

# 〔報文〕 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（1） — 温湿度制御性能の評価 —

島田 正理\*・近藤 修平\*・北原 博幸\*\*・原田 正彦\*\*\*・  
藤原 裕子\*\*\*\*・小椋 大輔\*\*\*\*\*・佐藤 嘉則・藤井 義久\*\*\*\*

## 1. はじめに

木造建造物の代表的な生物劣化の要因としては、菌害や虫害が挙げられる。菌害については建造物の構造や材料の強度低下の原因となる腐朽菌や、木材だけでなく布や紙など有機質の材料を汚損・損傷させるいわゆるカビ類を挙げることができる。さらに主要な虫害としては、シロアリによる食害（蟻害）と、シバンムシ類やキクイムシ類など甲虫類による食害（甲虫害）を挙げることができる。これらの生物劣化は、地域と気候、動植物相、建造物の種類、構造や材料などによって種類や発生頻度は異なるが、全国的に分布していると考えられる。<sup>1,2)</sup>

いずれの生物劣化も看過できるものではなく、早期に検出し、対策をとることや、予防することが望ましい。特に劣化が進行性である場合には、建造物の安全性の確保や価値や保存のためだけでなく、建設当初からの部材が喪失されてしまう事を防ぐ上でも早急に劣化を停止させる必要がある。特に虫害にあっては駆除（殺虫）が必要となる。

駆除対策のうち、蟻害については従来から一般住宅などに用いられる手法と同様の手法として駆除剤の塗布、噴霧や注入という手法が採られている。一方、甲虫害については、発生頻度のわりに重要視されることは少ないが、激甚な場合には、これまで殺虫ガスを用いた天幕燻蒸が実施されてきた<sup>3)</sup>。しかし近年では、安全性や環境への配慮などから化学薬剤への依存度が低下し、代替の手法が求められつつある。

このような事情を背景に、化学薬剤に依存しない手法として、いわゆる物理的な手法の開拓が進みつつある<sup>4)</sup>。本論文で採り上げる湿度制御温風処理法もその一つである。この手法は、建造物を断熱・気密性の高い覆い屋で覆い、その中の温度を徐々に60℃程度まで升温させ、1から3日程度保持し、その後また徐々に降温させる手法である。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。また升温期には、覆い屋内を加湿し、木造建造物が過乾燥状態になるのを防ぎ、乾燥による損傷を防ぐ。また降温期には、除湿して結露による建造物の汚損を防ぐ。このような温湿度管理を行うことで、木造建造物を毀損することなく、木材加害昆虫を駆除できる。

この手法では欧州などでは美術工芸品や家具、建造物における虫害対策として実用化されている<sup>5-13)</sup>。しかし、わが国におけるこの手法については、後述の2例を除き建造物での実施事例はない。また実施するにしても漆・彩色で仕上げられた木造建造物にあっては、適用の可能性を十分、慎重に検討しなければならない。

これまで本研究の著者を含む研究者グループによって、本手法について基礎的研究や建造物用の処理装置の開発が進められ、実験室実験や実際の建造物の実験的な処理2例を通じてその

\*関西電力, \*\*トータルシステム研究所, \*\*\*日光社寺文化財保存会, \*\*\*\*京都大学大学院農学研究科,  
\*\*\*\*\*京都大学大学院工学研究科

性能や効果を明らかにしてきた<sup>14-17)</sup>。これら一連の研究によって、本手法を日本の建造物に適用する可能性が明らかにされてきたが、実用化にむけては温湿度の制御精度の評価や向上、殺虫効果や建造物への影響についてのより詳しい解析の他に、断熱覆い屋の気密・断熱性能、騒音などの環境影響や消費電力量なども検討する必要が認識された。これらの点を踏まえて、装置や制御方法を改良し、2022年7月から9月にかけて3例目となる検証処理を行った。

本報告では、本検証処理で用いた温湿度制御の装置やプログラム、断熱覆い屋の設計・仕様を紹介し、検証処理における温湿度制御性能の他に、断熱・気密性能、騒音、消費電力などの評価結果を報告する。なお殺虫効果や建造物への影響評価については続報で報告する。

## 2. 対象建造物と覆い屋

### 2-1. 対象建造物

湿度制御温風処理法の検証処理（以下、検証処理）には公益財団法人 日光社寺文化財保存会（以下、保存会）所有の彩色・漆研修用一間社（栃木県日光市山内2281, 以下、一間社）を用いた（図1）。本建造物は、2021年に建築されたもので、一間社流造、銅板葺の形式であり、研修用ではあるが、神社建築の仕様となっている。平面積は8.178 m<sup>2</sup>材で、ヒノキ材で建築されている（一部軒付部分でスギが用いられている）。また大断面の材としては、身舎柱（261 mm 丸）や向拝柱（211 mm 角）が挙げられる。

なお検証処理では、近隣への配慮のため、騒音が発生する発電機を用いずに、保存会事務所の電源設備を利用した。すなわち既存のキュービクルに6.6 kV 高圧配電線で引き込まれた電気を、75 kW の変圧器2台（3相200 V の動力用・単相200/100 V の電灯用）で変圧して用いた。さらに保存会用の常用回線の予備回線からも給電した。商用電源を用いての検証処理の電源計画については、保存会事務所の最大使用電力と今回の検証処理の最大使用電力の合計が容量を超えない事が前提条件となる。

### 2-2. 覆い屋の断熱・気密仕様

限られた供給電力で、大規模な建造物の雰囲気について、その湿度を制御しながら温度を60℃まで上昇させるためには、覆い屋の断熱や気密性能が優れていることが求められる。本検証処



図1 湿度制御した温風処理を実施した一間社  
左：正面側（2022年7月引き家後）右：背面（2022年4月）

理では、実施時期の外気の温湿度変化や地盤面における熱損失の他に、施工性・コストを考慮して覆い屋の壁・屋根や地盤面における気密・断熱仕様を検討した。

検討の結果、覆い屋は、4壁面と屋根を持つ構造とし、一間社の周囲に二重の足場をまず構築し、その間に壁面を建て、上部を屋根で覆う構造とした（図2）。壁面と屋根は、厚さ12 mmの三六版コンクリート型枠合板2枚によって主たる断熱要素となる50 mm厚発泡ポリスチレン（スタイロフォーム IB、デュボン・スタイロ社製）（三六版）2枚を挟み込む仕様とした。気密性向上のために、2層発泡ポリスチレンを千鳥貼りとし、接合面は、アルミテープで閉じた。また合板と発泡ポリスチレンとの間には薄い塩ビシート層を設けた。実際の設置では足場材に角材を留め、これに順次合板や発泡ポリスチレンをねじ留めした。用いたネジは長さ75 mmとして、ネジが壁を貫通しヒートブリッジになることを防いだ。床面は発泡ポリスチレンの二重貼りとしたが、礎石部分は断熱していない。覆い屋を高気密にした状態で昇温すると高温多湿環境となり、内部の気圧が大気圧よりも高くなる。このため熱損失要因にはなるが、壁面の下部の1箇所直径75 mm空気逃がし穴を設けた。また後述するが、冷却除湿の管を通じて内部の高気圧空気が逆流することを防ぐために冷却除湿のファンは常時運転させた。覆い屋内部の容積は約700 m<sup>3</sup>であった。



図2 覆い屋の状況

左上：外観 右上：屋根面 左下：内部

右下：外壁に取り付けた計器ボックスと空気逃がし穴

### 3. 湿度制御システム

湿度制御温風処理を実施する際は、湿度制御された温風を覆い屋内で発生、循環させるために、装置と制御プログラムからなる「温湿度制御システム」を構築する。装置は加温・加湿・送風を担う処理ユニット（ヒーター、加湿器、ファンから成る）と、これに冷却除湿用空気の発生装置（エアコン）からの空気を加える装置を取り付けて構成されている。

#### 3-1. 処理ユニット

処理ユニットは、断面が約70 cm角、長さが約1.2 mの箱型で、両端断面は開口になっている。この箱内に、ファン、ヒーター、加湿用蒸気管、冷却除湿用空気のホースが組み込まれている。処理ユニットは、覆い屋内に設置し、片方の開口からファンで覆い屋内部の空気を箱内に呼び込み、他方に吐き出す。箱内に呼び込まれた空気は、ヒーターによって加熱され、また蒸気管からの水蒸気や冷却除湿用ホースからの冷却除湿空気が混合され、湿度制御された空気として水平方向に吐き出される。ここから吐き出された空気は、処理対象物件に直接当たらない様に覆い屋の壁周囲や建物外側を循環し、その過程で徐々に建物方向へと熱や水分が移動していく（図3）。

ファンは外径400 mmであり3相200Vで駆動し、520 m<sup>3</sup>/hの送風能力がある。ヒーターは10 kW（5 kW × 2、3相200 V）である。蒸気は、覆い屋外の小型コンテナ（調整室）で発生させ、ホースで導入してユニット内の蒸気管から発生させる。蒸気発生には電熱式蒸気加湿器（WM-SJB14、定格消費電力10.4 kW、蒸気発生量は14.2 kg/h）を用いた。この装置では高温加湿蒸気を発生させるため、加湿する際、同時に加温も行われる。冷却除湿空気は覆い屋外に設置した別の調整室で発生させ、必要な風量を冷却除湿ファンの周波数で調整し、アルミホースを介して覆い屋内の処理ユニットへ導入する。

