた動きが活性化している。木材の総需要の約4割を占める建設産業においても、2000年の建築基準法改定に伴う規制緩和や、集成材等の新たな構造材や薬剤の浸透等による燃えにくい加工の技術開発もあり、国産材の利用は進展しつつあるといえる。しかし、外装材としての木材利用については、高耐久性を有し比較的メンテナンスが容易な南米や東南アジアからの輸入材が大半を占めており、国産材の利用は進んでいない。

そうしたなか、日本の伝統的な外装材である「焼杉」の基礎的な性能を明らかにすべく、2016年に貴財団の助成を受け「焼杉に関する研究性能評価と普及に向けたフィジビリティスタディ」（以下「2016年焼杉研究」とする）を実施した。焼杉は、ほぼメンテナンスフリーで耐久性が高い素材として古くから日本において使用されてきた建材であるが、その性能や仕組みに関する研究は皆無で、実態がよくわかっていない。「2016年焼杉研究」では、様々な実験により焼杉の性能（撥水性能、吸湿・放湿性能、耐腐朽菌性能など）を確認した。ところが、いずれの性能においても、通常の木材に対する優位性を確認するには至らなかった。

その一方で、焼杉に関しては海外においても年々関心が高まっている。日本の複数の焼杉メーカーがアメリカやタイ、ヨーロッパなどに焼杉を輸出している。なか

*1 近畿大学 講師 博士 (工学) *2 東京大学生産技術研究所 教授 *3 桜設計集団一級建築士事務所 *4 東京理科大学 教授 *5 秋田県立大学 助教 *6 桜設計集団一級建築士事務所 *7 東京大学生産技術研究所 准教授 *8 東京大学生産技術研究所 准教授 *9 近畿大学 助教

でも関心が高いのが、内装材としての焼杉の利用で、オフィスやレストラン等の内装材としての焼杉の需要が高まっている。

1.2 目的

本研究では、こうした背景および「2016年焼杉研究」の結果を踏まえたうえで、今一度焼杉の基礎的な性能を明らかにすることを通し、焼杉の普及に向けた基礎的な知見を得ることを目的とする。

1.3 既往研究と本研究の位置づけ

2016年以前の焼杉に関する既往研究については「2016年焼杉研究」にてすでにまとめてあるため、ここでは主に2016年以降の既往研究について整理する。

住田百合耶の研究^{文1)文2)}では、瀬戸内海の大三島を対象とし、焼杉の使用実態や調達ルート等について実地調査に基づき詳細に明らかにしている。

国内では焼杉の性能に関する研究は見当たらないが、前述した通り海外において焼杉に対する関心が高まっている。例えば、David Hans Ebnerらによる研究^{文3)}では、スプルーやシルバークーパーなどの板材を焼杉の手焼きと同様の方法で焼き、温度や炭化層の厚みカッピングの有無などを確認し、pH値の上昇が腐朽菌耐性をもたらしているのではないかと推測している。また、Edgars Buksanslらによる研究^{文4)}では、焼杉の耐火性能に関する評価を行っている。このほかにも欧州を中心にエンジニアリングの観点から焼杉を評価する研究が近年数多く投稿されている。

本研究における「2016年焼杉研究」からの主要な変更点は以下の二点ある。一つ目は、試験体の作成方法である。「2016年焼杉研究」においては、可能な限り均質な試験体を作成するためにコーンカロリメータを用いた。今回は、杉板を三角形に組んで下から火を入れ焼く伝統的な製造方法（「手焼き」とする）と、工場においてバーナーを用いて作成する製造方法（「機械焼き」とする）の二つの方法によるサンプルを用いることとする。二つ目は、実験内容である。「2016年焼杉研究」においては外装材としての性能を明らかにすることを目的としていたが、今回はそれに加えて内装材としての性能も実験により確認する点である。

2. 試験体の作成

2.1 手焼きによる試験体

本研究の外装材および内装材としての性能評価を行うための手焼きの試験体を表2-1の要領にて作成した。変数を表2-2の通り設定し、それぞれの変数に基づき各種試験体を作成した。

焼杉作成時の杉板表面の燃焼は、材料のガス化によ

り発生する可燃性ガスが空気中の酸素と結合することで生じる。このとき、材料の収縮により表面には特有のひび割れが発生する。そこで、作成した試験体のひび割れの幅・深さおよび節の有無等についても変数として設定した。なお、試験内容によって使用する試験体が異なるため、試験体一覧は各章にて整理している。

表 2-1 手焼きによる試験体の作成方法

場所	長野県諏訪郡富士見町
日時	2021年9月1日
使用木材	吉野産杉一等（阪口製材所） 天然乾燥
焼き方	3枚の板を三角形に組んで藁紐で縛り、台に立てかけて下から火をつけた新聞紙を入れ、内側表面を燃やす（写真 2-1）

表 2-2 手焼きの試験体の変数^{注1)}と諸元

変数	記号	説明
厚み	厚	厚 21 mm × 幅 175 mm × 長さ 2,000 mm
	薄	厚 35 mm × 幅 175 mm × 長さ 2,000 mm
焼き時間	浅	三角形の先から火が出てから 1.5 分燃焼
	中	三角形の先から火が出てから 2.5 分燃焼
	深	三角形の先から火が出てから 3.5 分燃焼
木表 / 木裏	表	木表側を焼く
	裏	木裏側を焼く
ひび	幅	ひびの幅
	深	ひびの深さ
節	有	節有り
	無	節無し

2.2 機械焼きによる試験体

機械焼きの試験体として、愛媛県内にて焼杉を製造・販売している株式会社共栄木材の製品を使用した。同社では、重油バーナーのついた装置のなかに板材をラインで流し、上部から熱を加えることで焼杉を製造している。使用したのは、無塗装の商品「クロ」と内装用にアクリル合成樹脂を塗装した「青黒（せいこく）」の二種類である（表 2-3）。

表 2-3 機械焼きの試験体

製品名	説明
クロ	厚 15 mm × 働き幅 165 mm（板幅 176 mm） × 長さ 3,000 mm 無塗装
青黒	厚 14 mm × 幅 103 mm × 長さ 3,000 mm アクリル合成樹脂塗料を塗装

2.3 手焼きと機械焼きの温度測定比較

本実験では前述の通り「手焼き」および「機械焼き」にて試験体を製作した（写真 2-1）。各製造工程における測定結果を表 2-4 および図 2-1・図 2-2 に示す。なお本研究の温度測定における加熱時間は、手焼きでは、火源（新聞紙）への着火後に三角柱の筒上部より火炎が噴出した時から、杉板を固定する藁紐が切れ三角柱を解体して杉板の加熱面を広げるまでの時間とし、機械焼きでは、杉板の先端が加熱炉内を通過する時間と定義する。

手焼きの試験体では、杉板の加熱表面の温度は、火炎噴出から約2分後に木材の炭化温度とされる260℃を超え、その後1分30秒程で藁紐がきれ三角柱を解体した。加熱中の杉板表面の最高温度は419℃（杉板上端から500mm）であり、実験後の杉板の炭化深さは3mm程度であった。また、加熱表面から5mm内側の内部温度は、火炎噴出から3分30秒の製作終了時が最も高く97℃程度であった。既往の「2016年焼杉研究」では、手焼きによる焼杉の断面を加熱表面から①炭化層、②受熱層、③健全層の三層構造と考察・定義したが、②受熱層の温度は、100℃程度であると考えられる。

