

## 〔資料〕 湿度制御した温風処理による木造建造物加害甲虫類の殺虫（2） —殺虫効果の確認と建造物への影響の検討—

藤原 裕子\*・原田 正彦\*\*・北原 博幸\*\*\*・佐藤 嘉則・島田 潤・  
木川 りか\*\*\*\*・日高 真吾\*\*\*\*\*・藤井 義久\*

### 1. はじめに

湿度制御した温風処理は木材内を加害している主に甲虫類を殺滅する手法である。処理では対象物を断熱・気密性の高い空間に置き、その中の温度を徐々に60℃程度まで昇温させて一定期間保持した後徐々に降温させる。60℃で保持されている間に、成虫、蛹、幼虫や卵のすべての態の加害昆虫が死滅する。処理の昇温期には空間内を加湿して木材が過乾燥状態になるのを防ぎ、降温期には除湿して結露を防ぐことで、処理対象物を毀損することなく木材加害昆虫を駆除できる。欧州などでは既に、美術工芸品や家具<sup>1-3)</sup>、建造物<sup>4)</sup>における虫害対策に利用しているが、わが国では実用化を目指した研究による2例の処理<sup>5-8)</sup>以外、実施事例はない。

本報告の第1報では、先の2例の処理で明らかになった課題を踏まえて装置や制御方法を改良し、3例目となる検証処理を行い、本処理装置における温湿度制御性能を明らかにした他、今回の処理において、原理およびスケジュール通りの制御が行えたことを示した。本報では同時に行った殺虫効果や建造物の棄損につながると考えられる処理中の木材の伸縮、処理前後の含水率変化や彩色板の色の変化等について検討した結果を報告する。各検討項目の目的は、それぞれの実験方法の冒頭に述べる。

### 2. 検討目的と実験方法

#### 2-1. 殺虫効果および木材腐朽菌の殺菌効果

今回の処理の対象建造物（以下、一間社：建物詳細は第1報に記載）に甲虫害は認められないが、今回の処理スケジュールによる温湿度制御でも木材内部に生存する甲虫が駆除されていることを確認するのは重要である。そこで既報<sup>7,8)</sup>に従い、アフリカヒラタキクイムシ (*Lyctus africanus*) に産卵させ幼虫と卵が入った植卵人工飼料3つを処理に供した。人工飼料の設置方法は既報に従うが、各飼料に対して準備した3体の300 mm 角ケヤキ材のうち2体の穿孔内には材内温度を測定するための熱電対を入れた。熱電対の信号はデータロガー（UCAM-550A, 共和電業）で10分毎に取込み、PC上の専用ソフトウェア（DCS-100A, 共和電業）で記録した。また、この2体は人工飼料以外の穿孔内空間にケヤキ材鋸屑を詰め、他の1体は既報と同様ケヤキ材丸棒を入れた。処理後、植卵人工飼料を回収し虫の生死状態を確認した。虫の生死状態は、既報<sup>7,8)</sup>に準じた経過観察による成長段階の観察と、新たに呼吸による二酸化炭素濃度の変化（呼吸速度）の2つによって判定した。呼吸速度の測定では、植卵人工飼料を入れた密閉容器内の二酸化炭素濃度の変化を赤外線非分散単光線二波長比較方式の二酸化炭素濃度計（GM70（吸引ポンプ, GM70PUMP）, VAISALA）を用いて吸引式で計測した。データの記録間隔は30秒

\*京都大学, \*\*日光社寺文化財保存会, \*\*\*トータルシステム研究所, \*\*\*\*九州国立博物館,  
\*\*\*\*\*国立民族学博物館

毎、計測時間は1時間とした。計測は処理前と処理後の2回行った。

木造建造物の生物劣化は虫害の他に木材腐朽菌による腐朽が問題となる。今回の処理において、簡易的な方法ではあるが、木材腐朽菌の活性が著しく低下するあるいは殺菌効果があるかどうかを調べた。野外に設置した木杭から採取した子実体（種不明）および菌糸（種不明）をPDA培地（ぺたんチェック®DD, PD寒天培地（CP加）、栄研化学）で培養し、生育した菌糸を分離培養した。分離培養後の菌糸を顕微鏡（VW-6000（レンズVH-Z150）、キーエンス）で観察し、木材腐朽菌に特有のクランプコネクションがあることを確認した。これらの菌糸をさらに別の複数のPDA培地で分離培養して増やし、生育状況の良い20個の培地を冷蔵庫で保管した。処理前養生期間中の2022年8月20日に10個の培地の菌糸を処理に供した。3つのPDA培地は蓋をしたままの状態、7つの培地は各培地を滅菌したピンセットで4等分して、そのうちの2つを異なるガラスシャーレに移し、合計14個の試験用シャーレを準備した。14個のうち8つは蓋をしない状態、6つは蓋をしてからパラフィルムで密封した状態とした。これら17個の培地とシャーレはトレイに載せ、覆い屋内の建物の縁の上に置き、処理過程の降温がほぼ終了した2022年9月1日15時頃に回収した。処理中にコンタミネーションのなかった11個のシャーレについて、菌糸を新しいPDA培地に置いて蓋をし、ラップで包んだ状態で覆い屋内（約33℃）に戻し、2日後の2022年9月3日の15時頃（覆い屋内は約25℃）に再度回収して菌の生育の有無を目視で確認した。その後、再度ラップで包んで冷蔵保存し、2022年10月13～18日の5日間、菌の生育に適した27℃のインキュベーター内に置いた後、菌糸の伸長の有無を顕微鏡で確認した。