すべての機器類には主に建物の火災防止の観点で保護機能を備えている。すなわちヒーター本体には過熱防止のためのサーモスタットによる回路遮断や温度ヒューズが設けられており、一定の温度に達すると回路が自動的に遮断される。また温湿度制御システムは電力で稼働するため、全ての機器に漏電ブレーカーが取り付けられている。さらにこれらの電源関係装置は調整室内の電源処理部にて集約して管理されている。その他に覆い屋内の空気が濃みそうな箇所にはアルミ管付きのファンを設置し、周囲の空気をアルミ管で吸引・循環させた。処理ユニットは比較的小型で、処理規模にあわせてユニット数を増減できるようにした。また処理ユニットを小型化し、分散利用することで現場への運搬や施工性の向上を図った。図4に覆い屋内とその内外への装置類の設置状況を、一間社の覆い屋と処理ユニットの配置を図5に示す。

#### 3-2. 制御用の計測と制御装置

制御プログラム（パソコン）は「覆い屋内の温湿度状態監視」、「湿度制御温風処理スケジュール（温湿度の時間管理の手順）の設定」、「装置への出力指令」の機能を持つ。制御プログラムは、通信装置を介して、覆い屋内の温湿度センサーや装置と連動している。覆い屋内の環境温湿度状態を計測し、温風処理スケジュールにおける目標温湿度を維持するために、加温、加湿、冷却除湿などの各機器の出力を制御する。

##### 1) 温湿度センサー

制御の指標となる温湿度の計測には、SENSIRION社のデジタルセンサー（SHT-75）を使

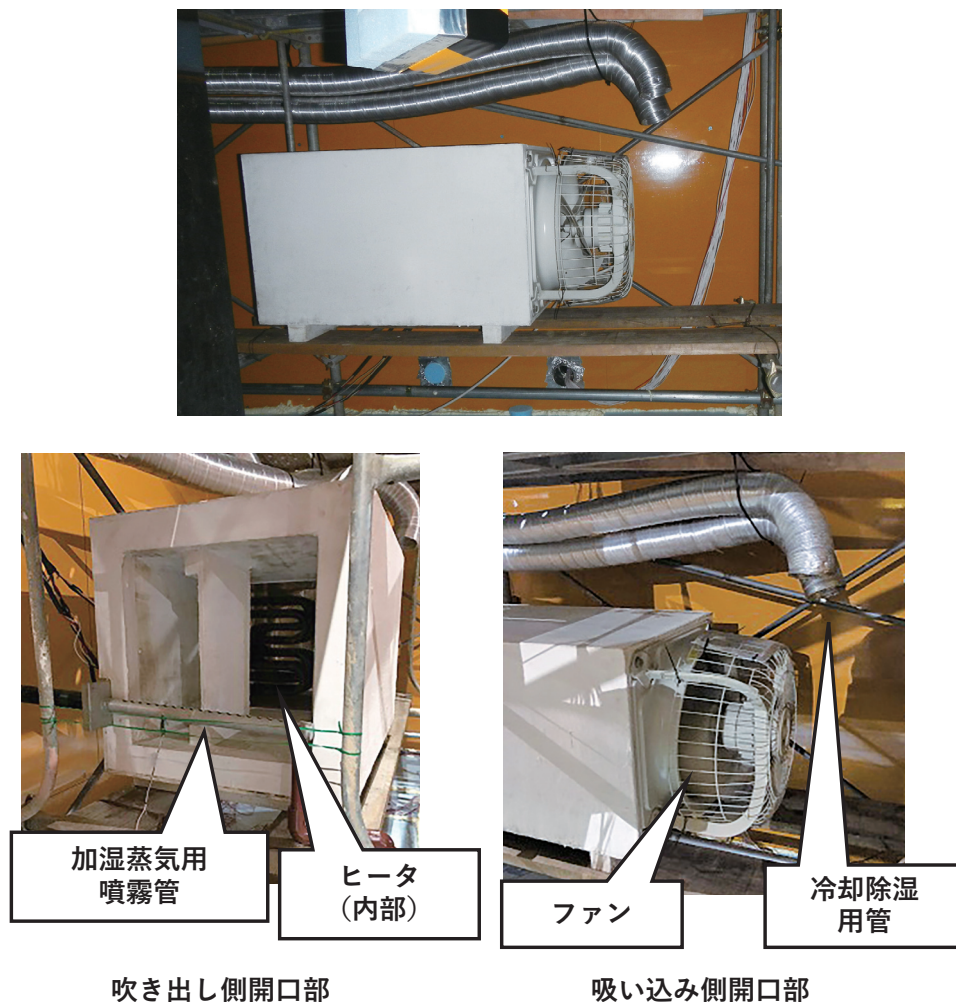


図3 処理ユニット

用する（図6）。このセンサーの温度誤差は $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ （測定範囲： $-40^{\circ}\text{C}$ ～ $123^{\circ}\text{C}$ ），湿度誤差は $\pm 1.8\%$ （測定範囲：0%～100%）である。温湿度センサーは温湿度を制御するための基準となる場所に設置する。建物内部に設置すると、覆い屋内外の温湿度分布の差の影響が大きく評価され、制御が不安定になる。その一方で建物から離れた位置に設置すると、建物の温湿度制御が十分でなくなる。このため、空気の流れのある建物外側と覆い屋の足場の内側（後述の図12平面図の点線枠内）の中間部分に制御用センサーを取り付けることとする。

## 2) 制御用コンピュータ

制御用のコンピュータには独自で開発したプログラム（Visual Basicで編集）が組み込まれており、湿度制御温風処理の一連の処理となる覆い屋内の温湿度状態監視、湿度制御温風処理スケジュールの設定、装置への出力指令の機能はこのコンピュータで行われる。プログラムが示す設定画面から一連の処理スケジュールを決定する温湿度制御目標値を設定することができる。またプログラム稼働中は、10秒ごとに覆い屋内の温湿度データが取り込みこまれ、数値や

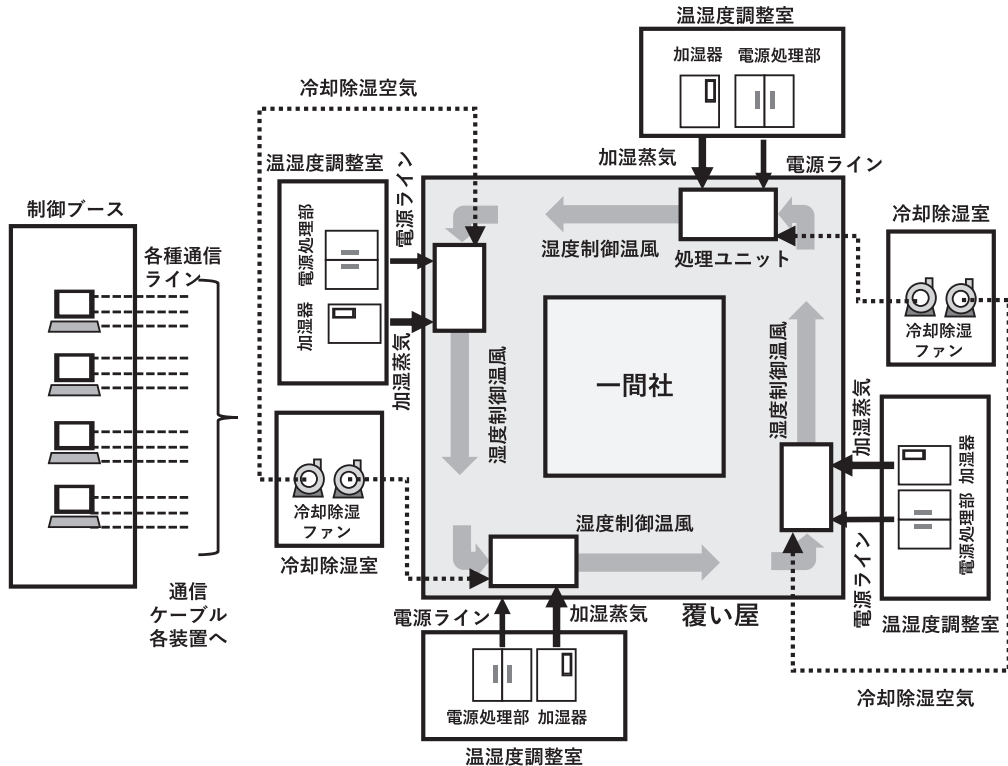


図4 覆い屋内とその内外への装置類の設置状況

グラフで表示される。また目標値と現在値およびそれらの偏差を監視できるようになっている。さらにプログラムは目標値との偏差に見合う出力値を計算し、各装置に稼働条件の修正値を自動的に送信する。なお制御用のコンピュータと各機器との通信はLANケーブルを用いている。これによって最長50 mまでの有線通信が可能になっている。図7に制御用コンピュータやその他の計測機器が設置された制御用ブースの状況を示す。

