

〔報告〕 漆塗り工芸品の湿度制御温風処理におけるひずみ・温度・色の変化 —模擬試験体と鏡の例—

島田 正理*・近藤 修平*・原田 正彦**・
藤原 裕子***・藤井 義久***・佐藤 嘉則

1. はじめに

文化財に対する虫害対策として、これまで主に歴史的建造物を対象に湿度制御温風処理が実施されてきた。この手法は化学薬剤を使用せずに木材内部の害虫を安全かつ効果的に殺虫できる技術として確立している¹⁾²⁾。

一方、美術館・博物館などの収蔵品に対する殺虫処理では、長年にわたり燻蒸剤エキヒュームSが広く用いられてきたが、製造・供給の終了により今後の継続使用が困難となった。そのため、化学薬剤に依存しない安全かつ再現性の高い殺虫処理技術の確立が急務となっている。このような背景を受け、著者らは、木造建造物で実績を積んできた湿度制御温風処理技術を木製の美術工芸品などの文化財へ応用する試みを実施している。

木製の美術工芸品に限っても、種類、材料や仕上げは多様であるが、ここでは全面あるいは部分的に漆塗りを施された工芸品を取り上げた。漆塗膜および木地は、温湿度の変化に応じてそれぞれ固有の膨張・収縮特性を示す。その結果、表面層付近での割れや剥離などの発生が懸念される。また温度変化による色調の変化にも留意しなければならない。しかし、湿度制御温風処理を漆塗り工芸品に適用した際の挙動を体系的に評価した研究はこれまでほとんどなく、本手法の適用条件には未解明な点が多い。

化学薬剤を使用しない湿度制御温風処理法を、美術工芸品に適用するためには、温湿度変化の影響を受けやすい漆塗り工芸品などへの適用を通じて、手法の有効性や安全性を確認する必要がある。そこで本研究では、限定的ではあるが、2種類の漆塗り工芸品に湿度制御温風処理を適用し、その影響を、表面ひずみ、内部・表面温度や色差の観点から検討した。

2. 湿度制御温風処理の概要および本研究の進め方

湿度制御温風処理は、害虫がタンパク質の変性によりおよそ60℃で死滅するという知見に基づく手法である。加湿した温風を対象物の周囲空間に循環させる際には、装置から出された風が直接対象物に当たらないよう配慮し、その温湿度を均一に保ちながら徐々に升温する。この過程では、木材の割れや反りが生じないよう、内部の含水状態を一定に保つことが重要とされている。

建造物を対象とした既往の湿度制御温風処理では、升温・降温の速度や60℃保持時間などが基礎実験により検討され、木材への影響を最小化しつつ確実に殺虫できる条件が確立されている¹⁾²⁾。処理システムは、送風・加温・加湿・冷却除湿の各機能を組み合わせ、処理空間内の温度および相対湿度を一定に保つ構造を有している。これにより、対象物全体に均一な環境を付与し、内部まで安定して熱を伝えることが可能である。

*関西電力、**日光社寺文化財保存会、***京都大学大学院農学研究科

本研究では、これらの処理環境を模擬する目的で恒温恒湿槽を用いた。恒温恒湿槽では、建造物処理で用いられるシステムほど精密な制御は行えないものの、槽内の気流抑制等の工夫を施すことで温度および相対湿度を一定範囲で概ね再現した制御が可能である。これにより、漆塗り工芸品に対する湿度制御温風処理の適用性を評価するための基礎的な実験環境を構築した。なお、本研究で用いた昇温速度や60℃保持時間の設定は、既往研究で得られた知見に基づき、材料への影響を抑えつつ安全に処理を行える範囲で決定した³⁾。

以上の処理環境を前提として、本研究では、恒温恒湿槽を用いた環境において、漆塗り工芸品に対する湿度制御温風処理の適用性を評価した。実験は二段階の構成とし、まず部分的に漆塗りで仕上げた三角柱試験体（模擬試験体）を用いて基礎的検討を行い、その後、実際の漆塗り工芸品（鐙）を対象に処理の影響を確認した。

このように構築した試験体系に基づき、具体的な実験条件や測定手法および使用した試験体の詳細については、次章以降で述べる。

3. 模擬試験体を用いた湿度制御温風処理実験

3-1. 模擬試験体

本研究で用いた模擬試験体は、図1に示す直方体のヒノキ材（寸法：縦100 mm × 横200 mm × 高さ300 mm）で、新材を用いて作成し、下半分に漆を施したものである。試験体は図中の点線に沿って切断して作製した。漆の断面構造について図2-aに示す。漆塗りは、木地面に対する初回の塗装（地付、切粉下地、錆下地、中塗、上塗）に加え、その後の塗り増し工程（布下地付、布着、地付、切粉下地付、錆下地付、中塗、上塗）を経ており、これらの工程により形成された漆塗膜の総厚は約3.2 mmである。切断後の試験体は、図2-bに示すように、底辺約140 mm、高さ約70 mmの直角二等辺三角形断面をもつ三角柱となる。便宜上、同図において左手前の側面を表、右手前の側面を裏と定義した。試験体の外観を図2-cに示す。試験体は計4個であり、三角柱側面の表側における漆の有無、ならびに三角柱側面の表面および裏面における木地面の木取り方向（柁目（R面）および板目（T面））の組み合わせ条件に基づき、試験体A、B、C、Dと区別した。本節では、各試験体の概略のみを示す（試験体の詳細は後述する）。以上のように、塗膜の有無（漆面／木地面）と木目の条件を組み合わせた4種類の試験体を準備することで、湿度制御温風処理に対する挙動の違いを比較可能とした。なお、これらの模擬試験体は2013年に日光社寺文化財保存会にて製作され、本研究に提供いただいたものである。製作後は、直射日光の当たらない室内環境において保管されていた。試験開始前の目視観察においては、漆塗膜および木地に剥離、割れ、浮きなどの顕著な破損は認められず、漆塗膜の白化など、紫外線劣化を示す明確な兆候は確認されなかった。以上のことから、これらの試験体を、外観上ほとんど劣化していない状態の試験体として取り扱った。また、本研究で使用した三角柱形状の試験体は、もともと別の実験用に作製されたものであり、本報告で扱う実物の漆塗り工芸品とは形状が異なるが、基礎的検討のために流用したものである。