## 2-2. 建物部材のひずみと含水率

木材は周囲の温湿度によって寸法が変化するため、木造建造物の部材は絶えずわずかな伸縮を繰り返している。例えば、今回の処理対象である一間社が置かれた日光山内の木造建造物において建物部材をひずみゲージで測定した結果（未発表）では、木材の繊維直交方向（以下、測定箇所が板目の場合はT、桁目はR、追桁はRT方向と記す）の場合、年間を通じて6000 $\mu\text{E}$ 程度のひずみ変化が記録されている。処理中のひずみが年間のひずみ変化の範囲を大きく超えると、建物に棄損が生じる恐れがある。そこで、部材表面のひずみを処理前から処理後にわたって連続的に記録し、ひずみの季節変動と処理による変動を調べた。測定箇所は、床下空間の丸柱4本、外周の縁板を支える水平部材、縁板の合計10か所とした。図1は測定箇所の例である。床下空間の丸柱については各柱でT方向に1か所、1本の柱ではさらに繊維方向（以下、L方向）に1か所の合計5か所、外周の縁板を支える水平部材についてはT方向に1か所、L方向に2か所の合計3か所、縁板についてはT方向とL方向に各1か所の合計2か所にひずみゲージ（KFGS-5-350-C1-11、共和電業）を瞬間接着剤（CC-35、共和電業）で貼付した。部材はヒノキで、測定箇所はすべて木地面とした。各ゲージはターミナルを介してリード線と接続し、ゲージからの信号はリード線からブリッジボックスを介してデジタルストレインレコーダ（RMH-310A、共和電業）に取り込んだ。測定間隔は1時間毎とした。ゲージは2022年5月6日に取り付け、5月7日から連続計測を始め、最終データ取得は2022年10月13日であるが、計測は2022年12月2日現在継続中である。また、建物内および近傍の温湿度環境についても温湿度データロガー（RTR-53、TandD）で連続的に記録した。ロガーは小屋裏・陣内・床下・虹梁の上（外気）の4か所に設置し、1時間毎に温湿度を記録した。測定は2022年5月6日に開始し2022年12月2日現在も継続中である。

含水率計測について述べる。木造建造物部材の含水率は部材が建物内で配置されている場所

によって異なり，一般的には床下部材の含水率の方がより上方の小屋裏等よりも高い。また，同一部材でも測定位置によって値が異なる場合もある。湿度制御温風処理では建物の様々な部材の含水率測定値からそれらの平均値を求め，その平均含水率が変化しないよう覆い屋内の温湿度を制御するため，部材によっては処理中にわずかながら吸放湿し，含水率が変化すると考えられる。そこで，建物の陣内柱6本で計18か所，縁より下の外周丸柱4本と柱同士をつなぐ水平部材6本について計18か所，床下空間内の丸柱4本と柱同士をつなぐ水平部材11本について計23か所の合計59か所について含水率を測定した。測定箇所は，柱が高さ方向の異なる3か所，水平部材については長さ方向中央の1か所とした。測定日は2022年6月17日，処理前の8月17日，処理後の9月6日と10月13日とした。測定には高周波式含水率計（HM-520，ケツト科学研究所）を用いた。測定箇所はヒノキ材であったので比重設定はヒノキ（設定値0.37）とし，いずれの部材も測定方向の厚みが90 mm以上あったので測定深さの設定は40 mm（設定可能な最大値）とした。ここで，一間社に用いられているヒノキ材は比較的目の詰まった良材であり，全乾密度は0.37よりも大きく0.4から0.45程度であると考えられる。その場合，実際の含水率は今回測定した含水率よりも2～3%程度低い値となる。

### 2-3. 試験体のひずみ

木造文化財建造物には，修理工事の際に新たに追加された比較的新しい後補材から建築当初の非常に古い材まで，年代の異なる木材が入り混じって使われている他，建物によっては表面に漆塗りや彩色仕上げを施した部材がある。このような様々な木材が処理によってどのような伸縮挙動を示すのかを把握しておくことは重要である。ここでは，年代や表面状態の異なる10体の木材試験体について処理中の表面のひずみを測定した。試験体の寸法や表面仕上げ等の詳細を表1に示す。測定装置の都合上，試験体 A から F には350 Ω ひずみゲージ（KFGS-5-350-C1-11，共和電業），G から I は120 Ω ひずみゲージ（KFGS-5-120-C1-11，共和電業），を用いた。各試験体におけるゲージ貼付面と枚数（表1）について，試験体 A から F は1つの漆仕上げ面につき2枚（LとT方向，またはLとR方向），GとHは1面だけにLとT方向の

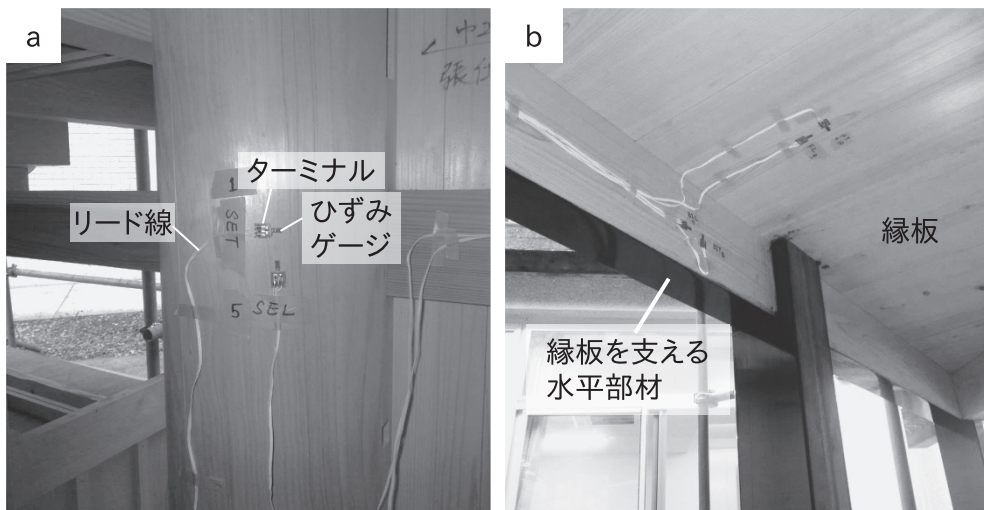


図1 建物部材のひずみ測定箇所の例

a. 床下丸柱， b. 縁板および縁板下の水平部材

表1 ひずみ測定に用いた試験体

識別記号	樹種	寸法 (mm)	表面仕上	ゲージ貼付方向*	備考	
A	ケヤキ	150×150×150	1面漆塗	T, L	室内・柱 漆膜厚約0.5 mm	・明治期には部材として使われていた ・昭和36年修理時に漆塗 ・2009年の日光山内の文化財建造物修理工事の際に廃棄された部材から作成
B	針葉樹				室内・貫 同 約0.3 mm	
C				R, L	屋外・貫 同 約0.2 mm	
D			室内・貫 同 約0.4 mm			
E			2面漆塗	T, L, R, L	室内・貫 同 約0.3 mm	
F				T, L, R, L	室内・貫 同 約0.4 mm	
G	ケヤキ	300×300×300	木地	T, L	・2008年頃に試料作製 ・湿度制御温風処理の履歴あり ・識別記号 H の漆膜厚：約1.1 mm	
H			6面漆塗			
I	ケヤキ	78×78×152(L)	木地	T	日光山内の文化財建造物で2022年中の修理に使用された材の端材	
J	ヒノキ			RT		

