

令和 7 年 6 月 23 日現在

機関番号：32201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2022～2024

課題番号：22K04433

研究課題名（和文）木材の組織構造を考慮した劣化予測モデルに関する研究

研究課題名（英文）Study on wood decay prediction model in consideration of the tissue structures

研究代表者

齋藤 宏昭（Saito, Hiroaki）

足利大学・工学部・教授

研究者番号：20597827

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000 円

研究成果の概要（和文）：一般に、木材木口面での結露・雨がかりは吸水速度が放射方向の10倍以上となるため腐朽に繋がるリスクが高く、木部の耐久性評価においてはその影響の考慮が不可欠である。しかし、生物材料である木材は毛細管力に影響する仮道管径が早材・晩材で異なるうえ、心材・辺材では壁孔の閉塞度合いが異なり、これらの特性が水分移動や腐朽進行に影響を及ぼすと考えられる。本研究では、木口吸水時の含水率分布の変化をX線CT画像により可視化し、心材・辺材、早材・晩材それぞれの水分拡散係数の定量化を試みた。また、得られた水分拡散係数を用い、雨がかりのある軒先を対象に、これら組織構造の違いによる水分蓄積への影響を試算した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

木材は生物材料であるため樹種による差異に加え、早材・晩材、心材・辺材といった異なる組織構造があり、生物劣化の要因となる材料内の水分挙動に組織構造が大きく影響するため、これらの定量化が予測精度向上のための課題となっていた。特に木口吸水は、短時間で多量の水分を蓄積する一方、早晩材や壁孔の開閉度合いで吸水量が異なるため、組織構造毎の移動物性の定量化が困難であった。本研究では、木口方向の吸水現象についてX線CT画像を解析することにより、組織構造別の水分拡散係数の定量化を試みることにより、漏水や結露等に起因した木口吸水による水分蓄積の予測と、劣化リスク解明への貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：End-grain exposure to liquid water from condensation or rain significantly increases water uptake in wood, thereby elevating the risk of biological decay. Accurate assessment of wood durability requires consideration of microstructural differences between sapwood and heartwood, as well as earlywood and latewood. Tracheid diameter, influencing capillary action, varies between earlywood and latewood, while pit aperture area differs between sapwood and heartwood. These anatomical features affect moisture transport and decay progression. In this study, X-ray computed tomography (CT) was used to visualize longitudinal moisture distribution during water absorption. Moisture diffusivity was quantified based on the CT data, considering microstructural differences. Using the moisture diffusivity, we simulated moisture accumulation in end-grain areas of eaves exposed to wind-driven rain to compare the influence of microstructure on wetting behavior and decay risk.

研究分野：建築環境工学

キーワード：木材 水分 組織構造 予測モデル 物性値

1. 研究開始当初の背景

本研究は、木造建築物における木材の耐久性、特に木口断面における水分の挙動と腐朽進行の関係を把握することで、腐朽予測モデルの精度向上を目指すものである。申請者はこれまでに、建物の外皮構成や気象条件に応じた木材の長期的な劣化を予測するため、熱水分解析に基づく数値モデルを開発してきた¹⁾。この過程で、柱材の断面全体としての平均的な腐朽度は予測可能であるものの、同一断面内で顕著なバラツキが存在することが X 線 CT 画像から示唆され、その原因解明が課題となっていた²⁾。特に、含水率の高低と腐朽度には有意な相関があり、木材の成長過程で生じる放射方向の細孔構造の違いが、水分の移動特性を変化させ、局所的な腐朽の進行に影響している可能性がある。このような微細構造に起因する物理的要因に注目することで、単なる心材・辺材の区別を超えた、より精緻な耐久性評価が可能になると考えられる。

研究の着想は、柱脚材を対象とした過去の腐朽実験において、木口断面における腐朽のバラツキを詳細に観察する中で得られたものである。この実験では晩材率や密度と腐朽度の相関が確認されており、腐朽菌による分解は自由水の存在を前提とするため、微細構造によって液水の移動や保持に差が生じることが、初期腐朽の進行を左右する重要な要因であると推定された。従来、耐腐朽性は樹種や抽出成分の違いを主軸として論じられてきたが、材内部における物理的構造と移動現象に基づく定量的研究は極めて限られている。近年は非破壊測定技術の進展により、X 線 CT 画像を用いた腐朽の空間分布や繊維方向の含水率分布に関する研究が報告されているものの、早材・晩材や仮道管構造に着目した腐朽との関係性に関する研究は少なく、本研究はこの分野に新たな知見をもたらすことが期待される。