### 3) 制御方式

覆い屋内の温湿度の制御方式は、PI（比例積分）制御とした。すなわちある時刻において制御用のコンピュータが処理ユニットの各機器へ出力する制御用信号は、その時の制御用センサーからの温湿度データと目標値との差に比例する値（P値）と、その時刻より少し前からの期間における差の積分値（I値）を参照しながら決定する。P値を決定する比例定数や、I値を決定する積分期間は、予備的検討において、各機器の出力応答や覆い屋内の温湿度変化の速度などから推定して決定する。

また本システムでは建物規模に応じて複数台の処理ユニットを設置する。その際、ある処理ユニットで故障が発生し、その機能を失った場合に、健全なユニットでバックアップができるように、処理ユニットがそれぞれで温湿度制御できるように個別分散制御方式としている。一方、この方式では処理中に処理ユニット間の制御出力が不均衡になる可能性や、装置の不具合が生じた際の復旧操作時に覆い屋内の温湿度が変動する可能性があるため、自動制御中であっても随時マニュアル操作にて制御プログラムや設定値などを変更し、制御出力を調整できるよ

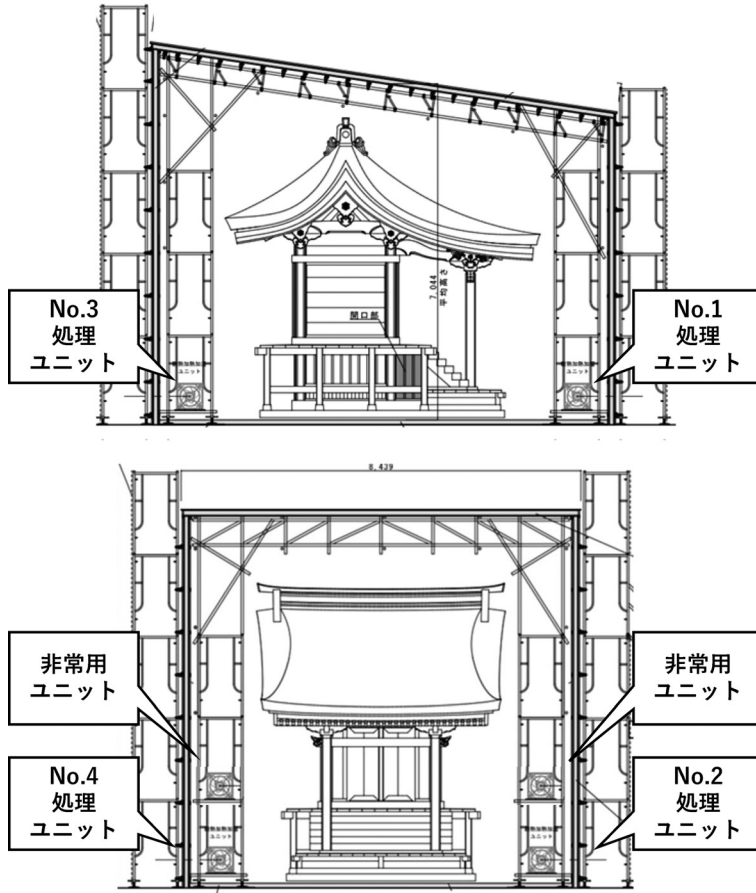


図5 一間社の覆い屋と処理ユニットの配置

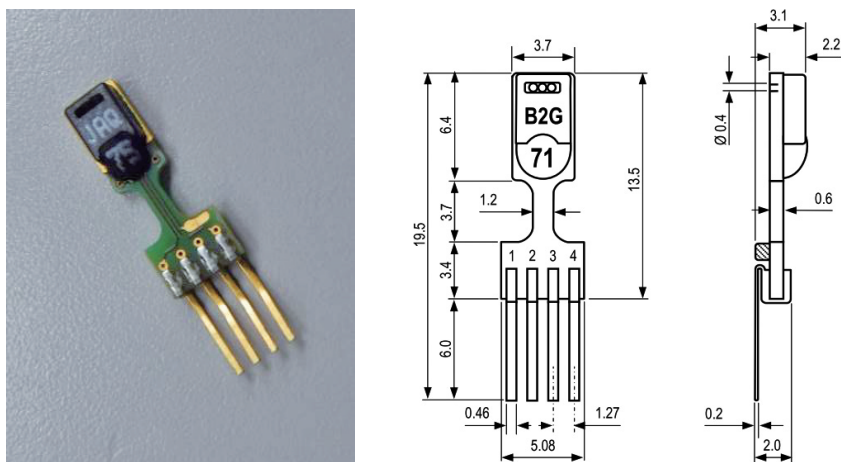


図6 温湿度計測に用いたSHT75センサー  
(寸法図はSENSIRION社カタログから引用)



図7 計測制御ブース

うになっている。

システム構成する際は、万一の機器故障を想定した場合にそなえて種々の対策を講じている。たとえば処理中に計画以上の温湿度制御能力が必要となる場合にそなえて予備機を随時稼働できるように準備した他、一部の電源に事故が発生しても制御が適切に行えるような電源回路構成やシステムの制御方式を採用した。さらに電源喪失の場合にそなえて他系統の常用電源からの非常用電源の確保等の準備を行った。なお処理期間中は不測の事態対応のため、常時監視者を配置している。全電源が喪失した場合でも覆い屋内の空気は高気密・高断熱の状態が一定期間保持されるため、その間に、順次手動による換気などの対策をとることができる。

## 4. 処理スケジュールと性能評価項目

### 4-1. 処理スケジュール

処理スケジュールでは湿度制御温風処理の温湿度制御方針を予め定めておく必要がある。湿度制御温風処理においては、木部の含水率を初期状態から一定に保ちながら昇温・降温させるが、そのために昇温時には加湿、降温時には除湿する必要がある。またそのスケジュールは、平衡含水率曲線に沿うように加湿・除湿する必要がある。このため、処理時の外気温度から60℃までの昇温、また処理後の降温の際の覆い屋内の温湿度目標値や開始の初期値等の方針を決める必要がある。

#### 1) 保持目標含水率の決定

保持含水率は、一間社の部材の含水率の測定値と、雰囲気温湿度変化から得られる平衡含水率の観点から検討し、決定した。

検証処理に先立ち、2022年5月から8月まで一間社及びその周辺の温湿度計測を実施した(図8)。足場や断熱覆い屋の建設後(7月以降)は、外気と遮断されるため4か所とも温湿度は一定値に収束し、8月には27℃で75%程度となった。この状態での平衡含水率(外気とバランスする木材の含水率)は14%と推定された。すなわち断熱覆い屋内で建物の部材の含水率は場所によらず14%程度であると推定された。

一方、実際に含水率計で測定した結果を図9に示す。異なる日や異なる測定器、さらに異な



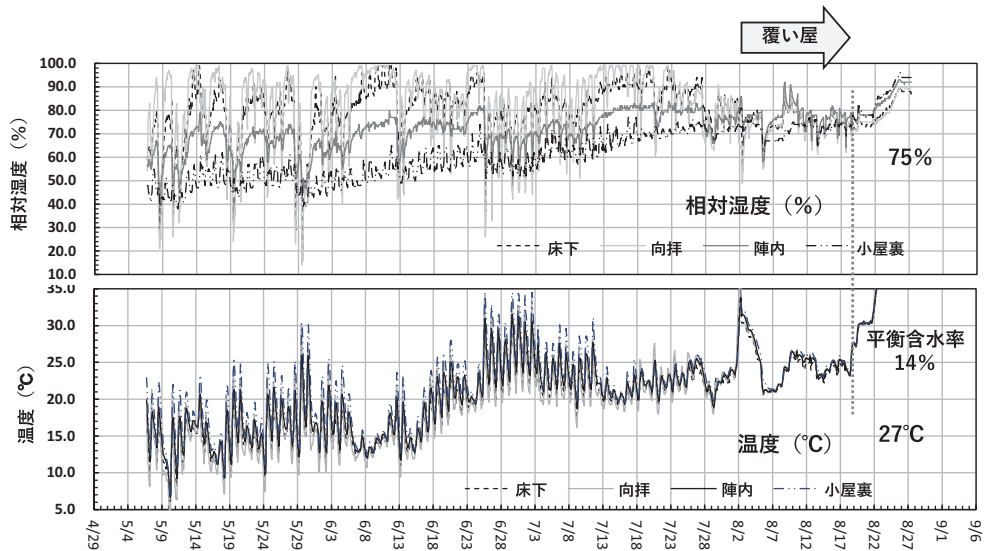


図8 5月から8月の一間社の温湿度変化

る測定モードで測定して評価した結果、部材の含水率は17.4%から18%程度であることがわかった。

含水率計での値は外気条件から推定される平衡含水率と比較すると3~4%程度高いが、検証処理では、含水率計を用いた建物部材の実測の含水率に従って、保持目標含水率は17%として湿度制御することとした。