\*L：木材繊維方向，T：板目面の繊維直交方向，R：柁目面の繊維直交方向，RT：追柁面の繊維直交方向

2枚，IとJは1面だけにTまたはRT方向1枚を瞬間接着剤で貼付した。各ゲージはターミナルを介してリード線と接続した。ゲージからの信号はリード線からデータロガー（UCAM-550A，共和電業）で10分毎に取込み，PC上の専用ソフトウェア（DCS-100A，共和電業）で記録した。処理の際，試験体AからFは漆塗り面のみが温湿度の影響を受けるようにするため，他の面はアルミテープで覆い，さらにA種押出法ポリスチレンフォーム保温板（スタイロフォーム<sup>TM</sup>IB，デュポン・スタイロ株式会社）で厚さ40または50 mm（木口面は80または100 mm）の断熱層を設け，スタイロフォームと試験体との隙間は発泡ウレタンフォームで充填した（図2）。また，試験体GとHは，厚さ50 mmのスタイロフォーム<sup>TM</sup>IBで両木口面を断熱した。

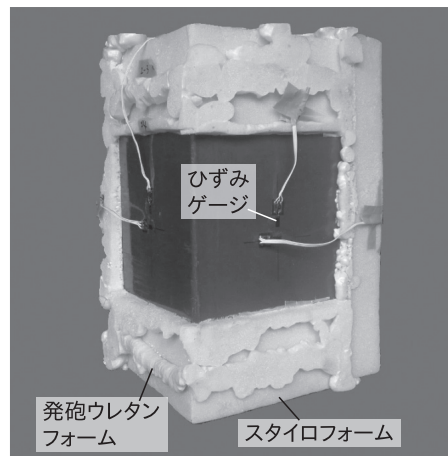


図2 断熱後のひずみ測定用試験体（試験体E\*）

\*試験体の識別記号は表1を参照。

#### 2-4. 試験体の重量変化

湿度制御温風処理では建物の様々な部材の平均的な含水率が変化しないよう覆い室内の温湿度を制御するため，部材によっては処理中にわずかながら含水率が変化すると考えられるが，それを直接測定するのは難しい。そこで，含水率と関係する材の水分量が処理中にどの程度変化するかを調べるため，2-3のひずみ計測に使用した試験体IとJについて処理期間中の



重量変化を測定した。測定には、汎用のアルミプレートとひずみゲージを使った懸垂式の簡易重量計を作製して用いた。プレート(図3a, 寸法15×150×2 mm)の片側に固定用の穴(φ6 mm), その逆側に試料懸垂用の穴(φ2 mm)をあけ, 固定用穴の中心から30 mmの位置がひずみゲージ(KFGS-5-120-C1-23, 共和電業)のゲージ長の中央となるようゲージを瞬間接着剤で貼付した。プレートはゲージ面が上側となるよう固定用枠にボルトで取り付け(図3b)。試料の懸垂前に, ひずみの値から懸垂物重量への換算式を求める校正実験を各プレートで行った。校正実験では家庭用電子天秤(KS-805(最大計量3 kg, 最小表示1 g, 精度±2 g), dretec)で500 gに調整した3個の重りを1つずつ順に1.5 kgまで吊り下げてゆき, 重量とひずみの値を記録した。除荷時にもひずみの値を記録し, 負荷時と同じになることを確認した。また, 重量測定用プレート近傍には温度によるプレート自体の伸縮を補正するためのプレートを設置し, 両者の差分を試料の重量変化量とした。処理前後に高周波式含水率計(HM-520, ケット科学研究所)で含水率を測定した。その際, 試験体Iのケヤキ材は比重の設定を0.59, Jのヒノキ材はヒノキ(比重0.37)とし, 測定深さの設定は40 mmとした。

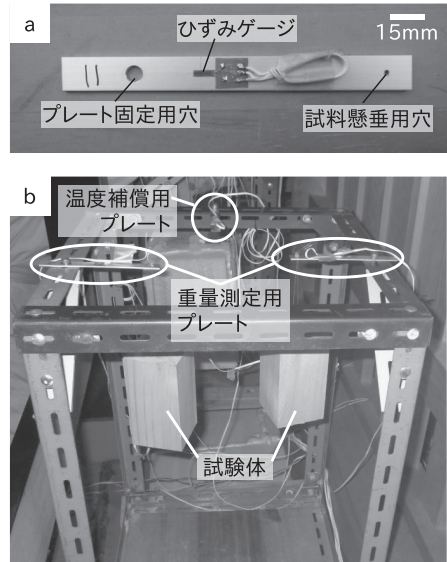


図3 重量測定用アルミプレート(a)とプレート固定台(b)

## 2-5. 彩色手板の色計測および割れの観察

湿度制御温風処理では, 建物部材が通常の気候では経験しない高温にさらされる。それによって彩色がどのような影響を受けるのかを, 色と割れに着目して観察した。色に関しては生彩色および桐油彩色で仕上げた2種類の彩色手板(図4a, b)を用いた。生彩色については赤色系, 桐油彩色については青色系, 緑色系の計3種類の色の各3か所を色差計(RM200QC, X-rite)で測定した。測定スポット径は4 mmとして処理前後ではほぼ同じ位置を測定し,  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$ ,  $h^\circ$ の値を記録した。得られた測定値は色ごとに平均値を求めた。割れについては, 置上彩色を施した手板(図4c)で既に生じているクラック5か所をCCD顕微鏡(VW-6000(レンズVH-Z25), キーエンス)で処理前後に撮影し, クラックの幅や長さの変化の有無を確認した。