2. 研究の目的

本研究の最終的な目標は、木材の微細構造での水分移動特性と腐朽現象の関係を解明することによって、環境条件から建築木部の劣化プロセスを予測・評価する数理モデルの精緻化である。背景で述べたように、これまでの検討で木口方向の腐朽進行については木材の局所的な水分移動物性値の違いが、腐朽度のバラつきに影響した可能性がある。そこで本研究では木材組織構造に着目し、早晚材や心辺材等の繊維方向に対する吸水性状や水蒸気及び液水の移動物性の差異を、定量的予測が可能な数理モデルに反映するための検討を行う。また、これら木材組織構造による物性値の違いが、雨がかりのある建築用材として用いた際に、年間を通じてどのような含水率のプロファイルとなるか、シミュレーションにより検討し、その影響について把握する。

3. 研究の方法

3.1 試料

試料は心辺材を含む迫まさのアカマツ材で、柱脚部を想定し木口断面の一边を 105mm とした材を四分割したものである（52.5mm×52.5mm）。後述する水蒸気の移動特性である透湿試験では高さ 20mm、吸水試験では高さ h60mm とした。また、仮道管への木材腐朽菌の菌糸侵入の影響把握を目的とし、健全な試料（以降、健全材）の測定後に *Fomitopsis palustris*（オオウズラタケ）を試料木口底面に接種し、再度上記の実験を行うための処理をした。菌糸の接種・培養は、実験後の試料をガンマ線滅菌し、樹脂シャーレで培養した菌叢に樹脂メッシュを隔て、試料木口底面と培地が直接触れない状態で約 3 週間インキュベータ内に静置し行った。

3.2 透湿試験

透湿試験は、JIS A 1324（建築材料の透湿性測定方法、カップ法）により測定した。試料は飽和塩水溶液で相対湿度を調整したシャーレの蓋を切り取り、側面を含めアルミテープで封ろうした。透湿試験の温湿度条件は 20℃、高湿側 93%RH、低湿側 75%RH であり、健全材、腐朽菌暴露後、腐朽菌暴露・滅菌後で行い、その影響を分析した。

3.3 吸水試験

吸水実験は、両木口面以外をエポキシ樹脂でシールした試料の木口面を図 1 に示すように水を張ったステンレスバットに約 2mm 浸水させ、一定時間ごとの重量変化を測定し、引き続き試料内部の含水分布を得るための CT 画像を撮影した。CT 画像は、ニコンインテック製 X 線 CT 三次元測定機 MCT225 を使用し、試料底面を水分が漏れないようラップを巻き、含水率算出のため密度既知の標準物質も同時に撮影した。画像解析は、日本ビジュアルサイエンス社製の ExFact VR を使用した。CT 値は、ほぼ密度と比例することから、図 2 に示すような空隙、早材、晩材に加え、含水した早晚材の 5 種類の属性を設定し可視化した。

吸水試験及び CT 画像の撮影は表 1 に示す条件で行った。Phase1 は初年度の実験で、心辺材の含水率分布を把握する目的で、複数の試料を X 線 CT 三次元測定機に同時に設置し撮影した。Phase2 では、早材・晩材の水分移動物性を同定する目的から、解像度を高め詳細なデータを得るため試料 1 体ずつ撮影したため、ボクセルサイズが異なっている。また、CT 画像の解析は辺材を含んでいる試料 C について行い、図 3 に示す領域の輝度値を標準物質の検量線から換算することで含水率を求めた。



図1 吸水試験状況

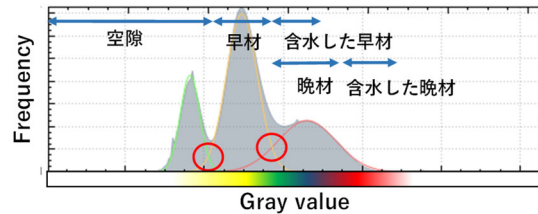


図2 試料内部の輝度値と属性の設定

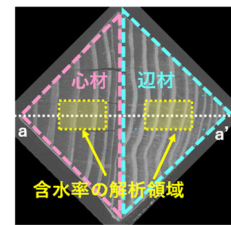


図3 CT画像の解析領域

表1 吸水実験におけるCT画像撮影条件

Phase	試料記号	試料の状態	ボクセルサイズ	含水状態	備考
Phase1	C2	健全材	100 μ m	気乾	—
		腐朽菌暴露後		湿潤	菌糸暴露3週間後
Phase2	C4	健全材	30 μ m	絶乾	—
	C2	腐朽菌暴露滅菌後		絶乾	滅菌乾燥後