含水率17%とした場合、60℃まで昇温させた際のこの含水率に平衡する相対湿度は89%となる。これよりも高い含水率とした場合の相対湿度は90%を超え、温湿度センサー計測可能上限付近になり、温湿度センサーが結露して正常な温湿度計測ができなくなる可能性がある。これによって精度の高い温湿度制御ができなくなったり、建物を結露させたりする事態が想定されるため、今回は建物の材に影響を与えない範囲での湿度設定とした。

## 2) 温湿度制御スケジュールの決定

外気の測定結果から、温風処理の開始時の温湿度を27℃とし、この条件で含水率17%に平衡する雰囲気相対湿度は83%となることから、スケジュールの開始時の温湿度を27℃、83%とした(図10)。さらにこれを起点として、平衡含水率曲線に沿うように(すなわち含水率を一定にして)温度を60℃(殺虫温度)まで上昇させると、到達すべき相対湿度は89%となる。スケジュールでは60℃、89%を昇温到達温湿度とした。なお昇温速度は、これまでの事例とほぼ同様の0.3125℃/hとした。

## 4-2. 性能評価項目

検証処理に先立ち、覆い屋の断熱性能や気密性能を評価した。また処理中の温湿度制御性能、覆い屋内の空間温湿度分布、試験体となる木材内部の温湿度分布の他、消費電力や環境影響としての騒音測定を行った。

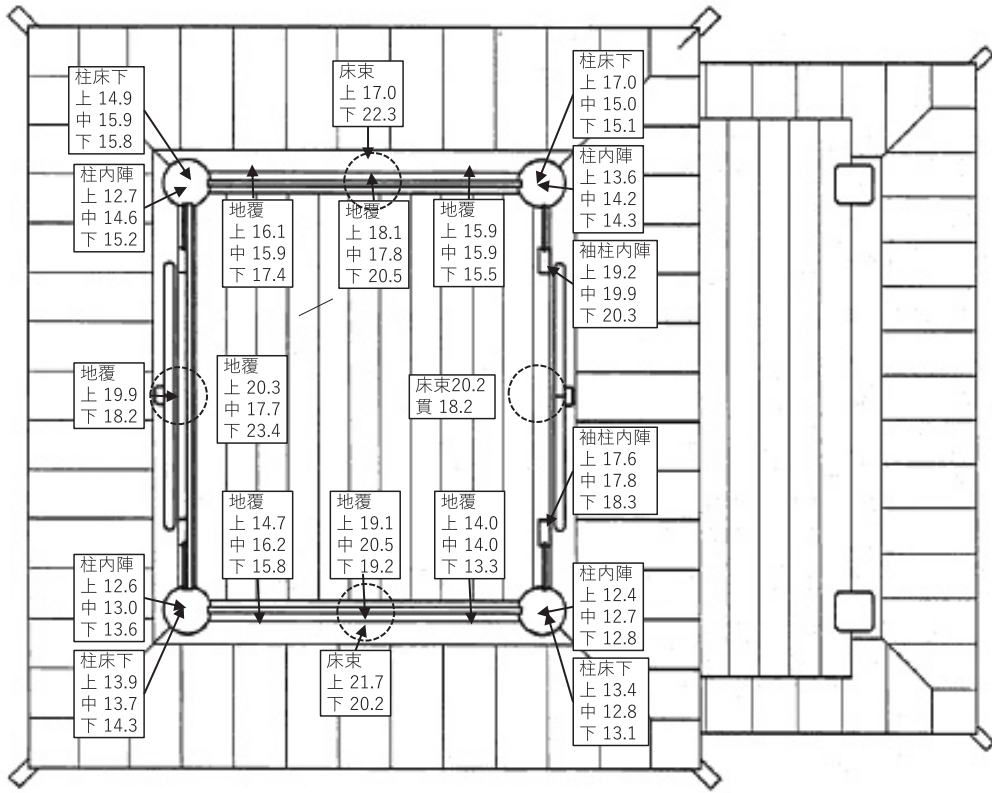


図9 一間社の部材の含水率測定結果 (単位は%)

□の中の上中下は、各部材における測定位置を示す。

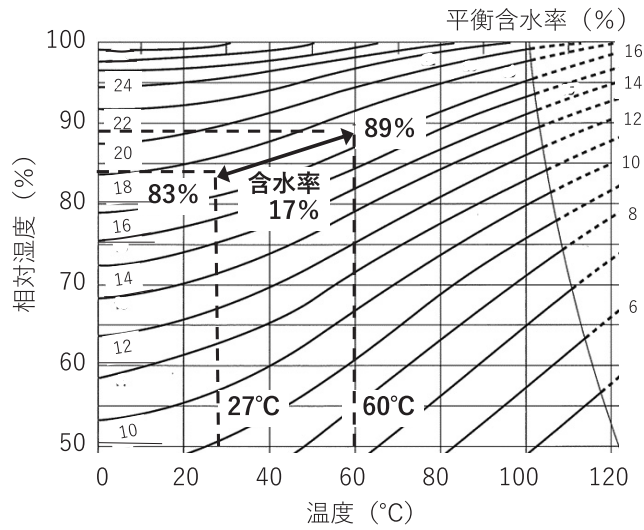


図10 平衡含水率曲線と温湿度制御スケジュール

## 5. 結果と考察

### 5-1. 覆い屋の気密・断熱性能

覆い屋の断熱性能は、覆い屋内に一定量与えたヒーター熱量と、外気変動が安定しているときの覆い内外の温度差を用いて算した。処理ユニットのファンで覆い屋内の空気を循環させながら、5 kW のヒーターを投入し、2022年8月1日17:45から8月2日7:45の間、覆い屋内の温度を上昇させ、その状態を保持した。外気温度が安定している夜間の外気温度データと覆い屋内部温度の測定データを用いて断熱性能評価を行った。外気温度が安定している時間帯における、覆い屋内温度と外気温の差は15℃程度であり、覆い屋内で $5,000 \text{ W}/15^\circ\text{C} \approx 333 \text{ W}/^\circ\text{C}$ の発熱が得られることになる。その値を総（外皮）表面積で除すと「外皮平均熱貫流率 UA」値は $0.83 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ となった。平成27年7月8日に公布された最新の「建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律」によると栃木県の外皮の熱性能基準である外皮平均熱貫流率 UA 値は $0.75 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ であり（東京や京都の基準値は $0.87 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ ）、覆い屋の断熱性能は、一般的な基準値を満たしているといえる。

覆い屋の気密性能測定は、覆い屋設置直後の2022年8月1日に実施した。測定前に冷却除湿空気吹き出しダクトにタオルを挿入し、端面をラップ及びテープで覆って密閉した。測定にはアメニティエアロテスター（KNS-4000, KONA Sapporo. Co. Ltd 製）を用いて、減圧法で3回測定を行った。今回の覆い屋の床面積 $76.371 \text{ m}^2$ に対し、総相当隙間面積  $\alpha A (\text{cm}^2)$  の測定結果はそれぞれ、1回目:75, 2回目:74, 3回目:77となり、気密性能 C 値 ( $\text{cm}^2/\text{m}^2$ ) はそれぞれ、1回目:0.98, 2回目:0.97, 3回目:1.0であった。次世代省エネルギー基準での住宅の気密性能について、北海道と東北の一部地域では C 値の基準値として2.0が、それ以外の地域では5.0が定められており、基準以下の住宅を「高気密住宅」と呼んでいる。覆い屋の気密性能は、北海道の基準値2.0を大きく下回り、良好な気密性能を有しているといえる。

### 5-2. 温湿度制御性能（対スケジュール）

温湿度制御性能は、覆い屋内の環境温湿度がスケジュールに示す目標値通りとなるように制御が機能しているかどうかで評価した。また処理途中における想定外のトラブルに対して適切な修正や復旧対応がとれ、急激な温湿度変動を起こさないこと、装置への過大な負荷などのためにスケジュール通りの運用が困難となった場合に、適切な対応がとれる制御システムであることの観点からも評価した。

#### 1) 制御用センサーの設置位置

制御用コンピュータによる監視および制御に用いる温湿度センサーは、建物付近でかつ空気の流れのある場所を考慮し、一間社階段上の入口付近の縁へ設置した（図12の星印の箇所）。また、覆い屋の四方の隅付近に設置してある4台の処理ユニットは個々で独立して制御されるが、各ユニットが統合的に制御されるように、4系統のセンサーは同じ場所に設置した。

#### 2) 処理スケジュール方針決定前の温湿度制御

検証処理における温湿度の変化を図11に示す。最初の時点（8月19日）は、制御目標値や処理スケジュールの方針を決定する前の期間である。この時点では制御目標値を $27^\circ\text{C}/80\%$ としている。これは、図8に示した一間社の温湿度変化温湿度の推移から判断する平衡含水率14%と、方針決定前に実施している含水率計による計測データ18%それぞれの中間値付近の含水率