## 3. 結果

### 3-1. 殺虫効果および木材腐朽菌の殺菌効果

植卵人工飼料を封入したケヤキ材の中心温度は59℃以上の状態が約2日半継続し, 殺虫に必要な温度が十分に長い期間保持されていた。図5に3つの植卵人工飼料の処理前後の二酸化炭素濃度を示す。処理前はすべての植卵人工飼料で有意な二酸化炭素濃度の増加が認められたが, 処理後はいずれも二酸化炭素濃度の有意な増加は認められなかった。また, 処理後の植卵人工飼料を飼育し成虫の羽化状況を経過観察した結果, すべての試料で53日経過時点(10月24日時点)でも成虫は確認されなかった。

図6は処理前後の腐朽試験体と処理後培養した試験体の1例である。処理中にコンタミネーションのなかった11個の各シャーレの菌糸について処理後に新たな培地で培養したところ, 生

育に十分な約33から25℃下に2日間おいても目視では菌糸の生長が認められなかった。さらに約27℃のインキュベーター内で5日間保持し、顕微鏡で観察したが菌糸の生長は認められなかったことから、木材腐朽菌の活性は著しく低下している、もしくは殺菌されたと考えられる。なお、温風処理に供しなかった培地の菌糸は温風処理終了後の培養で菌糸の生長が認められた。

### 3-2. 建物部材のひずみ・含水率

図7は2022年5月7日から10月13日までの建物部材のひずみ (a, b) と建物内および近傍の4か所の温湿度 (c から f) である。

図7a と b について、T 方向のひずみの変化は図7e の外気や図7f の床下の湿度変化によく対応しており、床下南西丸柱、縁板と縁下の水平部材の変化が大きかった。また、例えば6月下旬から7月初旬で明らかのように、縁板と縁板下の水平部材の方が床下丸柱よりもひずみの日変動が大きい。これは、外気 (図7e) の湿度の日変動幅が床下 (図7f) よりも大きいためである。L 方向のひずみは T 方向と比べるとかなり小さいことがわかる。縁板を支える水平部材 L 方向の1つと縁板 L 方向のひずみが処理前の8月初旬から処理後の9月初旬の間で他の L 方向のゲージよりも大きく変動していた。これについてはゲージの接着不良や他の計測機器からのノイズの影響も考えられるが原因はわからない。表2は各測定位置における湿度制御温風処理の期間外と処理中のひずみの最大値・最小値である。T 方向はいずれの測定箇所でも処理中のひずみが処理期間外を超えることはなかった。L 方向では、処理中に生じた圧縮ひずみが処理期間外よりも大きくなった。縁板下の水平部材1の処理中のひずみが処理期間外よりも負の側に約300  $\mu\epsilon$  大き

※色およびクラック観察位置を「○」で示す。

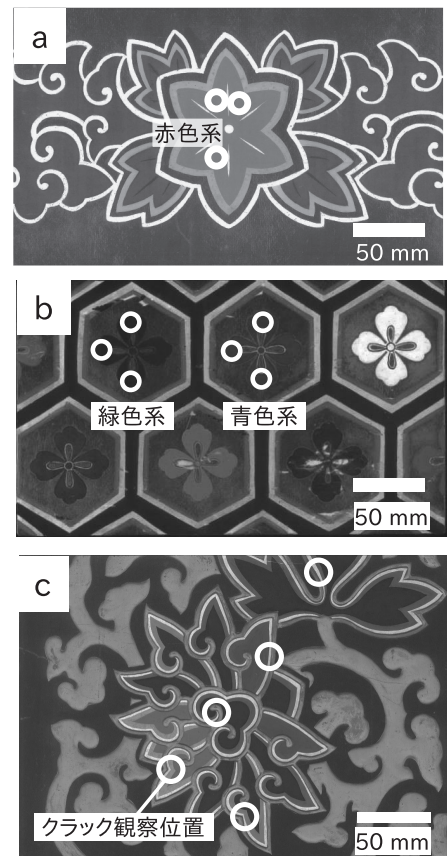


図4 色およびクラック観察用の彩色手板 (a: 生彩色, b: 桐油彩色, c: 置上彩色)