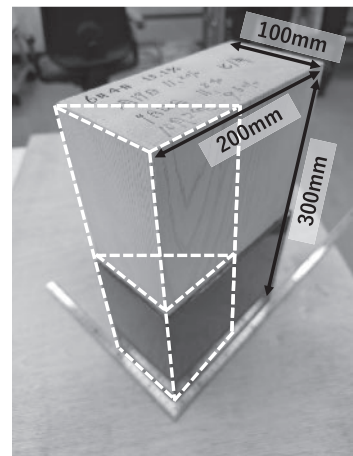


図1 下半分に漆が施された直方体のヒノキ材

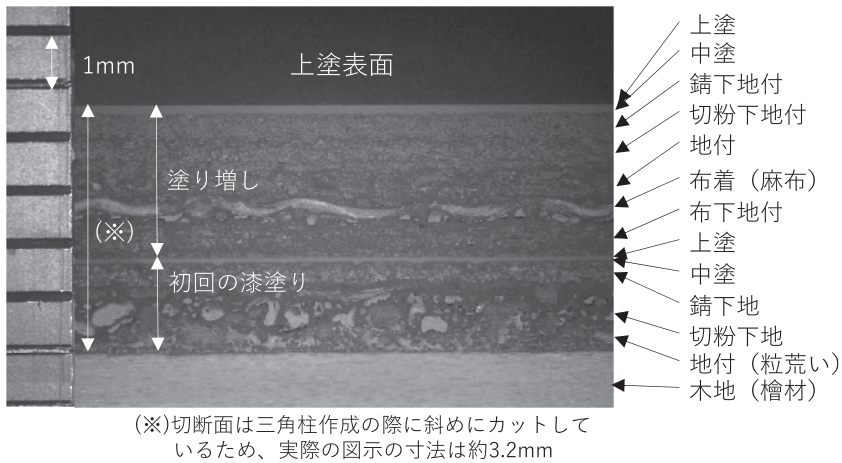


図2-a 模擬試験体の漆断面構造

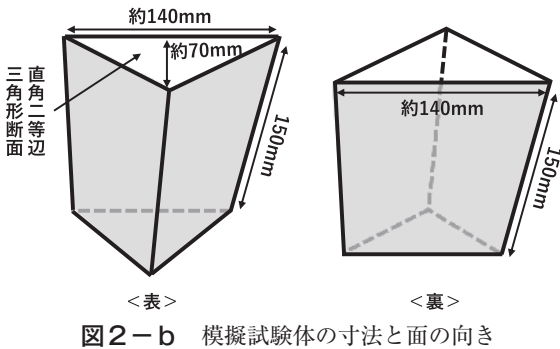


図2-b 模擬試験体の寸法と面の向き

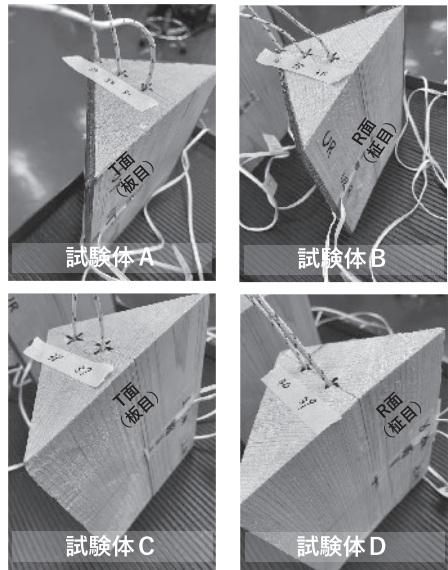


図2-c 模擬試験体外観（熱電対取り付け作業中）

3-2. 測定および処理方法

3-2-1. 熱電対による温度測定

各模擬試験体には、内部温度を計測するための熱電対を設置した（詳細は後述する図6参照）。熱電対は三角形断面側（木口面）に穴をあけて試験体内部に挿入し、外気や水分の侵入を防ぐために挿入孔は酢酸ビニル樹脂系エマルジョン形接着剤で封鎖するとともに、上下の木口面にはアルミテープを貼付し、断湿処理およびスタイロフォームによる断熱処理を施した。これにより、三角柱側面は恒温恒湿槽の空气にさらされる状態としつつ、木口面からの熱や水分の影響を最小限に抑えるようにしている。

熱電対の配置は、漆が施された試験体 A、B については、図6に示す三角形断面上の頂点か

ら底辺に向かって順に、「表面1 (漆)」、「内部 (漆)」、「内部1」、「内部2」、「表面2 (木地)」と称した。一方、漆が施されていない試験体 C、D については、同図の三角形断面上の頂点から底辺に向かって順に、「表面1 (木地)」、「内部1」、「内部2」、「表面2 (木地)」と称した。なお試験体 A、B の「内部 (漆)」は、漆塗膜面の表裏における温度挙動を把握する目的で、漆層裏面直下に設けた測定点である。

試験体側面の表面および裏面温度の測定には T 熱電対を、内部温度の測定には K 熱電対を用いた。これは、設置位置や配線条件を考慮し、施工性の観点から選択したものであり、温度測定特性の違いを意図した使い分けではない。