一方、機械焼きの試験体は、加熱炉内での加熱時間は30秒（杉板の全長が加熱炉を通過する時間は40秒程度）であり、板厚15mmと18mmの杉板では、加熱炉搬入から20秒、25mmの杉板では25秒程度で加熱表面の温度が260℃を超え炭化し始めた。加熱中の杉板表面の最高温度は、いずれも300℃前後であり、実験後の炭化深さは0.5mm程度であった。また、加熱表面から5mm内側の温度は、製作終了時が最も高いが、15mm厚と18mm厚では60℃以下と手焼きに比べて低い温度となった。これは、木材の熱伝導率が0.15~0.25 [W / m・K]と比較的低いためと考えられる。加えて図2-2より、械焼きにおける時間-温度面積（積分値）を算定すると、加熱表面および加熱表面から5mmの深さいずれも手焼きの値の1割以下と入熱に大きく差がみられる。

以上の結果より、機械焼きでは手焼きに比べ加熱時間が短く、木材内部に熱が伝わる前に製造工程が終了することから、①炭化層が薄く形成されることに加え、入熱量も小さく、②受熱層の温度が低く、加熱による試験体の熱分解や変色が微小であると考えられる。

表 2-4 計測結果概要一覧

試験体仕様					製造方法 ※2	加熱時間 ※3	結果			
寸法 [mm]		樹種	含水率 ※1	測定位置			最高温度	炭化深さ ※4		
厚	幅				長					
20	170	2m	スギ	15%	手焼き	3分 30秒	先端から 500mm	表面	419℃ (3分20秒)	3mm
								深さ5mm	97℃ (3分30秒)	
15	150	3m	スギ	16%	機械焼き	30秒	試験体 中央	表面	367℃ (3分20秒)	0.5mm
								深さ5mm	98℃ (3分30秒)	
18	150	3m	スギ	16%	機械焼き	30秒	先端から 500mm	表面	316℃ (25秒)	0.5mm
								深さ5mm	56℃ (40秒)	
25	150	3m	スギ	16%	機械焼き	30秒	先端から 500mm	表面	340℃ (24秒)	0.5mm
								深さ5mm	59℃ (40秒)	
25	150	3m	スギ	16%	機械焼き	30秒	先端から 500mm	表面	288℃ (25秒)	1mm
								深さ5mm	96℃ (40秒)	

※1 含水率計（高周波式）により杉板両端・中央を測定した平均値を記載する。
 ※2 手焼き：3枚の板を藁紐で三角柱の筒状にし、下方より新聞紙を燃して煙突効果により焼く方法。
 機械焼き：平置きした板をベルトコンベアで水平移動させ、加熱炉内の重油バーナーにより熱を加えて焼く方法。
 ※3 手焼きでは三角柱の筒上部より火炎が噴出してから藁紐が切れ杉板を解体するまでの時間を加熱時間と定義する。
 機械焼きでは、杉板の先端が加熱炉内を通過する時間を加熱時間と定義する。
 ※4 炭化深さは実験後に試験体表面の炭化層を部分的に削ぎ落とし、残存厚より算定した値（参考値）を記載する。



写真 2-1 製造方法の様子（左：手焼き、右：機械焼き）

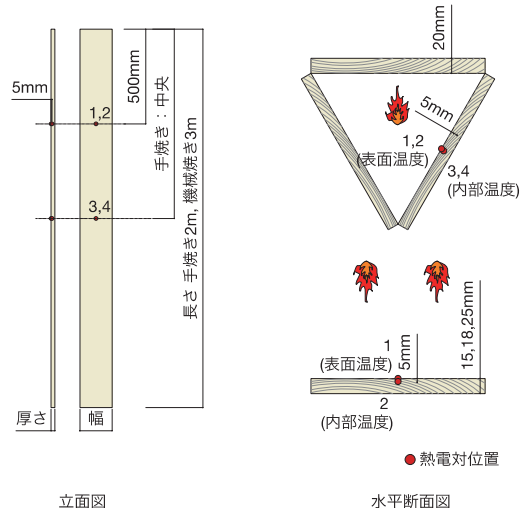


図 2-1 試験体の温度測定位置

（水平断面は、上：手焼き、下：機械焼き）

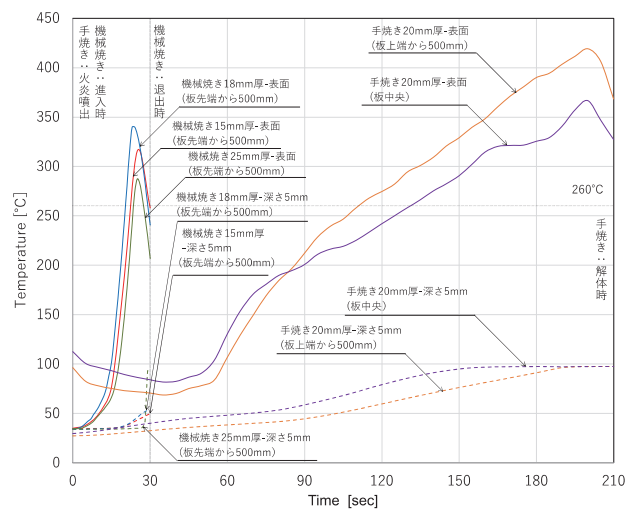


図 2-2 加熱時間における計測温度推移

3. 外装材としての性能評価

3.1 実験概要

1) 試験の種類

本章においては、撥水試験、吸湿試験、放湿試験、暴露試験を実施し耐水性能の検討を行う。既往報告文⁵⁾で課題として挙げられた試験体作製方法および既往報告で提案した三層モデル（「炭化層」・「受熱層」・「健全層」）について検証するものとする。

2) 試験体概要

炭化層有・浮造り・表面切削の機械焼き3種類と、深焼き・中焼き(木表)・中焼き(木裏)・浅焼きの手焼き4種類、無垢材2種類の計9種類を3体ずつとした。試験体一覧を表3-1に示す。

表 3-1 試験体一覧

製造方法	試験体	説明	略称
機械焼き	炭化層	炭化層がそのままついている焼杉	炭
	浮造り	表面の炭化層をある程度落としたもの	浮
	表面切削	浮造りから表面を削ったもの	削
	無垢材(薄)	機械焼きのサイズに合わせて加工	無薄
手焼き	深焼き	ある程度の時間燃焼させたもの	深
	中焼き(木表)	木表を深焼きよりも短時間燃焼	中表
	中焼き(木裏)	木裏を中焼き木表と同様に燃焼	中裏
	浅焼き	最も短い時間燃焼させたもの	浅
	無垢材(厚)	手焼きする前のスギ材	無厚

3.2 撥水試験

森林総研法に準じ、試験体表面に滴下した水滴の吸水性について、試験体の質量変化を算定する。なお、今回の実験において正確に1gを滴下することが難しかったため、計算式を(1)とした。また、試験の実施においては試験前に「室温で1週間調湿」する必要があるため、温度20℃、湿度65%に設定した恒温恒湿機内で1週間試験体を調湿したのち、試験を実施した。

試験手順

1. 室温で1週間調湿した試片表面の中央部に約1gの脱イオン水をスポイトで滴下
2. 試験体の質量を計測
3. 滴下部にシャーレをかぶせ1分間室温で放置
4. ティッシュペーパーで水を拭き取る
5. 試験体の質量を再計測

$$\text{撥水度}(\%) = \frac{(W_1 - W) - (W_2 - W)}{W_1 - W} \times 100 = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W} \times 100 \quad \dots(1)$$

W：水滴下前の試片質量(g)

W₁：水滴下直後の約1gの水を含む試片質量(g)

W₂：水滴下1分後に水を拭き取った直後の試片質量(g)