を考慮し、それに平衡する環境温度条件を、平衡含水率曲線で決めたためである。その後、スケジュール方針が決定し、温湿度設定を27℃/83%としたが、当日に想定された最高外気温度や日射等を考慮し、制御目標値を安定的に維持しやすくするために温湿度設定を30℃/83%へ変更し、昇温前の養生運転に入った。

### 3) 処理スケジュール期間における制御偏差

図11が示すように、温湿度は、スケジュールに従って8月21日から9月3日の間で昇温、保温および降温状態に遷移した。その間における制御目標値に対する制御センサーの温度・相対湿度それぞれの偏差の最大値は温度で約0.7℃、相対湿度については約-1.8%であった。これらはいずれも機器の故障や制御用通信エラーの発生で変動したものであるが、短時間で復旧対応しているため覆い屋全体や建物の材への影響はほとんど無いと考えられる。また、それらを除いた処理スケジュール期間全体を通してみた場合、温度については±0.2℃以内、相対湿度については±0.2%以内で制御されていることから精度の高い温湿度制御ができたと考えられる。

### 4) トラブル事象 (加湿器の故障・停電事故)

今回の検証処理では図11中の①②において加湿器の故障が発生した。これにより、①の故障では相対湿度は2%程度の短時間変動、②の故障では対湿度0.5%程度の短時間の変動が生じた。しかし、これらは制御用コンピュータのモニター監視や装置巡視点検中に発見され、早期に発見と復旧によって最小限の変動に抑えられたと考えられる。

また図11の③では電力系統の落雷事故による停電が発生した。停電は数分後に自動復旧したが、それまでの間は温湿度制御システムの加温・加湿・冷却除湿・循環全ての機能が停止する事態となった。しかし、今回の検証処理で気密・断熱性能が十分であり、停電によって冷却除湿装置ファンが停止し、空気逃がし穴からの排気が無くなった事で覆い屋内の温湿度は維持された。

### 5) トラブル事象 (冷却能力不足)

図11の④では降温スケジュール途中で冷却能力が不足する事態が生じた。これは、今回の覆い屋の断熱強化によって覆い屋壁面・天井・地盤面から外部方向への放熱量が少なくなったことでヒーター出力を抑えられたが、その一方で出力を抑制するための調整幅がなくなり、降温途中でヒーター出力が0%となった為である。

ヒーター調整幅を確保するために、冷却除湿空気の風量を増やす対応を行った。しかし、風量を多くするほど除湿量は増え、また覆い屋空間内から空気逃がし穴を通して排出される水蒸気の量も増えるので、温度が下がると同時に相対湿度も下がる現象が生じた。これによって、ヒーターと加湿器両方の制御出力は上がるが、加湿器は高温蒸気を供給するため、相対湿度については目標値通りに調整されるものの、温度についてはヒーターと加湿器両方の出力によって目標値よりも若干高くなると考察し、次の対応を行った。

日中の外気温度が高く、また日射の影響を受けて温度が下げられない期間においては、温度を成り行きで常時監視しながら、木部の含水率が17%で維持するように相対湿度の目標値を手動で調整した。また、その対応期間中に覆い屋の屋根に対して遮熱シートを屋根全面に張り、水道水を屋根に直接散水する冷却対策をとった。日没後、外気や日射の影響を受けにくくなり、覆い屋内の温度は徐々に下がり始めた。温度が下がる事によって相対湿度を維持するために必要な加湿蒸気量は減り、これに伴う温度上昇が抑制された為、冷却除湿風量を徐々に増やして

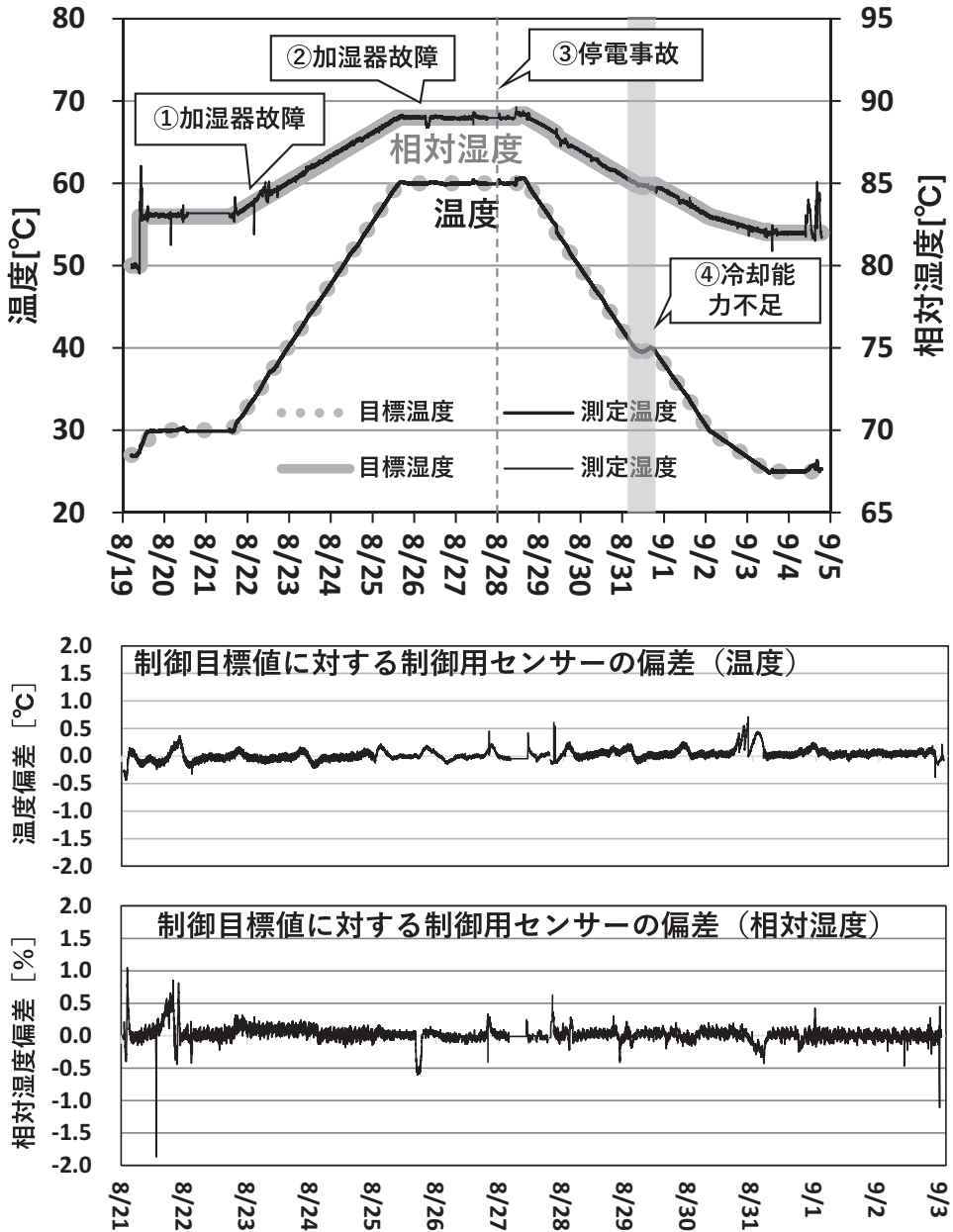


図11 温湿度制御データ

ヒーター出力の調整幅を再び確保した。

以上の対応により通常の自動制御で降温制御ができるようになり、本来の降温速度0.3125℃/hでの自動制御を再開した。

### 5-3. 覆い屋内の温湿度分布

覆い屋内の温湿度の分布とその時間変化を調べるため、高さ方向5箇所 (FL+100, 1700, 3400, 5100, 6100 mm) の各水平断面 (縦: A~G 列, 横: 1~6 列) に合計174個の温湿度センサーを取り付けた (ただし、一間社の屋根と干渉する位置 (FL+5100の C3, C4) および床下空間において他のセンサーと干渉する位置 (FL100の C3, C4, D3, D4) を除く)。また一間社の室内および床下空間の温湿度を測定するため、室内の上下2箇所に2個ずつ (①~④), 床下の上下2箇所に2個ずつ (⑤~⑧), 合計8個のセンサーを配置した (図12)。

#### 1) 空間全体の分析

覆い屋全体 (ただし足場の内側領域) が、適切に制御センサーと同様に精度高く制御されている事を確かめる。その際、覆い屋壁側周辺に配置されているセンサーについては、処理ユニットからの吹き出し空気や吸い込み空気の流れが大きく影響している領域であり、また建物には直接影響の無い領域であることから、これらを除いて評価を行った。本システムについては、昇温・保温・降温などの処理目的が切り替わった直後において変動しやすいため、各処理目的の変更時を起点に0分, 1分, 10分, 30分, 60分, 180分, 360分, 720分, 1440分, 2880分経過後の温湿度偏差について目標値に対する偏差を調べた。全てのセンサーは、各ステップの切り替え直後で変動が生じたが、30~60分程でその変動はセンサーの測定精度以下のレベルにまで減少し、安定することがわかった。しかし、十分に時間が経過した2880分後の偏差にはばらつきが認められた。最も大きな偏差は、温度については目標値に対して $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 程度、相対湿度については $\pm 4\%$ 程度であった。また水平断面の高さごとの平均値で見ると温度については $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度については $\pm 1.0\%$ であった。