各熱電対からの信号はリード線を介してデータロガー (UCAM-550A、共和電業) に入力し、サンプリング周期1分で連続的に記録した。

3-2-2. ひずみゲージによる表面ひずみ測定

ひずみゲージの設置箇所を図3に示す。使用したひずみゲージは一般用ひずみゲージ (KFGS-5-350-C1-11) であり、結線方式は2線式とした。4つの試験体それぞれについて、表面および裏面に各1箇所ずつ、木材の繊維方向に直交する向きで、シアノアクリレート系接着剤を用いて貼り付けた。これにより、計8箇所の計測点 (A1、A2、B1、B2、C1、C2、D1、D2) を設定し、各面における温度およびひずみ挙動の比較が可能な配置とした。

ひずみゲージからの信号はリード線を介してデータロガー (UCAM-550A、共和電業) に入力し、サンプリング周期1分で連続的に記録した。

なお、各計測点間のひずみデータを相対的に比較可能とするため、すべてのひずみゲージについてリード線長を5 mで統一した。また、恒温恒湿槽内に配置するリード線は極力短くし、実験室内の環境温度が概ね一定となるよう配慮した。これらの測定条件の概要を表1に示す。

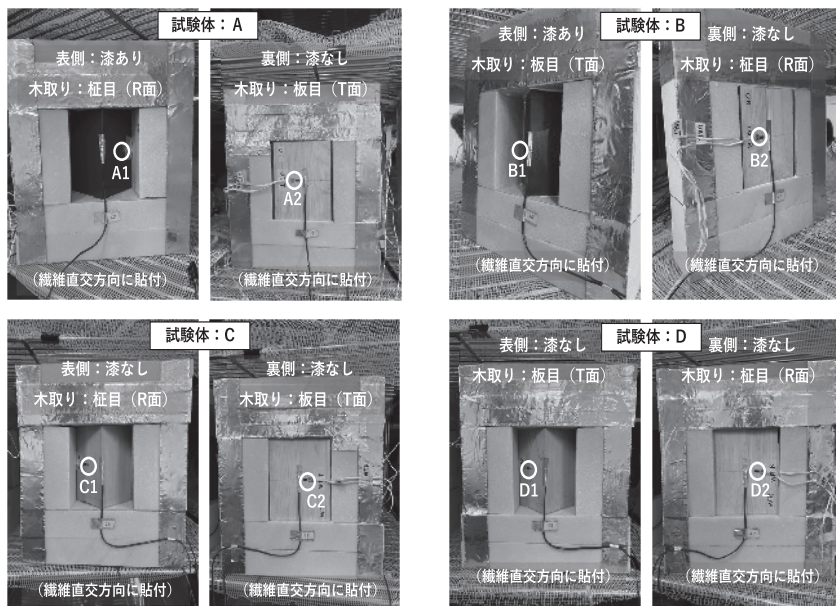


図3 模擬試験体のひずみゲージ設置箇所

表1 ひずみゲージの条件表

称号No.	ゲージ貼付面	漆有無	木取り
A1	表側	漆あり(塗膜面)	柁目(R面)
A2	裏側	漆なし(木地面)	板目(T面)
B1	表側	漆あり(塗膜面)	板目(T面)
B2	裏側	漆なし(木地面)	柁目(R面)
C1	表側	漆なし(木地面)	柁目(R面)
C2	裏側	漆なし(木地面)	板目(T面)
D1	表側	漆なし(木地面)	板目(T面)
D2	裏側	漆なし(木地面)	柁目(R面)

3-3. 恒温恒湿槽内への試験体設置

試験体4体はまとめて恒温恒湿槽内に設置した(図4-a)。槽内の空間気流が滞留しないよう、試験体は図4-bに示すように、左側空間、中央空間、右側空間に分けて配置し、各空間で気流がほぼ同等となるようにした。さらに、各試験の表面および裏面(ひずみゲージ貼付面)に対して気流が直接向かないよう、試験体の長手方向(長辺方向)を槽内気流方向に揃えて配置し、空間の温湿度の均一性を確保した。気流のイメージを側面から示したものを図4-cに示す。

また、各試験体の三角中側面の表面が槽中央に向くように配置することで、試験体間で温湿度変化が大きく偏らないよう配置した。この配置により、各試験体のR面およびT面が槽内条件の影響をほぼ同等に受けるようにした。

3-4. 温湿度制御と処理スケジュール

本研究の温湿度制御には木材の平衡含水率曲線を用い、平衡含水率曲線上の3点(A: 24℃/55% RH、B: 45℃/60% RH、C: 60℃/65% RH)を結んだ直線に沿って昇温・降温を行う補間制御とした(図5)。この方式により、温度変化に応じて相対湿度を連動させ、木材の平衡含水率が大きく変動しない条件を維持した。

試験体は、実験実施前まで実験施設の建屋内において約3か月間保管されていた。保管期間中、建屋内はセントラル空調および個別空調による断続的な空調制御下にあり、温湿度は成り行き条件で推移していた。実験直近1か月間の平均温湿度は28.7℃/57% RHであり、保管期間全体の平均温湿度は30.1℃/55% RHであった。これらの条件はいずれも、図5に示す平衡含水率曲線上の3点(A、B、C)を結んだ直線付近にプロットされており、試験体は当該条件に対応する含水状態にほぼ平衡していたものとみなした。

実験時には、ひずみデータの測定誤差を小さくするため、実験室内の空調を連続運転とし、室温が概ね24℃~25℃となるように維持した。相対湿度については成り行き条件としたが、実験開始時の温湿度は概ね24℃/55% RHであった。このときの試験体の含水状態も保管時と概ね同程度であると判断されたことから、図5に示すA、B、Cの各点を結ぶ昇温スケジュールに従って実験を実施した。