試験結果を図3-1に示す。炭化層のある試験体は全体的に無垢材より撥水性が低い測定結果となった。既往研究⁵⁾では燃焼時間が長く炭化層が厚い試験体の方が、撥

水性が低い結果となっていたが、本検討においてはばらつきが大きい結果となった。特に中焼きの木表はほぼ撥水度0%となった。これらは特に手焼きの焼杉表面の割れが深く、そのひび割れに入り込んだ水分をしっかりと拭き取れなかったことが原因と考えられる。一方で、浮造りや表面切削はばらつきも少なく、本グループの既往報告⁵⁾と同様に、無垢材よりも撥水性が高くなった。高温処理された受熱層⁵⁾が撥水性の向上に寄与している可能性が示唆された。

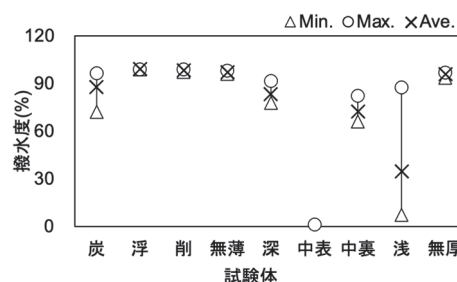


図 3-1 撥水試験結果

3.3 水掛かり試験

1) 実験の目的

前項の撥水試験では滴下量が1gと少なく、機械焼きの試験体においても炭化層のひび割れに浸入した浄水を吸い取れず、焼杉本来の撥水性を確認することは難しいことが明らかとなった。そこで、水掛かりに対する試験方法を提案し、以下の通り実験を行うこととした。

2) 実験方法

① 水掛かりの方法

試験体を立てた状態で横から噴霧することで、水の流れを実際の焼杉建築と同等の状態とする。噴霧量代表値として2020年の東京都の1日あたり降水量を噴霧することとする。試験体サイズを考慮して算出した結果、噴霧量は27.15gとした。なお、今回の試験による保水性能は(1)の式から(3)の式を導いて求めた。

$$\text{保水しにくさ}(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W} \times 100 = \frac{W_1 - W_2}{27.15} \times 100 \quad \dots(2)$$

W：噴霧前の試験体質量(g)

W₁：噴霧量(27.15g)を含む試験体質量(W+27.15g)

W₂：噴霧後の試験体質量(g)

② 試験手順

試験手順を以下に示す。

1. 噴霧前の試験体質量を計測
2. 試験体を立てた状態にして浄水を噴霧(写真3-1)
3. 噴霧直後の試験体質量を計測
4. 1週間養生 ※～4を3回繰り返す
5. 3回目のみ4.のあとに質量を計測

また、温度 20℃、湿度 65% に設定した恒温恒湿層で 5 日間試験体を調湿し、撥水試験と条件を揃えた。



写真 3-1 噴霧の様子

実験結果を図 3-2 に示す。撥水試験と同様に、浮造り及び表面切削の保水性が無垢材と同等以下であった。焼杉同士で比較すると、機械焼きは 95%前後と高い数値なのに対し、手焼きは 81%~93%とかなりばらつきが見られた。特に中焼き(木表)の保水性が高い理由として、炭化層表面の割れが深かったことが推察される。

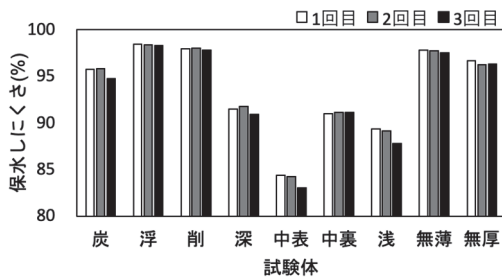


図 3-2 水掛り試験結果

1 週間養生した試験体の質量変化を噴霧前の質量比で求める。1 回目の噴霧前の質量を基準に、2 回目及び 3 回目の噴霧前質量、そして 3 回目の試験から 1 週間養生した試験体質量をそれぞれ以下の記号で表し、式(3)及び式(4)を用いて比較する。

$$\text{質量増加量(g)} = W_B(\text{また } W_C \text{ 及び } W_D) - W_A \quad \dots (3)$$

$$\text{質量増加率(\%)} = \frac{W_B(\text{また } W_C \text{ 及び } W_D) - W_A}{W_A} \times 100 \quad \dots (4)$$

W_A : 1 回目試験前の試験体質量(g)

W_B : 2 回目試験前の試験体質量(g)

W_C : 3 回目試験前の試験体質量(g)

W_D : 4 回目試験から 1 週間養生した試験体質量(g)

実験結果を図 3-3 に示す。全ての試験体で、時間経過とともに質量増加が見られた。しかし、増加量は最も多い無垢材(厚)で 0.44g と小さく、増加率でも最大で浅焼きの 1%にとどまっている。

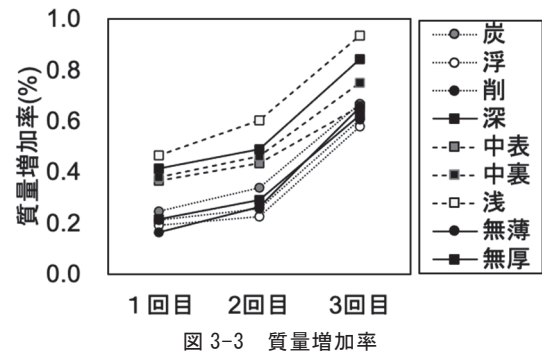


図 3-3 質量増加率

3.4 吸湿試験

JIS 規格(JIS Z 2021:2009) に準拠した以下の手順に従って得られた各試験体質量より、式(5)を用いて吸湿量を算定する。

<試験手順>

1. 予備乾燥後に試験体の質量・寸法を測定
2. 吸湿面(焼いた面)以外を被覆剤で覆い質量を測定
3. 試験体を装置に移し 6, 24, 72 時間目の質量をそれぞれ測定(被覆剤分を除く)

$$S_{m24h} = \frac{m_{24h}(\text{または } m_{6h} \text{ 必要な場合は } m_{72h}) - m_{0h}}{A} \quad \dots (5)$$

S_{m24h} : 24 時間後における吸湿量 (g/cm²)

m_{0h} : 温度 40℃、湿度 75% で平衡したときの質量 (g)

m_{24h} : 24 時間目の質量から被覆剤の質量を差し引いた質量 (g)

A : 吸湿面積 (cm²)

試験手順 1 における予備乾燥を 40℃・70% の恒温恒湿機で質量が安定するまで行ったのちに、40℃・90% に設定した同試験機内で吸湿試験を行った。また被覆材としてパラフィンワックスを用いて被覆した。

試験結果を図 3-4 に示す。全ての試験体が時間経過にしたがって吸湿量を増加させているが、焼杉の試験体は無垢材と同等以下の吸湿量となり、炭化層の残る試験体が最も低い値を示した。ただし、吸湿量は多く 0.019g/cm² とわずかな変化であるため、サンプルによるばらつきとも考えられ、何度か試験を繰り返し同様の傾向があるかを確認する必要がある。

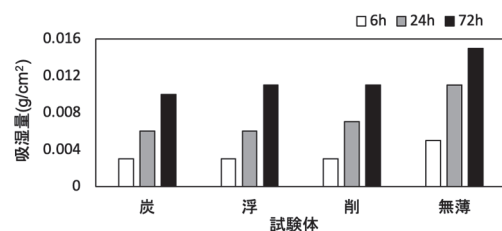


図 3-4 質量増加率

3.5 放湿試験

既往報告^{文5)}と同様に、温度 65℃・調湿無しに設定した恒温恒湿機で試験体の質量が安定するまで保持したのち、試験前の質量と質量安定後の質量比を算出して求めた(図 3-5)。放湿試験も吸湿試験同様に無垢材の質量変化が最も大きかった一方で、高温処理された木材は 1～1.5%程度減少が抑えられていることが分かった。