4. 研究成果

4.1 透湿性に対する菌糸侵入の影響

菌糸侵入前後における試料ごとの透湿係数の測定結果を図4に示す。健全材は腐朽菌接種前で、腐朽菌の菌糸は仮道管内に存在しない状態である。腐朽菌暴露後は、腐朽処理直後のため試料含水率は比較的高い一方、腐朽菌暴露滅菌後は試料を60℃のインキュベータ内で72時間乾燥後に測定したため絶乾状態である。

健全材では、髓に近い心材である試料Aは透湿係数が低く、辺材部分が多い試料Cは透湿係数が高くなる傾向にあった。心材外周部である試料B、B'は、試料A、Cの中間のような値になっている。試料Cは辺材割合が高いため、心材化による仮道管の閉塞箇所が少ないことが、透湿性の差の理由と考えられる。

図4左で木材腐朽菌の暴露前後を比較すると、暴露後の透湿係数が高く、髓に近い心材の試料Aは、健全材に比べ約2倍以上の増加割合（右軸）を示している。試料B、B'、Cも試料Aと同様に増加傾向にあり、全ての試料で健全材の1.5倍を超えている。図4右は乾燥滅菌後に測定した結果であるが、透湿係数は滅菌前に比べさらに上昇し、健全材の3～5倍程度の透湿性を示している。健全材に比べ菌糸が接種された試料（図4左、滅菌前）の透湿性が増大した理由については、a)菌糸の水分搬送（滅菌前）、b)接種時の試料含水率上昇による透湿性の湿度依存性、c)腐朽菌による仮道管内の壁孔破壊、等が推測される。ここで図4右の滅菌後との違いに着目すると、滅菌前に心辺材の試料間で顕著だった透湿係数の差が滅菌後は縮小しており（例えば試料AとC）、心材部分の試料Aでは菌糸侵入と乾燥収縮により壁孔が破壊され、辺材である試料Cと同等の透湿性になったと推測される。

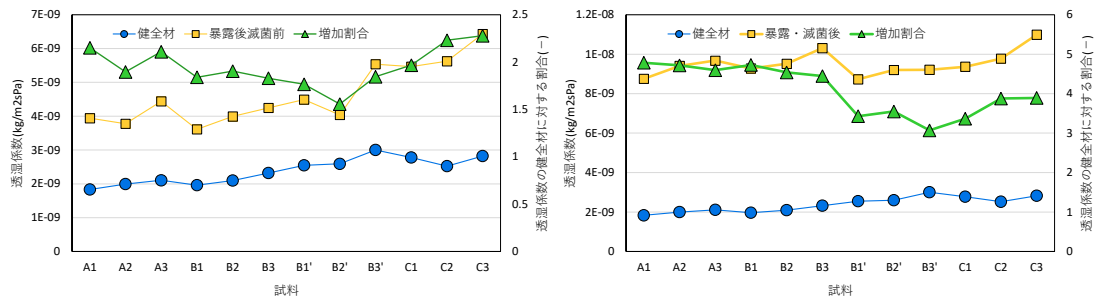


図4 透湿係数及び健全材に対する増加割合（左：腐朽菌暴露後、右：腐朽菌暴露滅菌後）

4.2 吸水性状に対する木材組織構造の影響（Phase1）

吸水試験時の輝度値を図2の属性により再構築した垂直断面を図5に示す。図5はa-a'の切断位置（図3参照）の画像で、左半分は心材、右半分は辺材に該当する。輝度値は密度に比例するため、初期状態の晩材部分は緑～青、早材部分は薄黄であるが、含水率の上昇に伴い晩材は青～赤、早材は黄～緑～青に変化する。図6は繊維方向の含水率分布で、試料及び標準物質の実測密度と輝度値の関係から検量線を作成し、辺材及び心材の領域別（図3参照）と試料全体の値を算出した。

1) 健全材における木口吸水

吸水実験開始後、辺材である図5の赤線部分①では時間の経過とともに晩材が青から赤に、隣接する早材部分も黄色に変化しているが、心材側の色の変化は僅かであった。3.5hの心材と辺材含水率を図6で比較すると、健全材3mmの位置では心材が30%に対し、辺材は50%を超えており顕著な差があった。心材は心材化に伴い壁孔が閉塞するため、含水率上昇が抑制されたと考