昇温速度の設定には北原らによる木材の昇温挙動に関する検討³⁾を参考とし、同検討が示す木材内部の温度追従特性に基づいて、本実験条件における内部温度の上昇挙動を大まかに予測した結果、昇温速度を3℃/hとした。

さらに、この内部温度予測をTom Strangによる殺虫時間計算式⁴⁾(多くの甲虫類は54.5℃以上で約60分の曝露により死滅するとされる)と照合し、試験体内部が確実に致死条件を満た



4-a 恒温恒湿槽内に試験体を設置した様子

吹き出し口・吸い込み口側

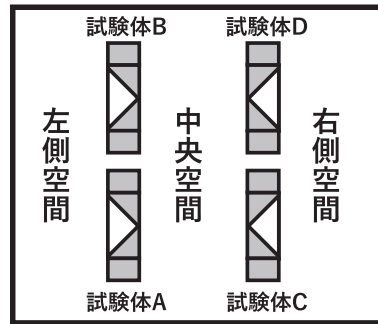


図4-b 試験体設置位置と方向（上から見た図）

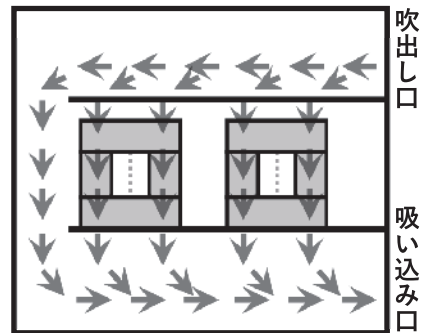


図4-c 気流のイメージ（側面から見た図）

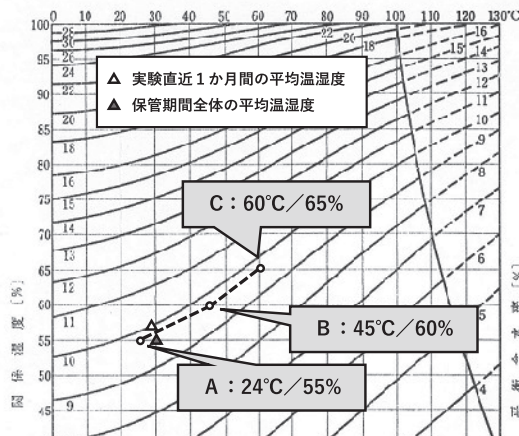


図5 平衡含水率曲線と制御目標

す温度条件として、最高温度60℃で1時間保持する設定を採用した。

1サイクルの処理は、24℃/55% RH から昇温を開始し、45℃/60% RH を経て60℃/65% RH へ到達後、1時間の保持を行い、その後再び24℃/55% RH まで降温し、到達後もしばら

く同条件を維持する流れで構成した。この一連の処理を48時間で1サイクルと定義し、同サイクルを3回繰り返して、繰り返し処理が試験体の温度・ひずみ挙動に及ぼす影響を評価した。

3-5. 実験結果

3-5-1. 内部および表面温度

各試験体に設置した熱電対による内部および表面の温度計測の結果を図6に示す。いずれの試験体でも表面温度に対して約2~3℃の遅れを伴いながら内部温度が上昇した。内部の最高到達温度は約59℃以上であり、甲虫類の致死条件とされる約54.5℃以上・60分の条件を十分に満たしていた。

漆塗り試験体 A、B においては、表面1（漆）と内部（漆）の温度差は小さく、内部（漆）が表面1（漆）よりわずかに遅れて追従する程度で、ほぼ同等の温度推移を示した。また、恒温恒湿槽内の位置により若干の温度ムラが生じ、制御温度より内部温度がやや低めとなる傾向が確認されたが、いずれも昇温スケジュールには概ね追従していた。

以上より、本実験は、いずれの試験体でも内部温度が十分に殺虫条件を満たす状態で実施され、得られたひずみデータは、処理条件が成立した状態における木材および漆塗膜の応答として評価した。

3-5-2. 表面ひずみ

各試験体における温湿度処理中のひずみ変化を図7に示す。いずれの試験体においても、昇温時には引張、降温時には圧縮となる共通した挙動が確認された。

漆面（A1、B1）の1サイクルあたり約1,300~1,500 $\mu\epsilon$ の変化幅に比べ、木地面（A2、B2、C1、C2、D1、D2）の変化はより大きく、1,500~2,300 $\mu\epsilon$ 程度で変動した。また、いずれの木地面においても、1回目の昇温時のひずみ変化は、2回目・3回目の処理に比べて挙動に差がみられた。さらに、処理を繰り返すごとに、木地面のいずれにおいてもひずみが徐々に圧縮側へ移行する傾向がみられた。この現象は漆面の A1、B1 でもわずかに生じていた。

実験後の試験体曝露期間中には、繰り返し処理による圧縮側へのひずみは経過日数とともに徐々に引張側へ移行する傾向が観察された。これらの事象については次節で考察する。

3-5-3. 外観の変化

処理前後の目視による外観調査の結果、模擬試験体の各部位に顕著な変化は確認されなかった。試験体 A および B の漆面は光沢や亀裂の変化は見られず、剥離も確認されなかった。外観は維持されていた。また、試験体 A、B、C、D のいずれの木地面においても、処理による新たな亀裂や損傷の悪化は生じなかった。