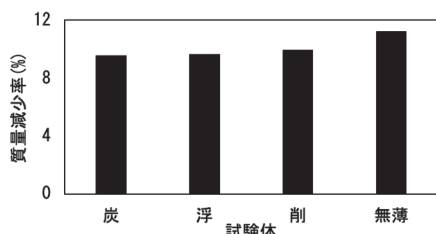


図 3-5 質量変化率

3.6 ウェザーメーターによるキセノン照射

焼杉板は住宅などの外装材として使用されることが多く、表面の炭化層を活かした独特な風合いの意匠表現が可能である。しかし、紫外線や風雨といった屋外環境に、長時間曝されることで生じる焼杉板表面の変化に関する研究は少ない。本節では焼杉板の耐候性を評価するための促進試験結果について述べる。

1) 試験概要

焼杉板の耐候性能を評価するため、ウェザーメーター(写真 3-2)を用いて促進耐候性試験を行った。本試験は JIS K 5600-7-7 のキセノンランプ法を参考に行った。試験体の炭化層(木表)側に対して紫外線を照射させ、試験時間を 1000 時間と 2000 時間に設定した。各照射時間終了後において、劣化状況の写真撮影を行うとともに、色差、光沢度の計測を行った。

試験に使用した焼杉板は、製造方法や炭化層の厚さによる耐候性能を比較するため、伝統的な三角焼で焼成された焼杉の 3 種類(浅焼, 中焼, 深焼)および木裏を中焼した中裏焼と、工場で焼成された機械焼の焼杉および杉の無垢材を試験体として用意し比較試験を行った。各試験体の炭化層厚さを表 3-2 に示す。

2) 計測方法

① 画像解析

紫外線照射によって炭化層が剥離し、白化がみられた箇所を画像解析によって求めた。写真 3-3 に紫外線照射 2000 時間後の試験体状況を示す。ここでは無垢材が白化している範囲を紫外線照射による影響範囲として、以下の式を用いて各試験体の白化面積を求め無垢材に対する劣化率(以下、劣化率)として算出した。

$$\text{劣化率} [\%] = \frac{\text{焼杉試験体における白化面積}}{\text{無垢材における白化面積}} \times 100 \quad \dots(6)$$

② 色差

色差計を用いて試験体表面 2 点で計測を行い、2 点での平均を求めた。計測結果は L*a*b*表色系を用いて表し、試験前の結果を基準として以下の式で色差を算出した。

$$\Delta E = (\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta L^2)^{1/2} \quad \dots(7)$$

③ 光沢度

光沢度計を用いて試験体表面の光沢度を測定し、試験前と 1000 時間、2000 時間経過での変化をまとめた。

3) 試験結果

① 画像解析

図 3-6 に劣化率の算出結果を示す。各試験体の劣化率を比較すると、機械焼の試験体のみが明確に大きな値を示している。伝統方法で焼成された試験体はいずれも 1%以下の数値を示しており、深焼に関しては 1000 時間から 2000 時間の劣化率の変化がほとんど見られない。



写真 3-2 ウェザーメーターを用いた試験の様子

表 3-2 試験体詳細

試験体種類	炭化層厚さ(mm)
浅焼	2.5~3.0
中焼	2.8~3.8
中裏焼	2.5~3.6
深焼	2.9~4.2
機械焼	0.8~1.2
無垢	—

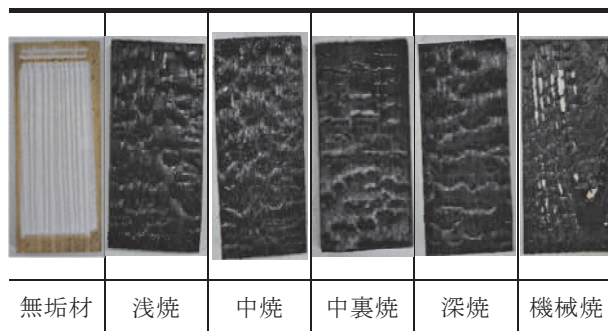


写真 3-3 紫外線照射 2000 時間後の試験体状況

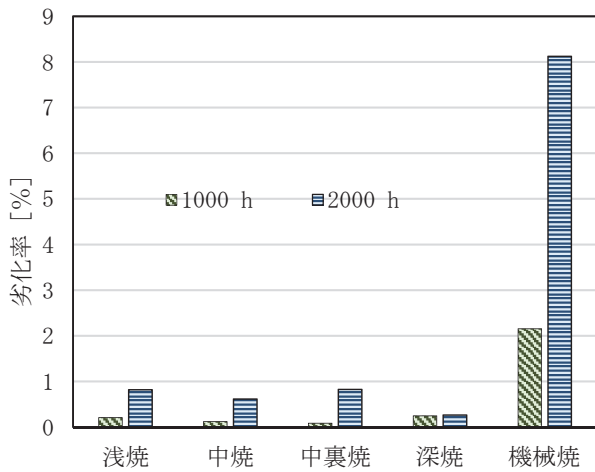


図 3-6 劣化率

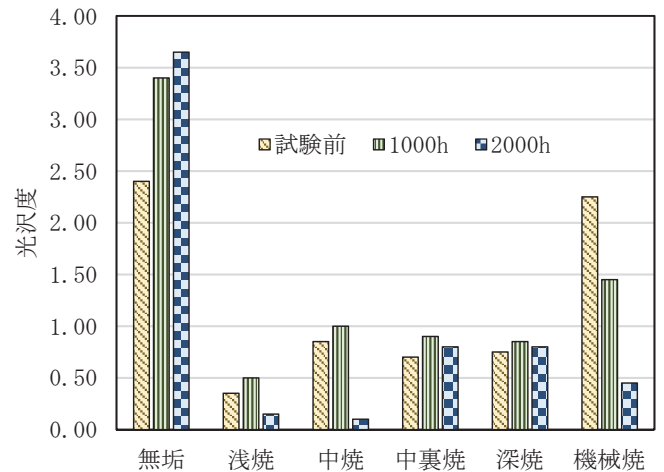


図 3-8 光沢度

表 3-2 の炭化層の厚さと見比べると、炭化層の厚さの違いが焼杉の炭化層の剥離に影響を与えていると推察される。

② 色差

図 3-7 に色差の測定結果を示す。無垢材は色差が大きく、写真 3-3 から分かるように目視で確認できる色味の変化が起こっていた。一方、伝統方法で焼成された焼杉試験体における色差 ΔE の値は色の離間判定において一般的に同一色と判断される値の範囲 ($\Delta E \leq 3.2$) に収まっており、紫外線による焼杉板表面の色味の変化は著しく小さいことが分かる。

③ 光沢度

図 3-8 に光沢度の測定結果を示す。焼杉板の試験体は、紫外線劣化時間に伴う光沢度の変化に規則性はなく、いずれの測定においても無垢材の光沢度を下回っている。焼杉表面には独特の光沢を見ることができ、光沢度は試験体の表面性状の影響を大きく受けてしまう。そのため焼成の際に生じる炭化層表面の微細な凹凸により光沢度が低い値を示すものと考えられるが、紫外線による影響は明確には現れにくい。

3.7 暴露試験

2021 年 9 月から小試験体の屋外暴露を開始した。暴露試験の様子を写真 3-4 に示す。試験体のサイズは 60mm×90mm×15~22mm 程度で前項までの試験と共通のサイズとした。表面切削に関しては、受熱層⁵⁾の存在を明らかにするため炭化層をほぼ削った試験体を作成し、熱処理されていない無垢材と比較する。