えられる。辺材における早晚材の吸水高さに着目すると、晩材部は赤線部分①まで、早材部分は緑線部分②までであり、大きく異なっていた。晩材仮道管の放射方向の内径は早材の1割程度であり、毛管力による上昇効果が表れていた。早材部分の含水率の上昇は、晩材で吸い上げられた水分が放射組織や仮道管接線壁にある有縁壁孔から放射方向に拡散し生じたと推測される。

2) 腐朽菌暴露後における木口吸水

腐朽菌暴露後も、健全材と同様に辺材における含水率の上昇は顕著であった(図5右)。しかし、吸水高さには大きな差が認められ、健全材(緑線部分②)は3.5hでも吸水面近傍しか高含水になっていないが、菌暴露後は高含水の領域が②の3倍近い高さ(白線部分④)に達していた。図6の含水率分布(3.5h)では、試料全体3mmの位置で比較すると健全材が50%に対し、菌暴露後は100%を超えていた。また、図5青線部分③の辺材部早材は上下で色の違いがあった。辺材部分(3.5h)の高さ9mmと39mmの位置における含水率の差を求めると、健全材13%、菌暴露後30%と差異が顕著であった。これは試料下部では、腐朽菌により有縁壁孔と細胞壁が破壊され、晩材部から放射方向への拡散が促進されたことが理由と考えられる。特に早材は内腔径が大きく菌糸侵入の影響を強く受けたと推測される。心材では菌暴露後も顕著な変化が認められず、抽出成分の影響などにより腐朽が抑制された結果が吸水率に影響したものと思われる。

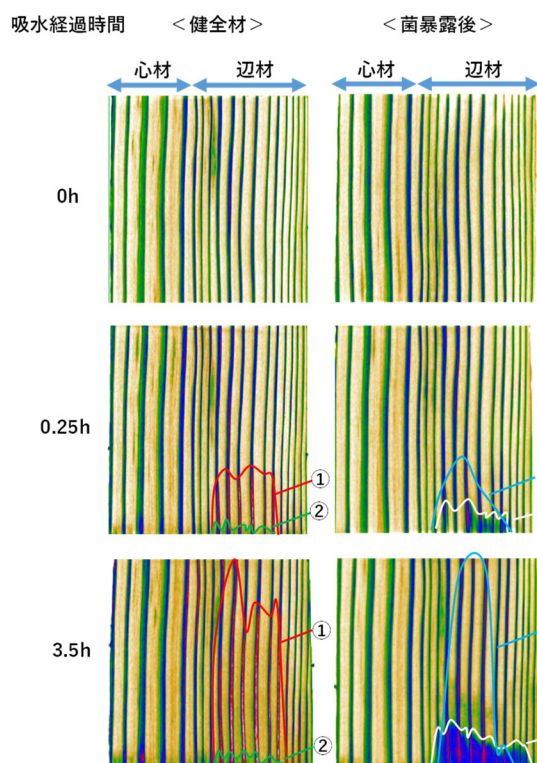


図5 再構築した垂直断面

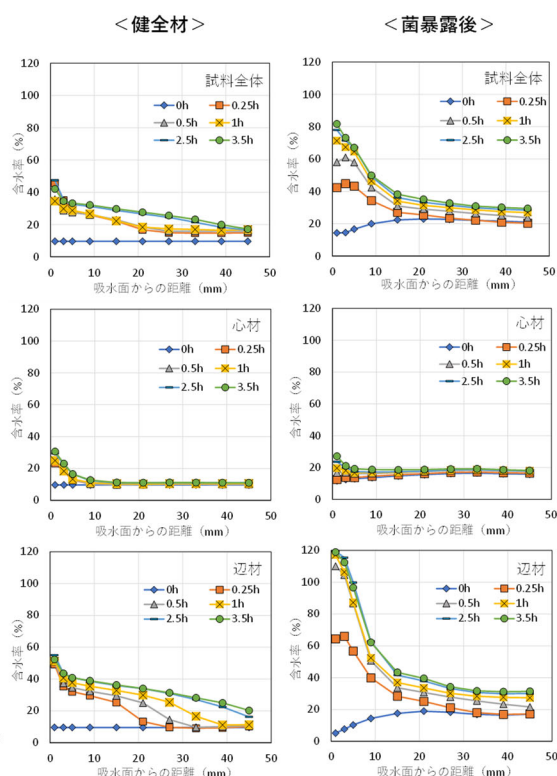


図6 輝度値より算出した吸水時の含水率分布

4.3 水分拡散係数に対する木材組織構造による差異(Phase2)