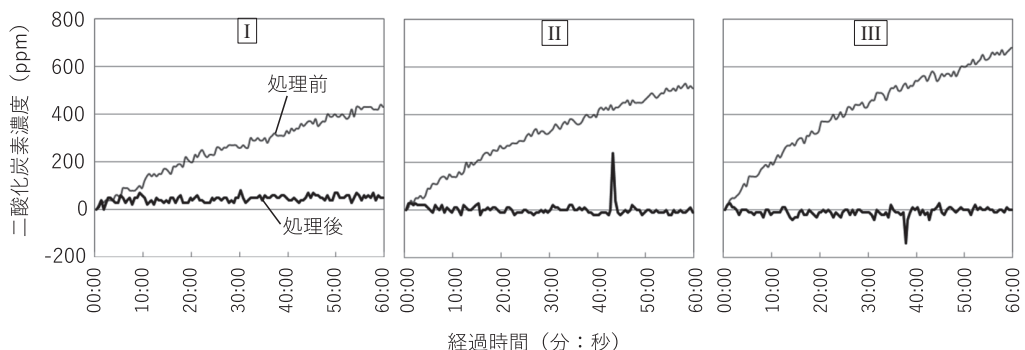


図5 3つの植卵人工飼料における処理前と処理後の二酸化炭素濃度

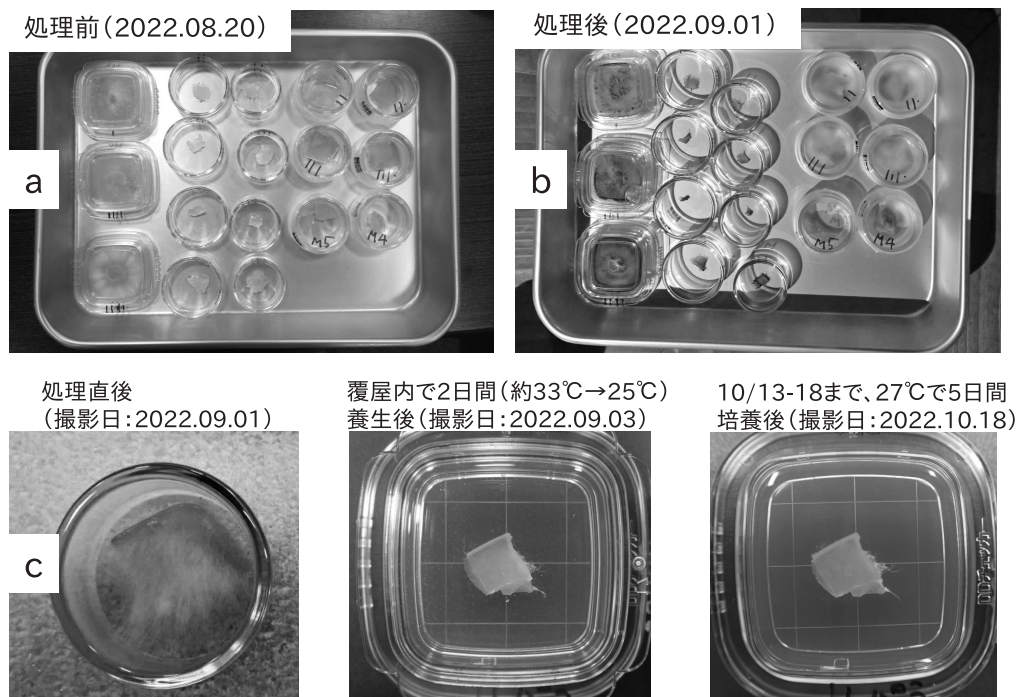


図6 処理前と処理後の腐朽試験体と処理後の培養結果  
a：処理前，b：処理後，c：処理後培養試験

表2 湿度制御温風処理の期間外および処理中の建物部材ひずみ最大値と最小値 ( $\mu\text{E}$ )

測定箇所 (ゲージ貼付方向)	床下丸柱				
	南西 (T)	南東 (T)	南東 (L)	北西 (T)	北東 (T)
処理期間外 最大値/最小値	7121/-2097	3798/-939	210/-26	3424/-507	3195/-1039
処理中 最大値/最小値	6416/-646	3158/-374	39/-273	3188/-118	3017/-705

測定箇所 (ゲージ貼付方向)	縁板 (T)	*縁板 (L)	縁板下の 水平部材 (T)	縁板下の 水平部材1 (L)	*縁板下の 水平部材2 (L)
	処理期間外 最大値/最小値	6509/-1292	319/-54	6630/-1375	213/-27
処理中 最大値/最小値	4039/-1181	ゲージ不調	4174/-598	43/-323	ゲージ不調

\*処理期間外のひずみは，ゲージ不調でない期間の値である。



いので部材は0.03%収縮したことになり、材長が2 mの場合で収縮量は0.6 mmとなる。

図7cからfについて、温度の日変動の変動幅は陣内と床下が小屋裏と外気よりも小さかった。湿度変動は測定位置によって異なり、外気と床下で変動幅が大きく、小屋裏でも変動幅はそれらより小さいが日変動が認められる。陣内は、扉がなく大きな開口があるものの、変動幅が最も小さかった。また、覆い屋の建設が始まった7月15日ころから解体が終わる9月中旬辺りまでは、温湿度の日変動が他の期間よりも小さく、覆い屋内の温湿度が外気の影響をほとんど受けていないことがわかる。

建物部材の含水率の測定結果を表3に示す。覆い屋のなかった6月17日の測定では床下部材の含水率が外周よりも2.5%ほど高かったが、覆い屋が完成して約3週間後の8月17日にはその差は1.2%程度になった。また、陣内と外周では同程度の含水率であった。処理後の9月6日はどの測定場所の含水率も処理前より1から4%低かったが、処理後約1か月の10月13日には処理前と同程度の含水率であった。処理によって、建物部材が過乾燥になるような大幅な含水率変動はなかったものと考えられる。

### 3-3. 試験体のひずみ

図8は表1に示した各試験体の処理期間およびその前後数日のひずみの変化である。全体的な傾向として、T・RT・R方向では昇温加湿期間にひずみの値が増加し、恒温恒湿期間は増加速度が緩やかになり、降温除湿期間にはひずみの値が減少した。L方向では昇温加湿期間にひずみの値が減少、恒温恒湿期間は減少速度が緩やかになり、降温除湿期間に増加した。

図8のグラフaとbはどちらも明治期には既に建物で使用されていた部材のひずみであるが、暴露面が1面のaと2面のbの特にTおよびR方向でひずみ変化の傾向が異なった。グラフaでは試験体Dを除き昇温加湿期間の方が降温除湿期間よりもひずみ変化量が大きく、恒温恒湿期間もひずみは緩やかに増加したが、bでは降温除湿期間の方がひずみ変化量が大きく、恒温恒湿期間のひずみ変化はaよりも小さかった。これらの違いが暴露面の面積によるものかどうかは、別途実験を行い確認する必要がある。グラフaの試験体Dは木口面に甲虫害による空洞が複数個所認められ、内部にはフラスが残っていた。この試験体のひずみ変化が他の試験体A、B、Cと異なった要因として、材の実質の体積が他よりも小さいことや、材内の虫害がひずみゲージが貼付された表面付近までおよんでいたことが考えられる。処理期間中のTおよびR方向のひずみ変化量（処理期間中の最大値と最小値の差分）はグラフaが1351（試験体D）～2739（同A） $\mu\epsilon$ 、bが823（同EのR方向）～1733（同FのT方向） $\mu\epsilon$ であった。またL方向のひずみ変化量は、グラフaが272（試験体A）～385（同D） $\mu\epsilon$ 、bが352（同E板目面）～393（同F板目面） $\mu\epsilon$ であった。

図8のグラフcとdはどちらも比較的新しい材のひずみであるが、湿度制御温風処理の履歴のないグラフdの試験体について、ひずみ変化量は試験体Iが3560  $\mu\epsilon$ 、試験体Jが3074  $\mu\epsilon$ で、同じく処理履歴のない図8aとbの試験体AからFよりも大きな変化を示した。これは、材がこれまでに経験したことのない高温環境に置かれたため、樹木が生長する間に累積する成長応力<sup>9)</sup>によって生じたひずみの残留分が解放されたことが一つの要因で、試験体AからFは、長年の間外気に晒され温湿度変化による伸縮を繰り返し、残留ひずみも徐々に解放されて減少していたため、本処理で生じたひずみは試験体I、Jより小さかったと考えられる。また試験体Jについて、処理後の時点で認められる大きな圧縮ひずみは、次項で述べるように含水率が処理前よりも低下していたことが主な要因であると考えられる。試験体IとJの処理中のT方向ひずみ変化量は他の試験体と比べて大きいものの、表2で示した建物部材の処理期間外の