加工方法や加工の有無で屋外での劣化に違いがあるかを目視で観察する。また測色は、機械焼きと手焼きを比較するため表面の炭化層を落とさないよう注意しつつ測色計を用いて測色を行った。



写真 3-4 暴露試験の様子

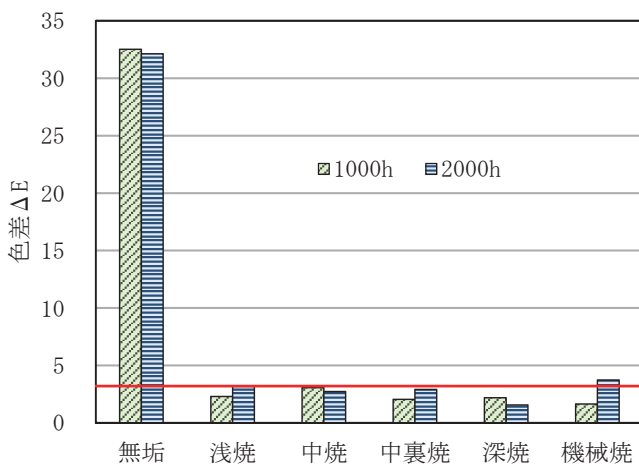


図 3-7 色差 ΔE

実験結果を図 3-9~図 3-12 に示す。

JIS による色許容差の分類を表 3-3 に示す。無垢材については、1 週間後には 5 級に範囲にあり、同色の範囲からは肥えている。炭化層のある試験体では、機械焼き、手焼きなどの焼き方を問わず全ての焼杉において色差変化が小さかった。最大で 5 程度、平均は 3 程度で 4 級となり、一般的な標準色見本と試料色との目視判定による許容色差範囲であった。一方、浮造りは暴露開始直後より緩やかに色差が大きくなり、2 ヶ月後には無垢材と同等程度の色差となった。表面切削は無垢材を大きく上回る 6 級となった。

表 3-3 J I S による色許容差の分類^{文6)}

色差 ΔE^*	名称	適用
~0.2	測色不能領域	
0.3	識別色差	同一物体の測色再現精度
0.6	1級(厳格色差)	各種の誤差要因を考えた場合の実用的な許容差の限界
1.2	2級(実用色差a)	ならべて判定した場合に、ほとんどの人が容易に色差を認める事が可能
2.5	3級(実用色差b)	離間して判定した場合に、ほぼ同一と認める事ができる
5	4級	経時比較した場合に、ほぼ同一と認める事ができる
10	5級	マーキングペン
20.0~	6級	色名レベルの色の管理

片岡^{文6)}の報告によると、木材の外観変化は、1 光変色期、2 明・淡色化期、3 灰色化期、4 凹凸化期と4つのステージに分けられる。それぞれの現象は以下の通りに分類される。

- 1 光変色期=紫外線による成分の変解
- 2 明・淡色化期=分解した着色成分が雨水に溶出
- 3 灰色化期=黒色系のカビ汚染
- 4 凹凸化期=雨水・砂塵により侵食

今回のケースにおいては、光変色期に見られる黄みの増加が1か月程度続いたのちに横ばいか減少に転じていることから、明・淡色化期まで劣化が進行していると考えられる。ただ、浮造りは赤みの増加が見られたため、色調がより色鮮やかになったことも分かった。以上より、炭化層のある焼杉は、紫外線などによる変色がほぼ生じないことを確認できた。また黒い炭化層を削った浮造りは無垢材同様に紫外線など劣化因子の影響を受けるため、炭化層が変色の防止に寄与すると考える。

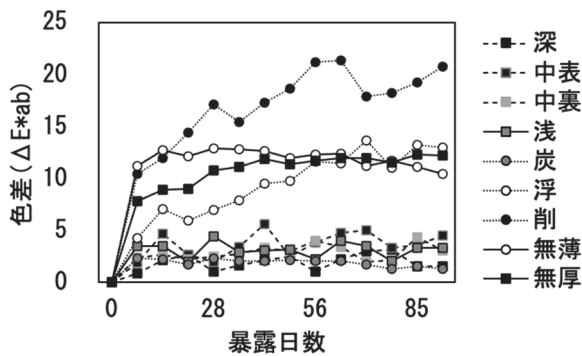


図 3-9 色差変化 (平均)

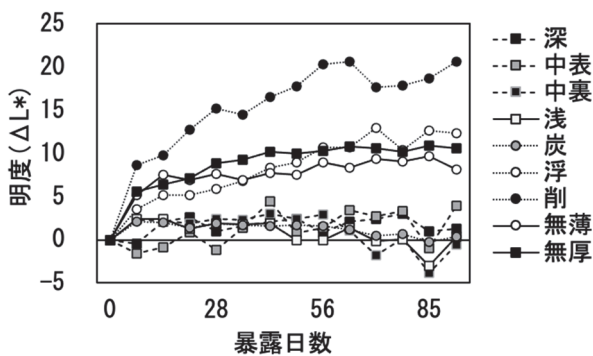


図 3-10 明度変化 (平均)

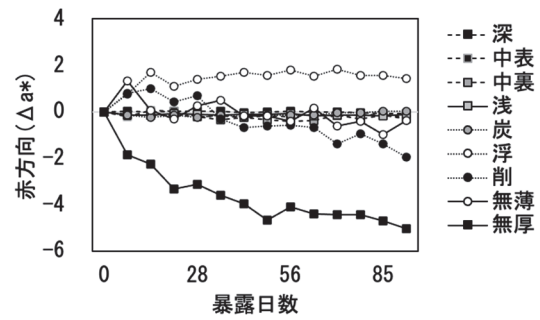


図 3-11 赤み変化 (平均)

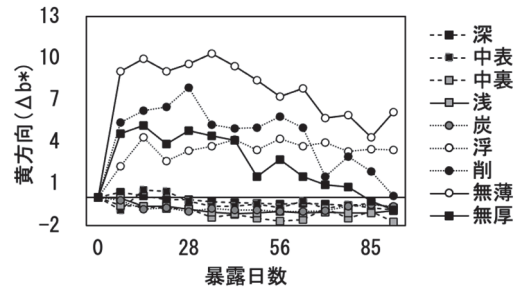


図 3-12 黄み変化 (平均)

3.8 実例の経年変化分析

以上の実験による分析に加え、実地調査により焼杉の経年変化を分析した。分析対象としたのは、手焼きによる焼杉を使用した建築のうち、建設年が明らかなものなかで最も古い事例と考えられるラムネ温泉（設計：藤森照信、2005年竣工、大分県竹田市）である。

ラムネ温泉は大浴場棟・家族湯棟・美術館棟の3つの建築がコの字型に配置されている。それぞれの建築で中庭に面し焼杉の経年変化を確認できる立面（大浴場棟：東，家族湯棟：南，美術館棟：南）を対象とした。各立面について、フォトグラメトリーを用いて立面図を作成した（写真 3-5）。また、各面における劣化が少ない部位と進行している部位を目視で観察し、式差計を用いて式差を測定した^{注2)}。