3-6. 考察

まず、塗膜面よりも木地面のひずみ変化が大きくなった点について考察する。

木地面においては、温度変化による線膨張と含水率変化による膨潤・収縮の双方がひずみに影響する。湿度制御温風処理は原理上、含水率を概ね一定に保ちながら温湿度を制御するため、ひずみの大部分は温度変化による線膨張であると考えられる。しかし、昇温・降温時には材内部への熱や水分の移動に遅れが生じることが避けられず、表層付近ではわずかな含水率分布が生じ、それに伴うひずみも加わると考えられる。

一方、塗膜面においては、漆単体の線膨張係数や含水率変化に伴う膨潤・収縮の性質は今回

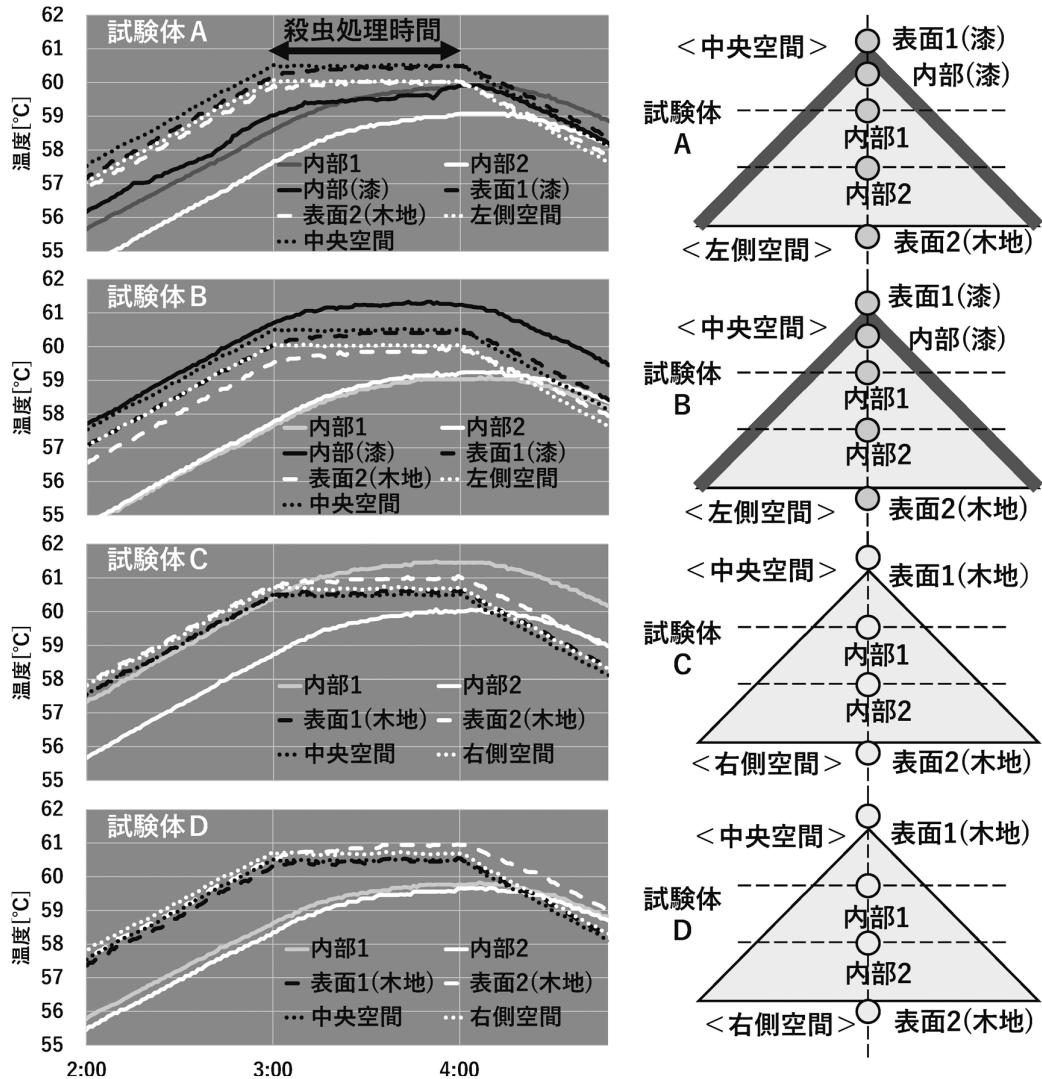


図6 模擬試験体 内部および表面温度

の漆では不明であるものの、塗膜は木材よりも薄く、木地に密着している。そのため、漆自体が木材より大きく変形することはないと仮定すると、漆面で観測されるひずみの多くは、木地表面の温度変化によって生じるひずみが表層に反映した結果と考えられる。さらに、竹口ら、Kamiyoshi および Obataya らの研究により、漆塗膜は水分移動を完全に遮断するものではないものの、木地面と比べて水分移動を緩和または遅延させる性質があることが示されている。⁵⁾⁶⁾⁷⁾。ただし、漆塗膜の透湿性は塗膜の状態や厚みによって変化する可能性があり、その影響については十分に明らかにされていない。このことから塗膜で被覆された木材では、吸湿・放湿に伴う含水率変化の進行が抑制され、結果として水分変動に起因するひずみが木地露出面に比べて小さくなると考えられる。

ここで、模擬試験体（損傷の無い新材）について、観測されたひずみ量の大きさについて検討する。木地面および塗膜面のいずれにおいても、温湿度変化の影響を最も強く受けるのは表