#### 2) 一間社の建物内側と外側における温湿度挙動の分析

さらに一間社内部の温湿度挙動について調べた。一間社の建物内側三方向は壁で囲われており、その内部空間は空気の流れは小さい状況にある。これらを踏まえて一間社の建物内側、建物の外側周辺 (ただし足場の内側) および制御用センサーで計測した温湿度について目標値との偏差の時間変化を検討した。その際、制御用センサーと同じ高さにある FL+1700 の高さに設置されているセンサーに絞らされた。その結果を図13に示す。一間社の建物外側周辺については (図13□のプロット) 全体を通してほぼ制御センサーの動き (同図○のプロット) と概ね並行に推移しており、かつその差は僅少であった。この領域においては、精度の高い制御が行われていたと考えられる。

一方で、一間社建物内側の温度 (同図左側のグラフの△) については特に処理目的の変更直後に違いが認められた。その詳細は次のとおりである。昇温開始直後では制御センサー及び建物外側の周辺領域の温度については、偏差は上下に変動しながら30~60分間で目標値に近い値となって収束する動きとなったが、建物内側の空間においては、昇温直後から初期の偏差から負の方向の偏差へ推移し、そのままの状態安定した。また、60℃保持開始時後では、制御センサーと建物周辺側の空間においては一旦山なりに変動してから30~60分で収束し、安定した偏差となっているが、建物内部側の温度偏差は開始直後から元の偏差に戻りながら安定する動きとなった。

相対湿度の偏差 (同図右側のグラフの△) でみると、昇温開始直後の制御用及び建物外側領域においては、初期の時点で負の方向へわずかに変動してからその状態で安定し、そのどちらもほぼ平衡に推移し、また60℃保持時以降もどちらも安定して平行して推移した。

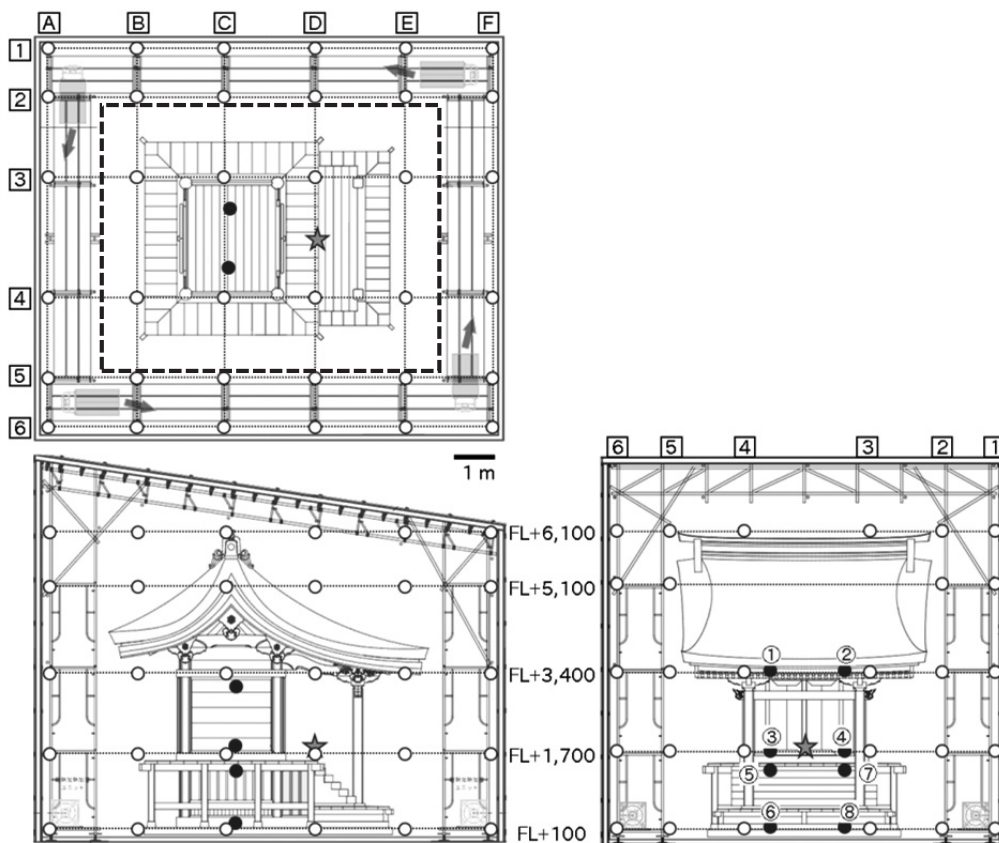


図12 温湿度センサーの配置

これらを総合すると、一間社の建物内側の温湿度は建物外側に対して遅れながら変化していると考えられる。なお、相対湿度が温度の増減と反対の動きになるのは環境内の絶対湿度が一般的な状況下で今回の温度が遅れて変動する事に連動する現象であると考えられる。

その一方で、建物の内側の空間温湿度は、変化の遅れで一時的に偏差は拡大するが、一時的なものであり、偏差値そのものは、平衡含水率に換算すると木材への影響は問題のない程度であり建物内部領域においても精度の高い温湿度制御がされていると考えられる。

なお、検証処理にあたり、検討段階から建物内側の空間においては空気が澁みそうであると想定していたため、建物内部に空気を循環させるファンの吸い込み側アルミホースを設置していた。しかしそれでも温度変化が遅れる結果となった。その要因としては、建物内部における空気の流れの他に、建物の材料が蓄熱し、これが一間社内側の空間温度に影響を及ぼしてした可能性もある。

#### 5-4. 殺虫効果発現温度への到達の確認

検証処理では、建物部材の内部まで目標温度に達している事を間接的に確認するため、300mm角のケヤキ材で、全面塗装したものと無塗装で木地面のままのものを準備し、これに穿孔を設け、熱電対を挿入した上で、覆い屋内に設置し、処理中の材内温度を測定した。具体的

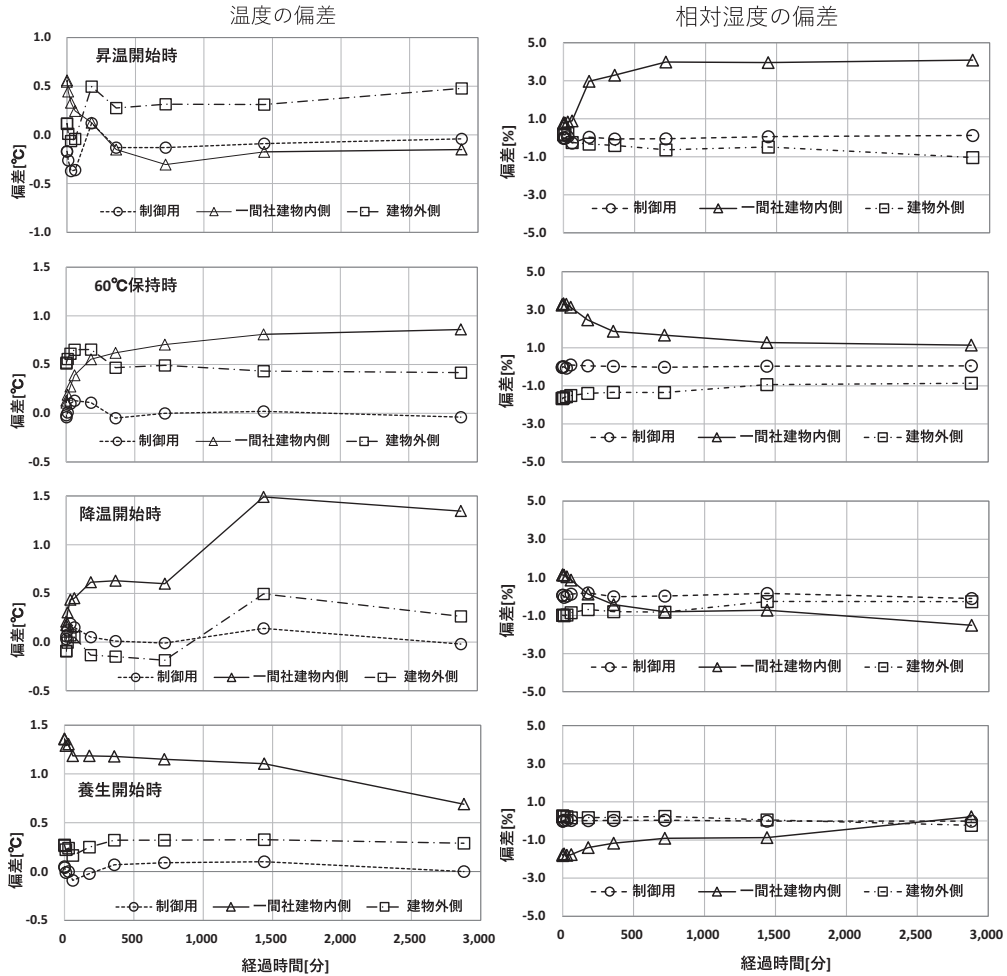


図13 FL+1700水平断面の温湿度の挙動

には、角材の片方の木口面の中央に1箇所の位置に深さ150 mm の孔を明け、さらにこれと側面までの距離の中点の位置にあたる2か所において同様に孔を明け、合計3つの孔に熱電対 (K種) を挿入し、材内温度を測定した。また相対する2つの表側面の中央にも熱電対をとりつけ、表面温度を測定した。またこの角材が長尺の柱の一部と同様の熱環境にあるとみなせるように材の両木口面は厚さ100 mm の発泡ポリスチレンで覆い断熱境界とした。熱電対の信号はデータロガーで10分毎に取り込み PC 上の専用ソフトウェア (DCS-100A, 共和電業製) で記録した。図14に測定結果を示す。材中心部温度は、甲虫駆除に必要な温度である60℃に達しており、漆材ではその状態が2日+14時間、無塗装材は2日+22時間にわたり保持されていた。