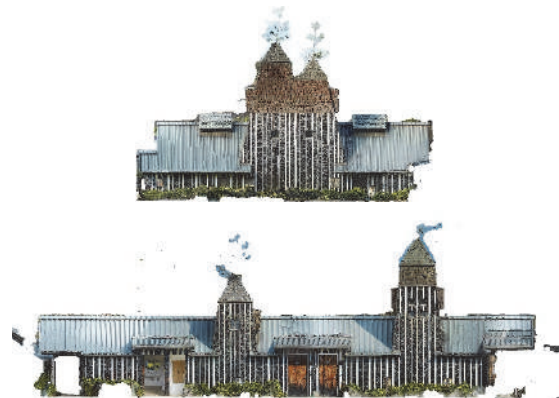


写真 3-5 大浴場棟 (上)・家族湯棟 (下) の立面

大浴場棟および家族湯棟について目視および立面図を確認したところ、板の上端と軒との取り合いの部分や、

板の下端で入口付近や窓回りなどで炭化層が剥がれている部分が見受けられたが、全体としては炭化層が保持されていることが確認できた^{注 3)}。下端部において式差計による測定値が大きかったのは、浴室の窓の下や出入口付近である。美術館棟に関しては、動線沿いの部分を除けば炭化層の剥離等はほとんど見受けられなかった。

4. 内装材としての性能評価

快適な室内音環境を形成するため、室の吸音設計が重要である。繊維や微細な気泡等で形成されるグラスウールやポリウール等の多孔質材料は、現状最も広く利用される吸音材であり、中高音域で高い吸音性能を示し、厚みが大いほど性能が高いという特徴がある。本章では、焼杉表面の炭化により形成された多孔質層を吸音材として利用することを想定し、実験的検討を行った。予備検討で板材自体の厚みは吸音特性にほとんど影響しないことを確認したため、本研究では炭化層のみに着目する。炭化層の厚みや燃焼時のガス化により表面に現れる特徴的なひび割れなどの幾何的性状や試料の作成方法の違いが、垂直入射吸音特性に与える影響を検討する。

4.1 実験条件

図 4-1 に示す直径 29 mm の音響管 (Type4609, Brüel&Kjær) を用いて、伝達関数法 (ISO10534-2)^{文 7)} で垂直入射吸音率を測定した。図中、M1, M2 で示す受音点にペアマイクロホン (Type 4939, Brüel&Kjær) を設置した。測定周波数範囲を 500 Hz-6.4 kHz とし、音源信号としてホワイトノイズを用いた。

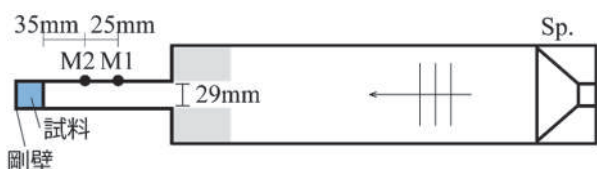


図 4-1 音響管の概要

検討対象は、手焼き (2.1 章) で作成した燃焼時間の異なる 3 種の試料、および機械焼き (2.2 章) で作成した表面塗装有・無の 2 種の試料とした。これらを音響管の直径に合わせて円形カッターで切り出し、各条件につき 3-5 種類の試料を作成した。節による表面の顕著な凹凸が吸音特性に影響する可能性があるため、浅焼き・中焼きについては節あり試料も用意した。また、炭化層の有無による違いを確認するため、炭化層無の条件として、焼杉の炭化層をカッターで削り落とした試料も作成した。これらの試料の詳細を表 4-1 に示す。測定の際、試料と管の間に隙間ができないよう、試料外周部に粘土とワセリンを塗布した。

表 4-1 音響管用試料の条件

製造	数	厚み [mm]		ひび割れ [mm]		節 [mm]	
		板	炭化層	最大深さ	最大幅	長半径	短半径
炭化層無	3	15, 21	0	0	0	-	
手焼き	浅	21	1.3~2.3	0.7~1.7	0.7~1.4	-	
	浅		0.8/1.4	3.0/7.4	3.0/6.0	10.2/9.2	8.9/8.2
	中		3.3~4.6	1.3~4.5	1.3~2.8	-	
	中		3.2/3.5	4.1/4.3	4.1/4.9	5.7/5.3	5.3/2.4
	深		5.4~5.7	0~4.1	0~3.7	-	
機械	-	15	0.9	0.6~0.8	1~1.5	-	
	塗装		0.9	0.6~0.8	1~1.5	-	

4.2 試料の作成方法による違い

垂直入射吸音率の測定結果を条件ごとに図 4-2 に示す。図中 (b) (c) の破線は節あり条件の結果である。

図 4-2 (a) 炭化層無ではほぼ吸音性能をもたない。これに対し、図 2 (b)-(f) に示す炭化層を有する他の条件では、全てある程度の吸音性能が見られ、概ね周波数が高いほど吸音率が高くなっている。手焼きの条件同士を比較すると、(d)→(c)→(b) と燃焼時間が長い順、すなわち炭化層が厚い順に吸音率が高い。以上の 2 点から、焼杉の炭化層は 4 章冒頭で述べた多孔質吸音材としての特性を有するといえる。また、燃焼時間によって炭化層の厚みを変化させることで、必要に応じて吸音性能を調整できることが示された。

図 4-2 (b) (c) で節の有無を比較すると、破線で示す節有条件の方が全体として吸音率が高くなっている。多孔質吸音材は、一般に繊維などの骨格の隙間にある空気が振動し、骨格との摩擦等で音エネルギーが熱エネルギーに変換されることで音波が減衰する。節無条件では吸音層が表面の非常に薄い部分のみであるのに対し、節有条件では、深い割れ目の形成により、吸音層が実質的に厚くなるためと考えられる。(c) の紫破線を除く (b) (c) の 3 つの節有条件を見比べると概ね同等の吸音性能を有しており、節有の吸音特性は炭化層の厚みより節の影響が支配的といえる。(c) の紫破線のみこの傾向に沿わないが、この試料の節は他の 3 つと比べ小さく浅く、節部分の影響が小さかったことが原因と考えられる。

手焼きと機械焼きの違いを検討するために炭化層厚の近い図 4-2 (b) 浅焼きと (e) 機械焼きを見比べる。(e) 機械焼きの吸音率は概ね、炭化層が少し厚めの (b) 浅焼きより小さく、炭化層無より大きい。したがって、製造方法によらず、炭化層の厚みが吸音率に寄与すると考えられる。ただし、(e) は (b) に比べ試料ごとのばらつきが小さく、機械焼きの方が炭化層を均一に形成でき、性能が安定すると考えられる。

図 4-2 で機械焼きの (e) 塗装無と (f) 塗装有を比較すると、塗装を施すことで吸音率が若干低下していることがわかる。塗装膜で音波の炭化層への入射を遮断したこと、

塗料により炭化層中の微細な空隙が塞がれたことなどが原因として考えられる。

4.3 ひび割れの影響

ひび割れと吸音特性の相関関係を検討するため、4.2節の測定結果から1/3オクターブバンドごとの垂直入射吸音率を求めた。ただし、塗装のない7条件を対象とする。図4-3に代表として1.25, 2.5, 5 kHz帯域の1/3オクターブバンドごとの垂直入射吸音率と、ひび割れの

(a)最大深さおよび(b)最大幅の関係を示す。

図4-3より、ひび割れの最大深さや最大幅と垂直入射吸音率の間には決定係数にして0.64-0.74と、どの帯域でもある程度高い相関がある。また、炭化層厚が異なる条件でもひび割れの深さや幅が同程度であれば同等の垂直入射吸音率を示している。これらのことから、焼杉の垂直入射吸音率には炭化層の厚みだけでなくひび割れの性状も大きく影響することが示唆された。