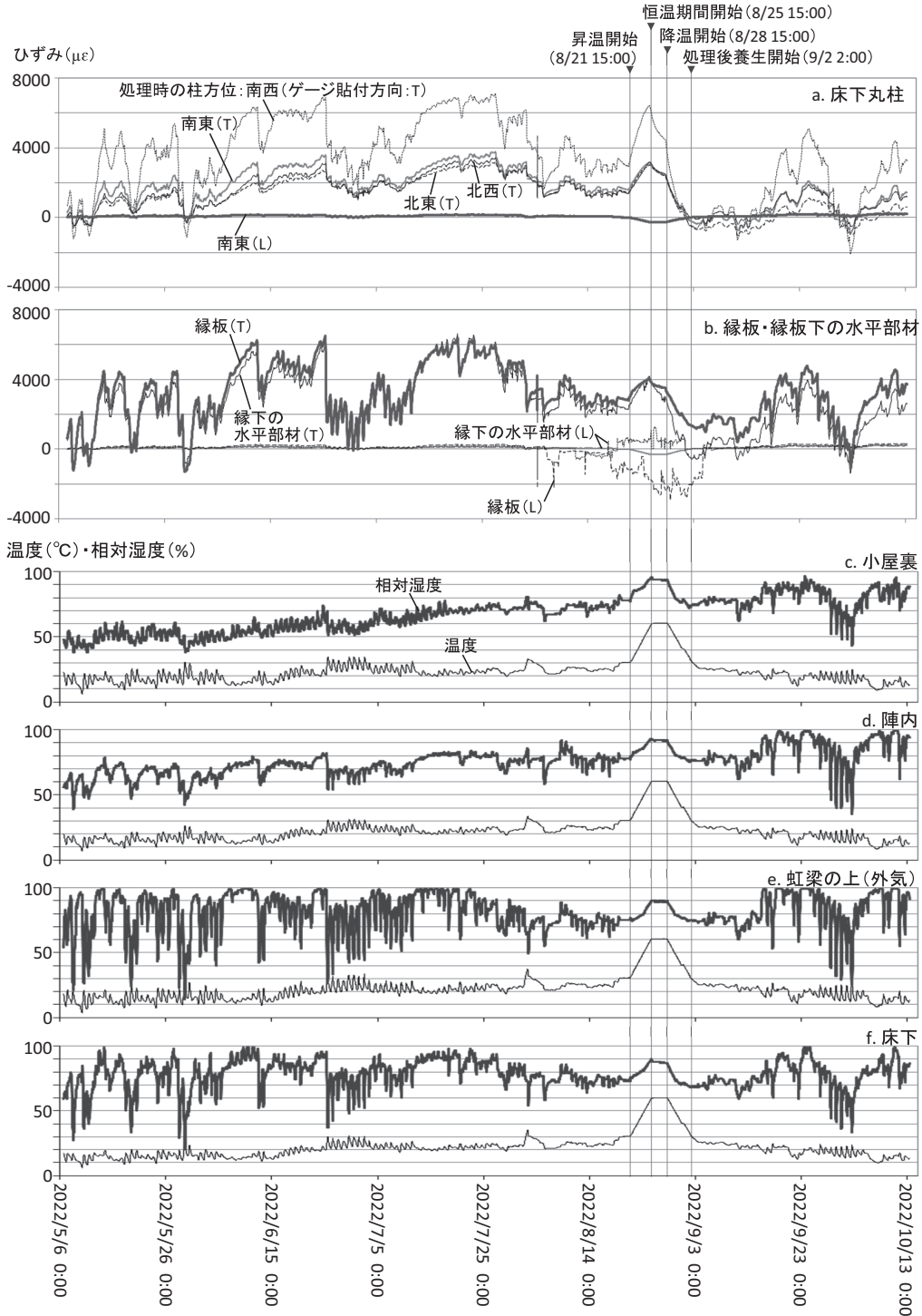


図7 2022年5月7日から10月13日までの建物部材のひずみと建物内外の温湿度変化  
ひずみ：a. 床下丸柱, b. 縁板・縁板下の水平部材, 温湿度：c. 小屋裏, d. 陣内, e. 虹梁上(外気), f. 床下

表3 陣内, 外周, 床下の部材の含水率測定値の平均値 (%)

測定場所 \ 測定日	6/17	8/17	9/6	10/13
陣内	—	22.4(2.5)	21.1(2.5)	21.7(2.0)
外周	23.6(3.3)	22.3(3.0)	19.5(2.9)	22.3(2.8)
床下	26.2(2.3)	23.5(2.2)	19.5(2.4)	22.9(2.4)

※( )内は標準偏差。測定数は、陣内：18、外周：18、床下：23か所

ひずみ変化量の平均値 (6321  $\mu\epsilon$  (S.D. 2081  $\mu\epsilon$ )) や処理中の平均値 (4209  $\mu\epsilon$  (S.D. 1402  $\mu\epsilon$ )) より小さかった。

グラフcでは、木地のままの試験体Gの方が漆仕上げの試験体Hより処理中のT方向ひずみが大きかった。これは、処理中に材が吸湿したためと考えられる。

### 3-4. 試験体の重量変化

図9に表1の試験体IとJの処理中の重量変化量の経時変化を示した。ここで、一般的に金属のヤング率には温度依存性があり、温度が高くなるとヤング率は低くなる(より曲がりやすくなる)<sup>10)</sup>。今回の重量計測では温度変化によるプレートの曲げヤング率の変化を考慮していないため、温度が高くなるほどプレートがより大きく曲がり、実際の重量変化によるひずみよりも大きな値が記録されていると考えられた。それについて今回は校正実験を行っていないため、重量変化量の絶対値についてここでは議論しない。