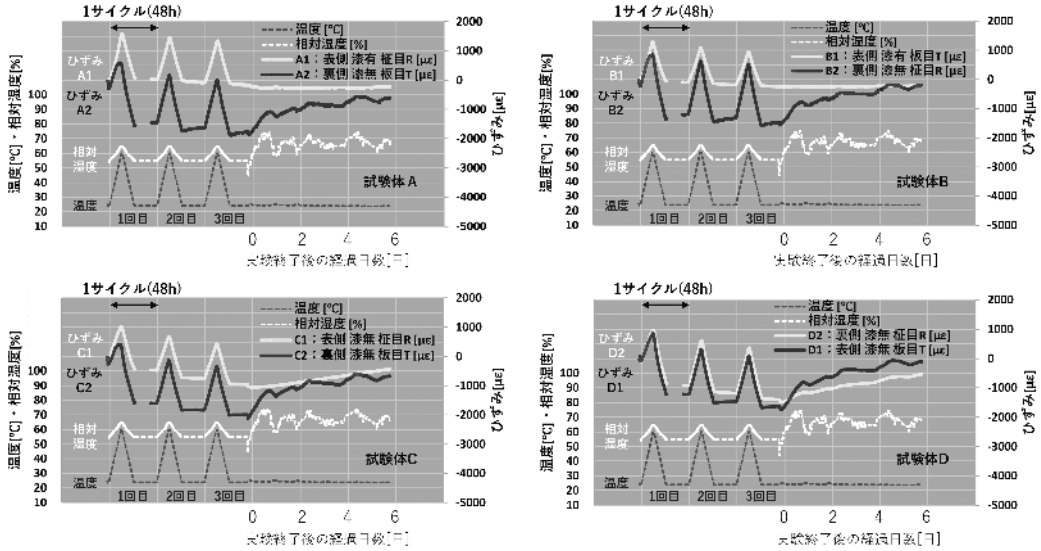


図7 模擬試験体 実験結果

面近傍であり、本研究ではその表層近くのひずみを測定している。既往の文献によれば、木材の破壊ひずみは約7,000～10,000 μm とされているが⁸⁾、模擬試験体で観測されたひずみはいずれもその数分の一程度である。また、漆塗膜は木の伸縮に追従して変形すると考えられ、今回の健全な模擬試験体を用いた実験で観測されたひずみ範囲においては、塗膜自体が破断や剥離に至る可能性は低いと推察される。以上より、模擬試験体については、湿度制御温風処理中に破壊が生じる可能性は小さいと考えられる。

さらに、模擬試験体における柎目と板目の違いについても考察する。木材の繊維直交方向の線膨張係数は、柎目が約 $20\sim 40 \times 10^{-6}/\text{K}$ 、板目が約 $30\sim 50 \times 10^{-6}/\text{K}$ とされ⁹⁾、板目の方がやや大きい。また、膨潤率も板目の方が柎目よりやや大きいとされる。湿度制御温風処理中に観測されたひずみ変化は、温度変化による線膨張の影響が大きく、この係数の違いにより柎目と板目で差が生じたと考えられる。

実験終了後の過渡的变化をみると、板目は湿度変動に伴うひずみ変化幅が比較的大きかったのに対し、柎目はやや緩やかであったことから、線膨張係数や膨潤・収縮率が影響していると考えられる。ただし、試験体BのひずみB2（漆なし、柎目）については、他の板目とほぼ同様の変化が観測されており、この理由については明確ではない。

次に、1回目の昇温時の木地面のひずみ変化は、2回目・3回目に比べて挙動に差が見られた点について考察する。試験体は実験開始前、日光社寺文化財保存会より提供され、長期的に日光現地で保管されていた。日光の環境は実験室環境より相対湿度が高く、前節で示した実験室での保管状況を踏まえると、試験開始時点の試験体内部の含水率は実験室の平衡含水率よりも高かった可能性がある。また、模擬試験体はこれまで湿度制御温風処理の履歴がなく、保管環境下で形成された残留ひずみが初回処理時に開放されたことにより、ひずみの挙動が他の処理回とは異なると考えられる。過去の実証試験でも同様の現象が確認されており²⁾、本試験結果も同様の状況と捉えられる。

処理を繰り返すごとに、塗膜面・木地面のいずれにおいてもひずみが徐々に圧縮側へ移行した点については、前述の初期含水率の影響が残っており、温風処理は相対的に乾燥方向へ作用

したことが一因であると考えられる。

実験終了後にひずみが引張側へ移行したのは、試験体を実験室内の温湿度環境下（温度は概ね24～25℃維持で湿度は成り行き）に曝露したことによって徐々に実験室の湿度変動に連動して変化したものであると考えられる。

建造物の場合、木材は外気に曝されるため、年間を通じた湿度変動によるひずみは湿度制御温風処理時の変化よりも大きいことが過去の実証試験から明らかとなっている²⁾。一方、美術工芸品は収蔵庫などの温湿度が概ね一定に保たれた環境で保存されているため、年間を通じてのひずみは建造物のそれに比べて小さいと考えられる。この場合、湿度制御温風処理によるひずみ変化は保管状態に比べて大きくなる場合もあり、このひずみ変化が許容範囲内かどうかは、今後慎重に検討する必要がある。しかし、今回の試験結果では外観上の異常は認められず、処理後にはひずみが回復することも確認された。

以上の結果を踏まえ、実際の漆塗り工芸品への湿度制御温風処理を実験的に実施し、その影響を評価することとした。

4. 漆塗り工芸品を用いた湿度制御温風処理実験

本節では、模擬試験体で得られた知見を実物の漆塗り工芸品へ適用し、湿度制御温風処理が実物に与える影響を評価する。対象としたのは、日光東照宮の祭事において用いられてきた漆塗り馬具（鐙）である。これらの鐙は、寛永13年（1636年）の大造替時に製作されたと推定され、その後、年2回の祭事において使用されてきたことから、延べ約780回程度使われていたと考えられる。使用されない期間は日光東照宮下神庫にて管理されている。鐙は騎乗者の足を載せるための馬具で、木地に漆塗りが施されている。