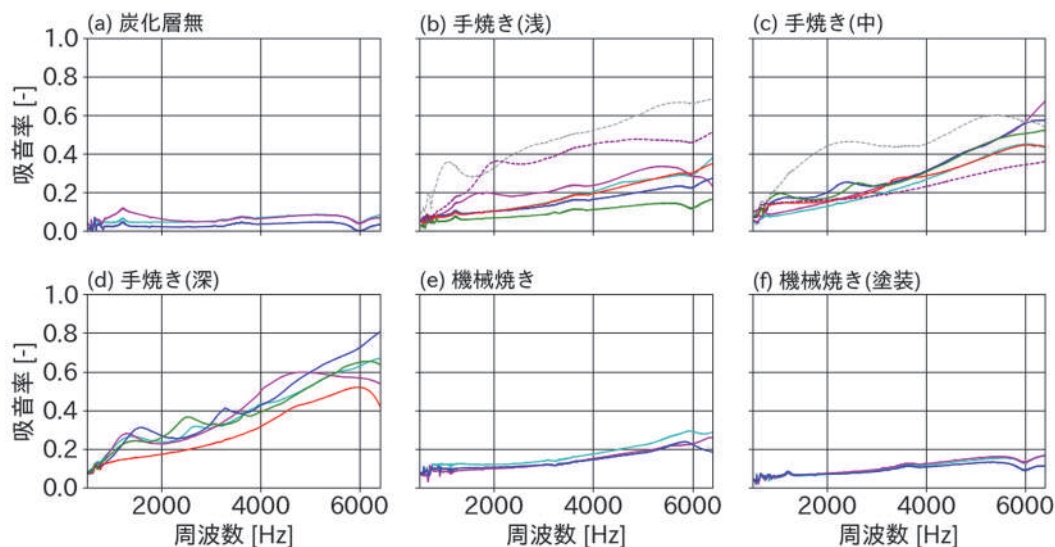


図4-2 試料作成方法ごとの垂直入射吸音率測定結果

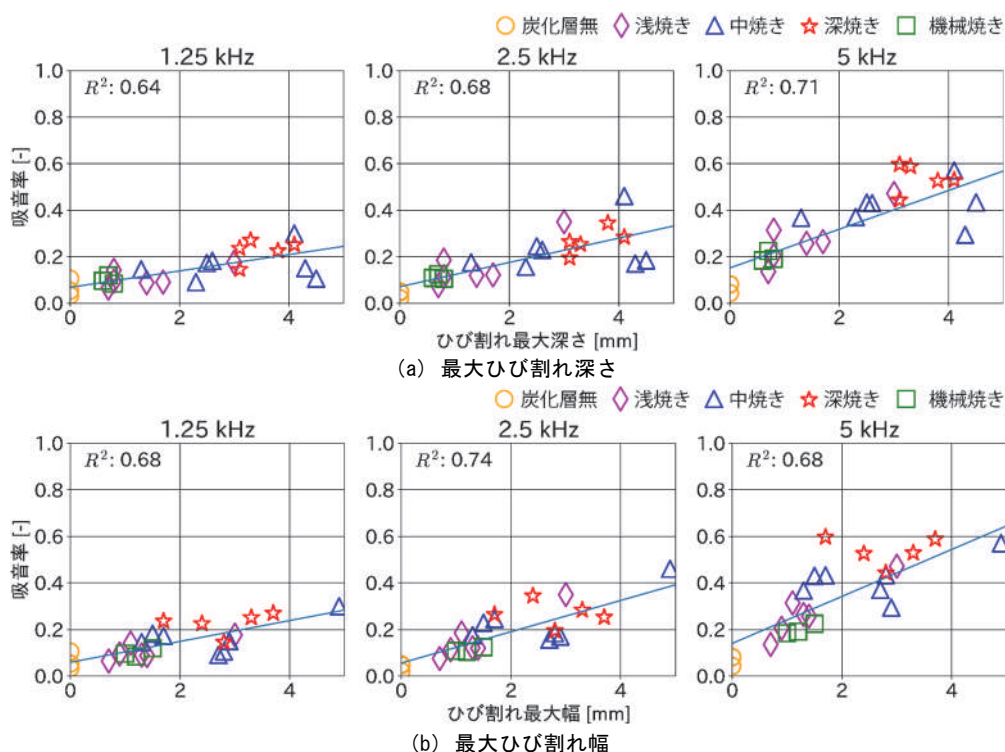


図4-3 ひび割れ最大深さ・最大幅と垂直入射吸音率の関係

5. 地域分布

5.1 2016年焼杉研究における地域分布調査の検証

2016年焼杉研究においては、全国の伝統的建造物群保存地区および西日本の街道沿いの宿場町を対象とし、Google ストリートビューから画像を収集し、それらにつき深層学習プログラムを用いて焼杉の使用事例の有無を把握した。具体的には、当該エリア内に焼杉の使用事例が2件以上ある地域・1件のみの地域・0件の地域の3つに分類した。

同調査では、深層学習プログラムの精度については検証したが、エリアの判定結果については検証を行っていなかった。そこで、3つの分類がすべて含まれる愛媛県松山から宇和島方面に伸びる大洲街道・宇和島街道・宿毛街道沿いの12の宿場町（松前～岩渕）を対象に、実地調査を行い焼杉の有無を確認した。

その結果は表5-1の通りである。2016年焼杉研究では焼杉使用事例0件と判定された3宿・1件と判定された2宿について、今回の実地調査によりいずれも2件以上の使用が確認された。

このように、2016年焼杉研究の調査手法・精度に若干の問題があることが示唆される結果となった。その原因として、Google ストリートビューによる画像収集が不十分であったこと^{注4)}、深層学習プログラムによる判定基準が厳しすぎたことなどが考えられる。

表5-1 愛媛県内12宿場での検証結果

宿場名	2016	2022	宿場名	2016	2022
松前	○	○	大洲	○	○
郡中	○	○	東多田	×	○
上灘	○	○	卯之町	△	○
中山	○	○	吉田	△	○
内子	×	○	宇和島	△	△
新谷	×	○	岩渕	○	○

○：2件以上 △：1件 ×：0件

5.2 東西境界画定のための調査（北国街道）

以上の検証結果を踏まえ、今回調査においては原点に立ち戻って焼杉の東西境界を確定することを目指し、実地調査を行うこととした。東西境界のうち、中山道および東海道についてはすでに調査を2016年焼杉研究にて実施済みである。同調査では中山道については滋賀県と岐阜県の県境、東海道については鈴鹿山脈が焼杉使用の明確な境界となっていることを確認した。そこで今回は、北国街道の米原から鯖江まで12宿を対象に、焼杉の使用実態について実地調査を行った。

各宿場は、住居の隣棟間隔がほぼなく隣り合っている町屋タイプと、隣棟間隔が空いている農家タイプに分けられる。各宿場のタイプと焼杉の使用例を整理したものが表5-2である。これをみると、福井県の今庄宿以北で

急激に焼杉の使用例が減少しているのが見て取れた。焼杉使用の減少傾向は町屋・農家いずれのタイプでも観察でき、また前面・側面に限らず使用事例が少なくなることから、焼杉の使用分布に影響を与えているのは地域であり今庄宿がその境界に当たると考えられる（写真5-1）。

表5-2 北国街道12宿場での実地調査結果

県	宿場	タイプ	数	使用例
滋賀	米原	町屋	多	主に側面（平入妻面）
滋賀	長浜	町屋	多	主に側面（平入妻面） 蔵の腰壁（黒漆喰の下部）
滋賀	木之本	町屋	多	主に側面（平入妻面・妻入平面） 塀・寺院内等でも使用
滋賀	柳ヶ瀬	農家	多	前面・側面ともに使用
滋賀	中河内	農家	多	前面・側面ともに使用
福井	今庄	町屋	多	主に側面（平入妻面） 前面・側面ともに使用例も
福井	湯尾	農家	2	前面（妻入妻面）・塀
福井	鯖波	農家	0	-
福井	脇本	農家	1	側面（平入妻面）
福井	武生	町屋	1	側面（平入妻面）
福井	上鯖江	農家	0	-
福井	鯖江	町屋	0	-