試験体Iのケヤキ材は昇温加湿開始とともに重量が増加し、恒温恒湿期間はほぼ一定で降温除湿が始まると重量は減少した。この試験体の処理前含水率は9.0%で、今回の処理の温湿度制御値における木材の平衡含水率17%よりも低かったことから、加湿期間中には吸湿して材表面の含水率はより高くなり、重量が増加したと考えられる。恒温恒湿期間は重量が変化していないことから吸放湿はせず、降温除湿期間には重量が減少していることから放湿していたと考えられた。処理後の含水率は10.0%で処理前より1%増加した。試験体Jのヒノキ材の含水率は、今回の処理の温湿度制御値における木材の平衡含水率17%よりも高い21%であったが、昇温加湿開始とともに重量は増加したため、吸湿していたと考えられる。恒温恒湿および降温除湿期間は重量が減少し続けていることから放湿していたと考えられる。処理後の含水率は17.0%であった。ケヤキ材が、処理中の温湿度から考えられる平衡含水率よりも低い含水率であるにもかかわらず降温除湿期間中に放湿したこと、および、ヒノキ材が処理中の温湿度から考えられる平衡含水率よりも高い含水率であるにもかかわらず昇温加湿期間に吸湿していたことについて、材内の温度分布が駆動力となる水分移動が関係している可能性も考えられるが、現段階ではその要因は不明で、今後検討が必要である。

### 3-5. 彩色手板の色計測および割れの観察

表4は生彩色(赤色系)および桐油彩色(緑色系, 青色系)の手板の色差計による計測結果である。各色の測定値の平均値は処理前後の値に大差なく、試験体の色は目視で確認できるような明らかな変化はなかった。また割れについても、処理後に大きく伸長していたものや幅が広がっていたものはなかった。

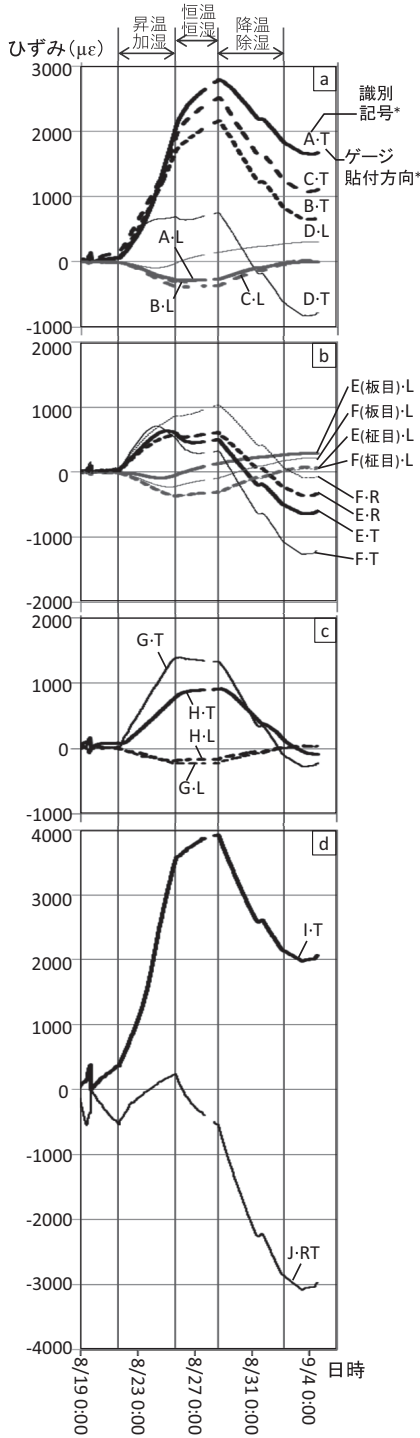


図8 年代および表面仕上げの異なる試験体のひずみ  
\* 試験体の識別記号およびゲージ貼付方向の符号は表1を参照。

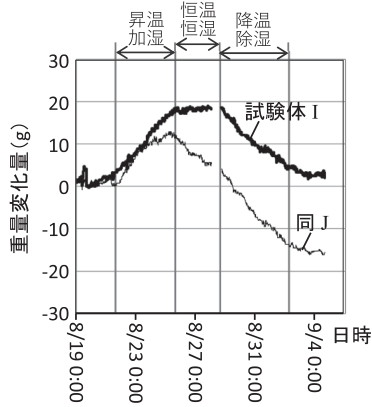


図9 試験体I\*とJ\*における処理期間中の重量変化量  
\* 試験体の識別記号は表1を参照。

### 4. まとめ

湿度制御温風処理による木造建築物加害甲虫の殺虫手法について、これまでの基礎研究や開発、実験室実験や建築物処理の2例を踏まえ、実用化にむけた温湿度制御精度の向上をはかり、2022年7月から9月にかけて3例目の検証処理が行われた。本報ではその際同時に行った殺虫効果の確認や、建築物の棄損につながると考えられる処理中の木材の伸縮、処理前後の含水率変化や彩色手板の色・割れの変化等について検討した結果を述べた。

殺虫効果について、処理に供した植卵人工飼料から成虫は発生しなかった。また簡易的に行った木材腐朽菌の殺菌効果確認では、処理した菌を培養しても菌糸の生育は認められなかった。

建物の棄損にかかわる部材の伸縮について、処理前の2022年5月から10月までの一間社部材の木地面10か所のひずみと周囲環境の温湿度の連続計測データを分析した。処理中のT方向ひずみは処理期間外のひずみの値を超えなかった。処理中のL方向ひずみは処理期間外よりも最大で300 μεほど大きい値を示した。これは2 mの部材であれば0.6 mm収縮したことになる。計測は現在も継続中で、各所ひずみの年変化量を求める予定である。建物部材の含水率は処理後に1から4%下がっていたが、処理後1か月ほどで処理前の程度まで回復した。