本実験では、形状は概ね同じであるものの漆色が異なる2種類の鐙を用いた（図8）。便宜上、鐙の一方を鐙X、他方を鐙Yと称する。鐙は同様に仕上げた2体を一对として用いるが、それぞれの対の片方の鐙にのみ湿度制御温風処理を施し、残りの片方は色差計測に供するため未処理のまま保持した。以下に各鐙の詳細を示す。

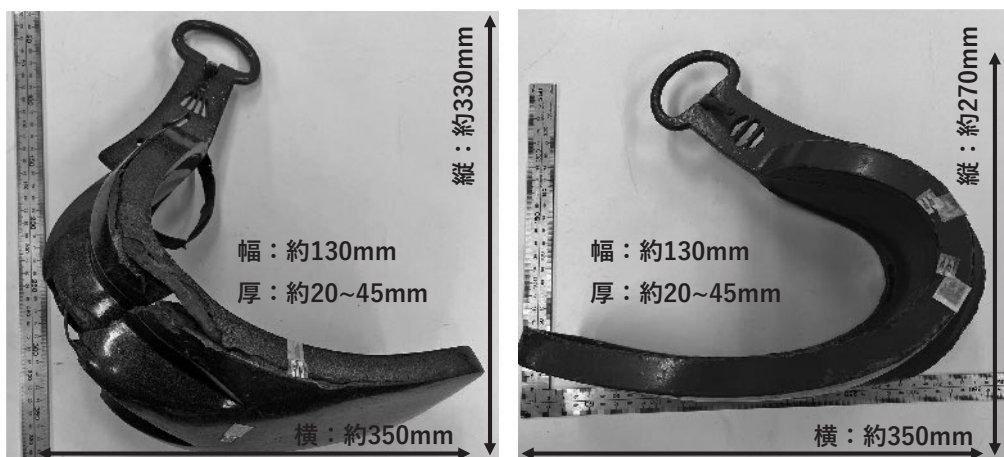


図8 鐙外観（左：鐙X 右：鐙Y）

4-1. 鏡について

4-1-1. 鏡 X

鏡 X は木地に漆塗りが施された鏡であり、寸法は縦：約270 mm、横：約350 mm、幅：約130 mm、木地の厚みはおよそ20 mm 程度であるが、部分的に厚くなっている箇所があり、最大厚みは約45 mm であった。外縁部は帯状の金属を取付け、その表面は木地部と同様に漆塗りが施されている。表面仕上げは梨地仕上（金粉を蒔き研ぎ出す）である。漆塗り表面には剥離して浮き上がった箇所が認められ、使用に伴う経年的な劣化が生じていた。また、本体には破断箇所が存在し、その破断面からは木地が露出していた。破断に伴い、金属部分と木材部分を固定していた釘が外れ、釘穴が見える状態となっている。鏡 X は製作当初より祭事に用いられてきたが、破損の発生以降は使用されなくなったと考えられる。破損の正確な時期は不明である。なお、当該鏡に関する製作時の塗装工程や修復履歴に関する記録は現存していない。鏡 X では破断により漆塗膜および木地の断面が外観上目視可能な箇所が認められたが、層構成や下地材料の詳細については把握することはできなかった。

4-1-2. 鏡 Y

鏡 Y も木地に漆塗りが施された鏡である。寸法は縦：約270 mm、横：約350 mm、幅：約130 mm、木地の厚みはおよそ20 mm 程度であるが、部分的に厚くなっている箇所があり、最大厚みは約45 mm であった。漆塗膜には経年による劣化がみられるものの、鏡 X と比べると剥離は少なく、表面状態は概ね安定していた。また、破断箇所は存在せず、木地面が露出する部分もほとんどなかった。これらの金属部材は木部の外周を囲うように取り付けられており、鏡 X と同様の構造を有している。鏡 Y も現在は使用されていないと考えられる。

4-2. 測定および処理方法

4-2-1. 熱電対による温度測定

本実験では、実物鏡における内部温度の上昇挙動を把握するため、鏡 X にのみ熱電対を設置した。使用した熱電対は K 熱電対とした。鏡 X には破断に伴って金属部材を固定していた釘穴を利用することで、新たに加工を施すことなく熱電対を挿入することができた。釘穴の深さは鏡の最大厚み部分の中心付近にまで達していたため、その位置の内部温度を直接測定できる状態であった。

熱電対は釘穴から挿入し、外気の影響を避けるため、挿入口周囲の隙間を酢酸ビニル樹脂系エマルジョン形接着剤で軽く封鎖した。これは気流の影響を抑えるための最小限の処置であり、鏡本体に加工をほどこさないように十分配慮して行った。

熱電対からの信号はリード線を介してデータロガー（UCAM-550A、共和電業）に入力し、サンプリング周期1分で連続的に記録した。

一方、鏡 Y には釘穴など内部へ通じる既存の開口部が確認できなかったため、新たな加工を避ける方針とし、熱電対の設置は行わなかった。そのため、内部温度の計測は鏡 X の1箇所のみとし、鏡 Y については外観観察およびひずみ計測を用いて評価した。

4-2-2. ひずみゲージによる表面ひずみ測定

鏡の表面ひずみ測定には、模擬試験体と同一仕様の一般用ひずみゲージ（KFGS-5-350-C1-11）を使用し、結線方式は2線式とした。ひずみゲージはいずれもシアノアクリレート系接着剤を用いて貼付した。