写真5-1 木之本宿（左）と今庄宿（右）の町屋

6. 結論

6.1 外装材としての評価

焼杉の耐水性能を既往報告⁵⁾で課題として挙げられた試験体作製方法および既往報告で提案した三層モデル（「炭化層」・「受熱層」・「健全層」）に着目し、撥水試験、吸湿試験、放湿試験、耐候試験、暴露試験を実施して耐水性能や変色に関する検証を行った。

撥水試験・吸湿試験・放湿試験の実験結果より、浮造りや表面切削はばらつきも少なく、本グループの既往研究⁵⁾と同様に、無垢材よりも撥水性が高くなった。高温処理された受熱層⁵⁾が撥水性の向上に寄与している可能性が示唆された。一方で、特に手焼きの焼杉表面の割れに影響された実験結果のばらつきが見られた。

耐候試験の結果より、焼杉の耐候性能は炭化層の厚みに大きく影響していると推察される。また、焼杉板の色味、光沢度の変化が少なかったことから、焼杉板の炭化層の、紫外線による外見的な劣化は軽微であることが確認された。

紫外線による変色については、炭化層のある焼杉は、紫外線などによる変色がほぼ生じないことを確認できた。

また黒い炭化層を削った受熱層のみの試験体は無垢材同様に紫外線など劣化因子の影響を受けていたことより、炭化層が変色の防止に寄与しているといえる。

実際に竣工後 17 年を経過したラムネ温泉を対象とした経年劣化の分析でも、湯気の当たる窓回りや物理的な損傷を受ける機会が多い出入口付近以外は問題なく炭化層が保持されていることが確認できた。

6.2 内装材としての評価

内装材、特に吸音材として焼杉を利用することを想定し、音響管を用いて垂直入射吸音特性に関する実験的検討を行った。

結果より焼杉の炭化層が多孔質吸音材としての性質を有することを確認し、炭化層の厚み、焼杉特有のひび割れなどの幾何的な特性が吸音性能に大きく影響することが示された。そして、製造時に燃焼時間を変えるなどして幾何的な特性を調整することで、吸音性能を調整できる可能性が示唆された。ただし、機械焼きの方が均一な試料を作成できる分、吸音性能のばらつきを低減できた。

焼杉を内装材として使う際には表面の劣化を防ぐため表面を塗装することが望ましいが、今回の結果から、塗装による吸音率の低下が確認された。ただし、今回塗装した機械焼き試料は炭化層厚が非常に薄く、塗装の影響を顕著に受けたと考えられる。そのため、炭化層が厚く試料表面の凹凸の大きい試料を用いることで、塗装をしてもある程度の吸音率を保持できる可能性がある。

6.3 地域分布調査の分析結果

2016 年焼杉研究における地域分布調査の結果を検証したところ精度に若干の問題があることがわかった。そこで焼杉の地域分布の東西境界を確定することを目的とし北国街道沿いの宿場町を対象とした実地調査を行うこととした。その結果、今庄宿が焼杉使用の境界に当たることが明らかになった。

ただし、今庄宿は福井県に立地しており、同宿の町屋の構造形式や立面構成は、滋賀県内の町屋のそれとは大きく異なる。つまり町屋の形式と焼杉の使用地域の境界にずれが発生している。このことから、町屋の形式の成立時期と焼杉の使用開始時期にはギャップがある可能性が示唆される。この点については、今後の調査で詳細に検討していきたい。

<謝辞>

サンプル作成のための杉板を提供いただいた阪口製材所の阪口様、機械焼きの焼杉板の提供および温度測定にご協力いただいた株式会社共栄木材の西下健治様、ウェザーメーター試験にご協力いただいた国立研究開発法人建築研究所交流研究員の田村昌隆様（ロックペイント㈱）に記して謝意を申し上げます。

<注>

- 1)当初赤身と源平（赤身と白身の混合）についても変数とすることを想定し材木店から木材を購入した。ところが、両者を明確に区分することが難しく、作成した試験体も大きな差異がみられないことから今回の変数からは除外することとした。
- 2)式差測定したのは、高さ1,500mm程度までの範囲のみである。式差は各立面の左端・中央・右端の経年劣化が少ない3点の平均値を基準とし式(7)と同じ計算式によって算出した。測定には色彩色差計(KONIKA MINOLTA CR-410)を用いた。
- 3)ただし、今回の対象外とした大浴場棟・家族湯棟の棟側面の湯気抜き付近の炭化層は大きく剥がれているのが確認できた。湿気が多い環境下では炭化層が剥がれやすい可能性がある。
- 4)焼杉板は町屋においては妻面に使用されることが多く、道路から撮影する Google ストリートビューではうまく撮影されないことが多い。また農家型住宅においては塀などによりそもそも外壁面が街路からは見えないケースも少なくない。

<参考文献>

- 1) 住田百合耶：島嶼部地域の木造住宅に使用されている地域性のある建築材料の普及の実態に関する研究 大三島上浦町盛地区の焼杉，日本建築学会東海支部研究報告集，No. 57, p557-560, 日本建築学会, 2019. 2
- 2) 住田百合耶：島嶼部地域の外壁に使用されている焼杉と地元大工の材料調達に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集（建築歴史・意匠），2019, p307-308 日本建築学会, 2019. 7
- 3) David Hans Ebner, Marius-Catalin Barbu, Josef Klaushofer, Petr Čermák: Surface Modification of Spruce and Fir Sawn-Timber by Charring in the Traditional Japanese Method-Yakisugi, Polymers 2021, 13(10), 1662.
- 4) Edgars Buksans, Laura Laiveniece, Valters Lubinskis, Valters Lubinskis: SOLID WOOD SURFACE MODIFICATION BY CHARRING AND ITS IMPACT ON REACTION TO FIRE PERFORMANCE, ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT, 2021, p899-905, 2021, 5
- 5) 岡村健太郎他：焼杉に関する研究—性能評価と普及に向けたフィジビリティスタディー，住総研 研究論文集・実践研究報告集 No. 44, 2017
- 6) 日本色彩学会：新編色彩科学ハンドブック第3版，東京大学出版会, 2011. 4
- 7) 片岡厚：木材の気象劣化と表面保護—気象劣化のメカニズム—, 木材保存, 43(2), p58-68, 2017

<研究協力者>

- | | |
|-------|------------------------------------|
| 阿部穂積 | 秋田県立大学システム科学技術学部建築環境システム学科建築材料科学講座 |
| 中嶋亮介 | 東京理科大学工学部建築学科（今本ゼミ） |
| 西岡空海 | 近畿大学建築学部建築学科（岡村ゼミ） |
| 越智萌々香 | 近畿大学建築学部建築学科（岡村ゼミ） |
| 田淵愛実 | 近畿大学建築学部建築学科（菅原ゼミ） |
| 林拓真 | 近畿大学建築学部建築学科（菅原ゼミ） |
| 村田悠輔 | 近畿大学建築学部建築学科（菅原ゼミ） |
| 森田侑作 | 近畿大学建築学部建築学科（菅原ゼミ） |
| 濱谷晃希 | 近畿大学建築学部建築学科（菅原ゼミ） |
| 堂口大輔 | 近畿大学経営学部キャリアマネジメント学科 |