心辺材に加え、早晚材の違いによる液水移動解析に必要な水分拡散係数を求めるため、Phase2の実験では線源と試料の距離を近づけることで解像度を上げた輝度分布を取得し解析した(表1参照)。対象試料は、健全材は新たに準備した心辺材を含むC4で、腐朽材は既に撮影したC2の試料について再度吸水試験とCT画像の撮影を行った。

水分拡散係数は、繊維方向の含水率分布に対し、Carmelieらが提案した吸水試験時の含水率分布から同定するボルツマン法³⁾を用いた。図7に腐朽材と健全材のそれぞれの水分拡散係数、図8に各試料・各部位の水分拡散係数の平均を示す。凡例の「全体」は高さ毎の材平均含水率から試算した結果である。既往文献⁴⁾(Pineの繊維方向)は $2.0 \times 10^{-10} \sim 2.0 \times 10^{-9}$ (m²/s)程度であり、今回解析した全体や早材の値に近い。しかし、晩材の値はこれらの10倍を超え、既往の放射方向の結果(2.0×10^{-11})と比べると顕著に大きく、解析結果に大きく影響を及ぼすと予想される。一方、腐朽材では心材部分の水分拡散係数は低いものの、「全体」が 3.1×10^{-7} (m²/s)と最も高く、辺材晩材部を越えていた。この理由は腐朽材の含水率分布(図6)で述べたように、腐朽材では細胞壁の破壊により晩材から早材への放射方向の水分移動が顕著となったため、ボルツマン法的前提条件である1次元拡散が成立せず、矛盾した結果になったものと思われる。

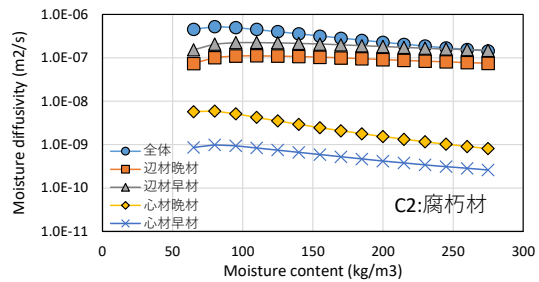
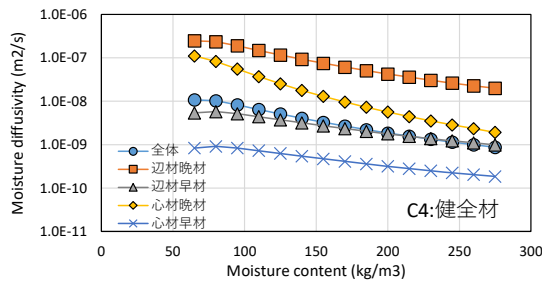


図7 健全材 C4 (左) と腐朽材 C2 (右) との水分拡散係数

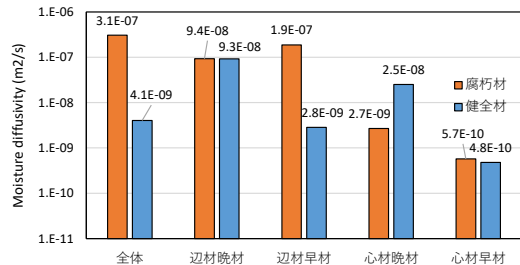


図8 各試料・各部位の水分拡散係数の平均

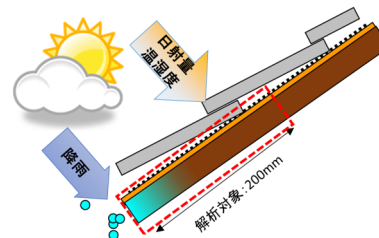


図9 軒先の計算対象

4.4 組織構造の違いによる水分蓄積への影響

早晩材の水分拡散係数の違いによる含水率変動への影響を把握するため、屋根の軒先(健全材)を想定したシミュレーション計算を行った(図9)。計算は1次元の熱水分同時移動方程式を用いた、水分伝導率は、前節で同定された水分拡散係数から換算された値を与えた。水分拡散係数は図7の健全材の値を用い、水分移動は繊維方向のみ、計算期間は1/1から1年間で銚子のアメダス気象データを使用した。