年代や表面状態の異なる10体の木材試験体について処理中の表面のひずみを測定した。明治期に建物で使

表4 色差計による3か所の測定値の平均値（括弧内は標準偏差）

		$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h^\circ$
赤色系	処理前	51.5(0.058)	44.2(0.17)	20.0(0.21)	48.6(0.21)	24.3(0.25)
	処理後	51.6(0.12)	43.7(0.50)	19.7(0.47)	47.9(0.60)	24.3(0.29)
緑色系	処理前	27.9(1.1)	-25.7(0.96)	7.47(0.31)	26.7(0.91)	163(1.0)
	処理後	26.8(0.57)	-26.4(0.58)	7.40(0.17)	27.1(0.51)	164(0.32)
青色系	処理前	30.2(0.81)	-7.80(1.0)	-29.9(0.67)	30.9(0.75)	255(1.8)
	処理後	26.8(0.82)	-9.0(0.57)	-27.1(1.3)	28.5(1.4)	252(0.49)

用されていた古い部材や湿度制御温風処理の履歴がある材の処理期間中のひずみ変化量は、T および R 方向で823から2739  $\mu\epsilon$  であった。比較的新しい材はそれらよりもひずみ変化量が大きく、ケヤキで3560  $\mu\epsilon$ 、ヒノキで3074  $\mu\epsilon$  であった。新しい材のひずみ変化量でも、一間社部材の処理期間外および処理中のひずみ変化量の平均値（6321  $\mu\epsilon$  (S.D. 2081  $\mu\epsilon$ ) および4209  $\mu\epsilon$  (S.D. 1402  $\mu\epsilon$ )) より小さかった。

比較的新しい材であるケヤキ（処理前含水率9.0%）とヒノキ（同21%）は、木材平衡含水率の目標値を17%とした今回の処理中に重量が変化した。処理直後の含水率はそれぞれ10.0%と17.0%であった。

彩色手板について、色や割れには処理による大きな変化は認められなかった。

## 謝辞

本検証処理に際しては、公益財団法人 日光社寺文化財保存会所有の一間社を使用させていただいた。ここに深甚な感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Gail Gali and Ticca M.A.Ogilvie : Thermal methods of pest eradication: thier effect on museum objects, The Conservator, 29, 5-18 (2005)
- 2) Phillip Ackery, David Pinniger, Adrian Doyle, Karen Roux : Heat treatment of entomological drawers using the Thermo Lignum® heat process, Collection Forum, 19 (1/2), 15-22 (2005)
- 3) Florian Tscherne, Bernhard Schachenhofer, Karen Roux : Research study on the effects of the Thermo Lignum ® Warmair treatment on art objects with paint and gilt finishes, Wood Science for Conservation of Cultural Heritage -Braga 2008: Proceedings of the international conference held by COST action IE 0601, Braga, 5-7 November, pp.153-157 (2008)
- 4) <https://www.thermolignum.com/en/building-treatment.html> (2022.11.28参照)
- 5) Yoshihisa FUJII, Masahiko HARADA, Hiroyuki KITAHARA, Yuko FUJIWARA, Rika KIGAWA, Yoshinori SATO, Yukio KOMINE, Masahide INUZUKA, Tomoko KOTAJIMA, Shingo HIDAKA, Akiko SAITO, Tadashi FUKOKA: Application of humidified heat treatment to entire historic wooden buildings at Nikko World Heritage site to control insect attack, Proceedings of Integrated Pest Management (IPM) for Cultural Heritage the 4th International Conference in Stockholm, Sweden, 21-23 May, pp.240-248 (2019)
- 6) 北原博幸, 藤井義久, 木川りか, 原田正彦, 佐藤嘉則, 藤原裕子: 歴史的建築物における甲虫類駆除のための湿度制御温風処理, 日本建築学会第50回熱シンポジウム梗概集, pp. 109-116 (2021)



- 7) 小峰幸夫, 佐藤嘉則, 原田正彦, 北原博幸, 木川りか, 藤井義久: 湿度制御した温風処理における殺虫効果の検証, 保存科学, 58: 21-28 (2019)
- 8) 小峰幸夫, 佐藤嘉則, 原田正彦, 北原博幸, 木川りか, 藤井義久: 湿度制御温風処理における殺虫効果判定法の開発, 保存科学, 59: 1-8 (2020)
- 9) 渡辺治人: 木材理学総論, pp.33-38, 農林出版株式会社, 東京都 (1978)
- 10) 竹内洋一郎, 野田直剛, 小森茂, 入交裕, 北川俊治: 各種特殊鋼およびアルミニウム合金の弾性係数の温度依存の実験式, 材料, 26(282): 210-214 (1977)

キーワード: 湿度制御温風処理 (humidity-controlled warm-air treatment); 木造建築物 (wooden structures); 甲虫害 (beetles attack); ひずみ (strain); 含水率 (moisture content)

## Eradication of Beetles Attacking Wooden Structures by Humidity-Controlled Warm-Air Treatment (2): Confirmation of Beetles Eradication and a Study of Impact on Structural Materials

FUJIWARA Yuko<sup>\*</sup>, HARADA Masahiko<sup>\*\*</sup>, KITAHARA Hiroyuki<sup>\*\*\*</sup>,  
SATO Yoshinori, SHIMADA Megumi, KIGAWA Rika<sup>\*\*\*\*</sup>,  
HIDAKA Shingo<sup>\*\*\*\*\*</sup> and FUJII Yoshihisa<sup>\*</sup>

Humidity-controlled warm-air treatment to eradicate wood-attacking beetles was applied to a Shinto-shrine type wooden building in Nikko, Japan, from July to September 2022. The effectiveness of the treatment in eradicating beetles and the impact on structural materials were examined.

Artificial diets including eggs, larvae, and pupae of *Lyctus africanus* were placed in the treated space, and no adult bugs were developed from the diets after the treatment. Moreover, treated fungal hyphae did not grow in culture. The strain that occurred in the building members and in aged or new test wood specimens during the treatment did not reach a level that would significantly damage the building. The moisture content (MC) of the building components dropped from 1 to 4% after the treatment but recovered to pre-treatment levels in a month. The MC of wood members and samples with a lower MC than the equilibrium-MC (EMC) targeted for this treatment increased after the treatment, while the MC of wood members and samples with a higher MC decreased. The colors and cracking of the painted wood boards did not visually change very much after the treatment.

---

\*Kyoto University

\*\* Association for the Preservation of the Nikko World Heritage Site and Temples

\*\*\* Institute of Total System

\*\*\*\* Kyushu National Museum

\*\*\*\*\* National Museum of Ethnology