### 5-5. 消費電力量

本検証処理では、使用機器に電力計を設置し、消費電力を測定した。その結果を図15に示す。図はヒーター、加湿器、冷却除湿装置およびその他の機器について1時間ごとの消費電力量 (kWh) の時間変化を積み上げグラフとして示したものである。ヒーター、加湿器、冷却除湿



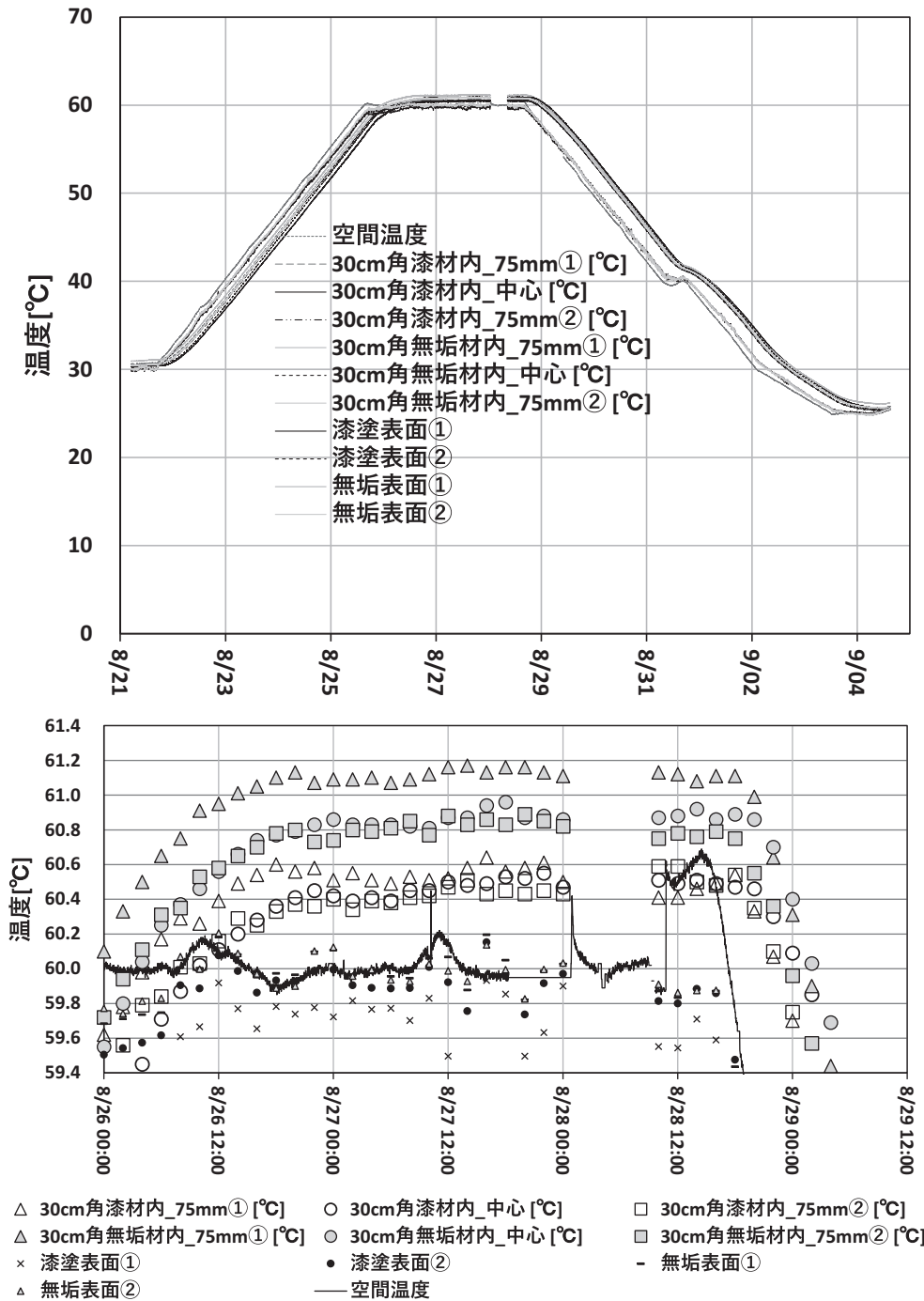


図14 漆・無垢材のデータ

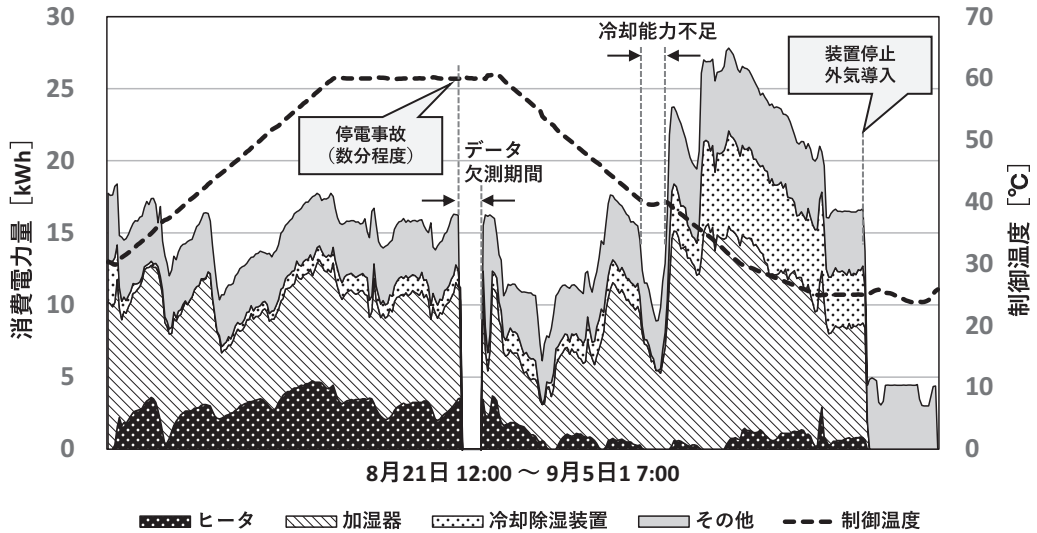


図15 消費電力量の推移

装置の値は複数のユニットの合計値で示している。

昇温過程では主に加温と加湿のための電力が消費されており、このことは概ね事前に予測されていた。ただしこの消費電力には、空気逃がし穴からの熱損失を補填する電力も含まれる。なお昇温時にも外気温度の変動に対応できるように加温・加湿装置だけでなく冷却除湿装置も稼働しており、そのための消費電力が生じている。さらに温度が上昇するにつれ、覆い屋内の圧力が大気圧よりも高くなり、覆い屋内の空気が冷却除湿装置内へ逆流しうる。これを防止するために冷却除湿装置から若干の空気を排出させており、そのための消費電力も生じている。

一方、降温過程では、60℃から下げ始める最初のうちは、冷却除湿装置からの空気量を増やさなくてもヒーター・加湿器の出力を下げるだけで、外気温度差である程度は下げられるが、途中から冷却除湿の風量を上げて冷却させる必要がある。降温期の消費電力は概ねこの過程で生じている。また検証処理では、断熱強化をしたことによって熱損失が減少した結果、外気温度が高い日ではスケジュール通りに温度や湿度が下げにくくなり、除湿のための消費電力が増大した。なお電力量データの欠測部分は、検証処理中に落雷とそれによる停電が原因となる計測機器の不具合の発生期間に相当する。実際の停電期間は数分程度であったが、設備の復旧対応の後に計測機器類の復旧を行ったため欠測が生じた。