図10に7/1~12/31の含水率変動の解析結果を示す。凡例は軒先からの距離で、早材は実線、晩材は破線で示す。晩材の表面付近(20mm)では降雨に伴い心材、辺材ともに含水率が上昇しているが、早材部の上昇は緩慢である。一方、晩材内部の180mmでは差異が顕著で、心材の最大値が25%に対し辺材では60%に達しており、腐朽可能な繊維飽和点以上の領域や出現頻度が大きく異なる。この結果は、心材の耐腐朽性を説明できており、腐朽モデルの精緻化に対し、組織構造の考慮が重要であることを示唆している。

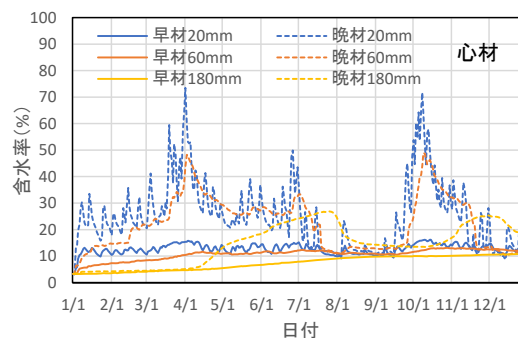
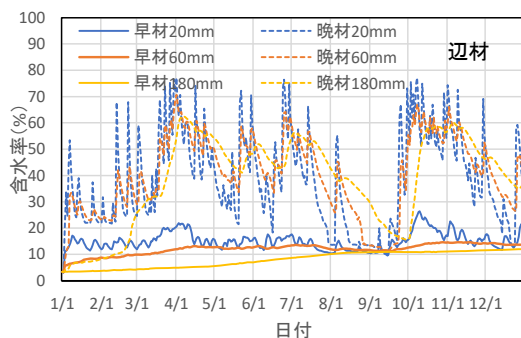


図10 軒先含水率の解析結果(左: 辺材、右: 心材)

<参考文献>

- 1) 齋藤宏昭、他：水分収支を考慮した木造外皮の耐久性評価のための木材腐朽予測モデル、日本建築学会環境系論文集、No.630、pp.971-978、2008年8月
- 2) ZHU HAO: X線CTを用いた柱材の腐朽プロセスに関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学、pp.609-610、2021年9月
- 3) J. Carmeliet, et.al.: Determination of the Liquid Water Diffusivity from Transient Moisture Transfer Experiments, Journal of THERMAL Env. & BLDG. SCI., Vol.27, No.4, pp.277-304, 2004.4
- 4) M. Kumar KUMARAN: Final Report, Volume 3, "Material Properties", International Energy Agency Annex 24 Report, Published by K. U. -Leuven Belgium, 1996

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1 . 発表者名 瀬戸 琴葉、齋藤 宏昭、森 拓郎、小椋 大輔、堀 沢 栄、土居 修一、中嶋 麻起子
2 . 発表標題 CT値ヒストグラムに基づく腐朽前後の木口吸水性状
3 . 学会等名 第74回 日本木材学会大会
4 . 発表年 2024年

1 . 発表者名 Hiroaki Saito, Makiko Nakajima, Daisuke Ogura, Takuro Mori, Sakae Horisawa
2 . 発表標題 Impact of microstructure and mycelium proliferation on water uptake and moisture transfer along the longitudinal direction of wood
3 . 学会等名 International Buildings Physics Conference 2024
4 . 発表年 2024年

1 . 発表者名 齋藤宏昭
2 . 発表標題 CT値ヒストグラムに基づく柱材を対象とした腐朽進行の可視化
3 . 学会等名 第73回 日本木材学会大会
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 齋藤 宏昭、森 拓郎、小椋 大輔、中嶋 麻起子
2 . 発表標題 木口吸水における木材組織構造の影響 - CT値ヒストグラムに基づく水分拡散係数の同定 -
3 . 学会等名 2025年 日本建築学会大会（九州）
4 . 発表年 2025年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	森 拓郎 (Mori Takuro) (00335225)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・教授 (15401)	
研究 分担者	堀澤 栄 (Horisawa Sakae) (20368856)	高知工科大学・理工学群・教授 (26402)	
研究 分担者	中嶋 麻起子 (Nakajima Makiko) (40773221)	広島工業大学・工学部・講師 (35403)	
研究 分担者	小椋 大輔 (Ogura Daisuke) (60283868)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------