### 5-6. 覆い屋内外の騒音レベル

処理期間中の覆い屋内外の騒音レベルを普通騒音計（測定範囲 30 dB～130 dB, 周波数 31.5 Hz - 8.5 kHz）で測定した。測定位置は、覆い屋内と外の南面と北面の合計4か所とした。処理期間中の騒音レベル平均値は、覆い屋南面外が68 dB (A), 南面内が84 dB (A), 北面外が60 dB (A), 北面内が79 dB (A)であった。覆い屋外は内部より約20 dB低い値であり、断熱覆い屋によって騒音レベルは軽減されていた。

## 6. まとめ

湿度制御温風処理による木造建造物の加害昆虫の殺虫手法について、これまでの基礎研究や

開発、実験室実験や建造物の2例をふまえて、より実用化にむけ、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例目となる検証処理を行い、その性能を評価した。また気密・断熱覆い屋の気密・断熱性能、騒音などの環境影響や消費電力量などの検討も行った。

温湿度制御については、製作した装置と制御プログラムによって、スケジュール通りの温湿度制御が実施されたことを確認した。また処理中に機器故障や停電事故が発生したが、適宜対応することで処理に問題は生じなかった。さらに降温過程において冷却能力が不足する事態が生じたが、処理スケジュールの変更等の対応により目的通りの温湿度制御を行う事ができた。また断面30 cm 角のケヤキ製試験体の内部温度も殺虫に必要な温度である60℃まで加温されることが明らかになった。

空間温湿度の制御性能の評価では、昇温・60℃保持・降温それぞれの開始段階における温湿度について目標値との偏差や水平断面内において建物の内外の温湿度挙動の違いについて分析と考察を行った。その結果、偏差の経時変化はわずかで概ね許容範囲内であることがわかった。

今回の検証処理では、近隣への配慮のため騒音が発生する発電機を用いずに保存会事務所用の電源設備を利用した。その際電源容量を踏まえた覆い屋の気密・断熱設計を行った結果、断熱・気密性能の向上、消費電力量の抑制や騒音低減について十分な効果が得られ、実用性かつ汎用性の高い手法が実現した。

一方、高断熱仕様となったことによって、降温処理過程での装置間の出力連携において課題が明らかになった。今後は制御出力データや関係する計測データを分析し、制御手法のさらなる改良や冷却加湿方式の採用等システムの改良が必要である。しかし、温湿度制御システムや覆い屋等の改良検討の都度、大掛かりな実験室実験や実際の建造物を用いての検討は簡単に実施する事はできない。そのため机上レベルで検討が行える再現性の高いシミュレーションモデルを構築する事が求められる。また、今回の検証処理では空間内の温湿度が一様となるための制御目標値を設定したが、建物によっては平常時に建物の上下間で含水率分布に大きな差が生じている場合が考えられる。殺虫を確実にを行うためには空間内の温度は60℃一様としなければならないが、その条件下で平常時の建物の含水率分布に平衡する相対湿度を制御するためのより高度な制御手法の検討が今後の課題となる。

## 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) 藤井義久：建造物の生物劣化とその診断について，月刊文化財 709, pp. 12-17 (2022)
- 2) 藤井義久，藤原裕子，木川りか：伝統的木造建築の屋根部にみられる生物劣化の特徴，保存科学 52, pp. 249-258 (2013)
- 3) 原田正彦，木川りか，小峰幸夫も藤井義久：重要文化財輪王寺本堂の大規模被覆ガスくん蒸一実施までの経緯の概要一，保存科学 53, pp. 215-224 (2014)
- 4) Thomas, J. Strang; A review of published temperatures for the control of pest insects in museums, Collection Forum 8, 41-67 (1992)
- 5) Kneppel, B. : Schaedlingsbekämpfung an textile Kuturgut unter Einsatz hoher und tiefer Temperaturen. Untersuchungen zur Auswirkung auf Wolle und Seide, Kölner Beitrage zur

- Restaurierung und Koservierung. Kunst- und Kulturgut, Band 2. (1995)
- 6) Thomson, R. S. : The Effect of the Thermo- Lignum Pest Eradication Treatment on Leather and Other Skin Products. In: Post prints of the fourth Interim Meeting of the ICOM Committee for Conservation Working Group 10, Conservation of Leathercraft and Related Objects, 5-8 April 1995 in Amsterdam. Amsterdam: Netherlands Institute for Cultural Heritage (1995)
  - 7) Leary, P. : The eradication of insect pests in buildings. The Building Conservation Directory, 67-69 (2002)
  - 8) Ackery, P., Pinniger, D., Doyle, A., Roux, K. : Heat treatment of entomological drawers using the Thermo Lignumregister<sup>®</sup> heat process. Collection Forum, 19(1-2): 15-22 (2005)
  - 9) Beiner, G. G., and Ogilvie, T. M. A. : Thermal methods of pest eradication: their effect on museum objects. The Conservator 29(5): 5-18 (2005)
  - 10) Nordt, U. : Holzzerstörende Insekten. Befallsmerkmale, Monitoring, Langzeituntersuchungen und Begleitung von Bekämpfungsmassnahmen in historischen Gebäuden, Forschungs Bericht, 33-37 (2006)
  - 11) Rotberg, W., Gagelmann, M., Piening, H., Sieke, R. W., Michaelis, S., Wilke, N., and Roux, K. : First results of a pilot decontamination in a PCP polluted building by means of a humidity controlled thermal process. [online] Available at <https://cool.conservation-us.org/byauth/gagelmann/gagelmann.html> (2007) [Accessed 19 June 2019]
  - 12) Tscherne, F., Schachenhofer, B., and Roux, K. : Research study on the effects of the Thermo Lignum<sup>®</sup> Warm air treatment on art objects with paint and gilt finishes. Paper delivered at the Cost Conference in Braga, Portugal, 5-7 November 2008 (2008)
  - 13) Tscherne, F. : Anwendbarkeit einer feuchtgeregelten Warmluftbehandlung mit dem Thermo Lignum<sup>®</sup> Verfahren zur Schädlingsbekämpfung an historischen Kunstobjekten aus Holz mit Farb- oder Goldfassung. Holzforschung Austria, 1-60 (2008)
  - 14) 竹口彩, 藤原裕子, 藤井義久, 木川りか, 佐藤嘉則, 古田嶋智子, 犬塚将英 : 湿度制御した温風処理による漆仕上げ材の表面ひずみの測定, 保存科学 56, pp. 165-174 (2017)
  - 15) Fujii, Y., Harada, M., Kitahara, H., Fujiwara, Y., Kigawara, R., Sato, Y., Komine, Y., Inuzuka, M., Kotajima, T., Hidaka, S., Saito, A., Fukuoka, T. : 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)
  - 16) 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)
  - 17) 藤井義久 : 虫害対策の新技术開発 湿度制御温風処理法, 月刊文化財 706, pp. 36-37 (2022)

キーワード : 生物劣化湿度制御温風処理 (Humidity-controlled warm-air treatment) ; 木造建造物 (Wooden buildings) ; 温湿度制御 (Control of temperature and humidity)

# Eradication of Beetles Damaging Wooden Structures by Humidity-Controlled Warm-Air Treatment (1): Performance of Temperature and Humidity Control

SHIMADA Masanori<sup>\*</sup>, KONDO Shuhei<sup>\*</sup>, KITAHARA Hiroyuki<sup>\*\*</sup>,  
HARADA Masahiko<sup>\*\*\*</sup>, FUJIWARA Yuko<sup>\*\*\*\*</sup>, OGURA Daisuke<sup>\*\*\*\*\*</sup>,  
SATO Yoshinori and FUJII Yoshihisa<sup>\*\*\*\*</sup>

Humidity-controlled warm-air treatment for the eradication of wood boring insects was applied to a Shinto-shrine type wooden building in Nikko, Japan, in the period from July to September 2022. The performance of the developed treatment device and control program was evaluated. The building was covered with air-tight and thermal isolation walls and a roof consisting of double-layered polystyrene boards sandwiched by 12 mm thick plywood and PVC film. Four treatment units consisting of a fan, a heater, and a steam sprayer were installed in the covering house, from which the humidity-controlled warm air was generated and circulated. Another duct conveying the cooling and dehumidifying air was attached in front of the fan. The volume of the treatment space was about 700 m<sup>3</sup>. According to the measurement of the moisture content of the wooden building, it was clarified that the target moisture content to be kept constant in the treatment should be 17%. In order to keep the equilibrium moisture content of 17%, the temperature and relative humidity of 27°C and 83% at the start of the treatment was increased gradually up to 60°C and 89% in the period of four days, then kept constant at these values for about two days, and finally decreased down to the initial values for four days. The temperature and relative humidity in the insulation house were correctly controlled, so that the difference between the scheduled temperature and relative humidity and the actual measured ones was small. The consumed electric power and the noise level in and outside of the house were also measured and found to be under acceptable limit values.

---

<sup>\*</sup>The Kansai Electric Power Co., Inc

<sup>\*\*</sup>Total System Laboratory

<sup>\*\*\*</sup>Association for the Preservation of Nikko World Heritage Site and Temples

<sup>\*\*\*\*</sup>Graduate School of Agriculture, Kyoto University

<sup>\*\*\*\*\*</sup>Graduate School of Engineering, Kyoto University