ひずみゲージからの信号はリード線を介してデータロガー（UCAM-550A、共和電業）に入力し、サンプリング周期1分で連続的に記録した。なお、各計測点間のデータを相対的に比較可能とするため、リード線長は模擬試験体と同様に統一し、実験室内の環境温度が大きく変動しないよう配慮した。

4-2-2-1. 鏡 X について

設置箇所の詳細を図9に示す。鏡 X は破断や固定用の金属部分が剥離しており漆塗り面と木地面が確認できる。破断している片方の足を載せる面の漆塗り面と木地面には、それぞれ X 漆1および X 木地1と称するゲージを貼付した。もう片方の足を載せる面の漆塗り面と木地面にもゲージを貼り付け、これらを X 漆2および X 木地2と称した。鏡 X では木地面が観察可能であり、貼付したひずみゲージは木材の繊維直交方向の伸縮を測定するよう配置している。柾目か板目かの判別は困難であるが、繊維直交方向の変化を捉えることで木地のひずみを比較的大きく測定できると判断している。漆面についても、木地が一部剥離で露出している部分から予測し、繊維直交方向と考えられる箇所にゲージを貼付した。足を載せる面の反対側の面の漆は剥がれていないため、代表として X 漆3と称するゲージを貼付した。さらに、鏡周辺を固定している金属部分（漆剥がれはなし）の表面には XM と称するひずみゲージを貼り付けた。

4-2-2-2. 鏡 Y について

設置箇所の詳細を図10に示す。鏡 Y は破断しておらず、漆の剥離も少なく、木地面が露出している部分は外観上認められなかった。そのため、足を載せる側の面の漆塗り部分にひずみゲージを設置し、Y 漆1と称した。また、その反対側の面は Y 漆2と称したゲージを貼付した。なお、鏡 Y の木地は確認できないため、ゲージの貼付方向は鏡 X に合わせた。一方、断面の金属部分には一部漆の剥離が認められたため、金属露出部には YM1、漆面が残る部分には YM2と称するゲージを設置した。

4-2-3. 色の測定

各鏡について、それぞれ異なる20か所を色差計（RM200QC、X-rite 製）で測定した。本器の光源は D65、視野角は10°である。測定スポット径は8 mm とし、CIE が定義する色空間である CIELAB および CIELCh に基づき、 L^* 、 a^* 、 b^* 、 C^* 、 h° の値を記録した。 L^* は明度、 a^* および b^* はそれぞれ赤-緑方向および黄-青方向の色成分を表し、 C^* は彩度、 h° は色相角を示す。得られた測定値は測定箇所ごとに平均値を求めた。

4-3. 温湿度制御と処理スケジュール

本実験の温湿度条件は、先に実施した模擬試験体による昇温挙動の検討結果を基にして設定した。模擬試験体は最大厚みが約70 mm と鏡より厚く、内部に熱が伝わりにくい構造であったが、昇温速度3°C/h の条件下でも内部温度が十分に追従し、殺虫条件を満たしていることを確認している。対象とする鏡は模擬試験体より薄く熱容量も小さいため、同条件を適用すれば内部温度は模擬試験体と同等以上に追従すると判断した。

鏡も模擬試験体の三角柱同様に、実験実施前まで実験室内に保管されており、保管期間も概ね同程度であった。このため、平均温湿度は図5に示す平衡含水率曲線上の3点（A：24°C / 55% RH、B：45°C / 60% RH、C：60°C / 65% RH）付近に概ねプロットされる条件であったとみなせる。実験開始時の温湿度は概ね24°C / 55% RH であり、この時点でも試験体の含水状態は

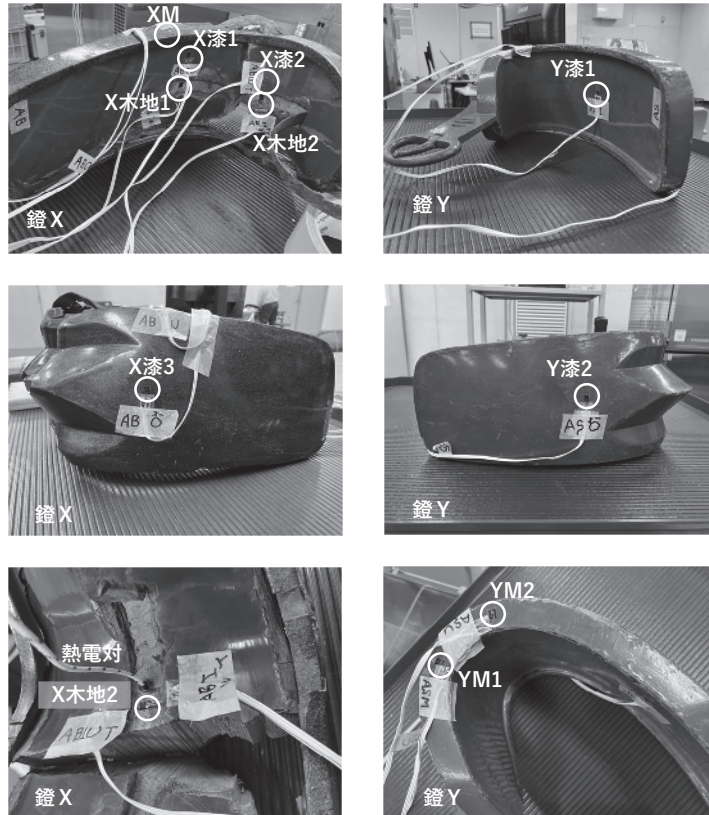


図9 鏡 X ひずみゲージ設置箇所

図10 鏡 Y ひずみゲージ設置箇所

保管時とほぼ同程度であったことから、図5の A、B、C の各点を結ぶ昇温スケジュールに従って実験を実施した。

昇温速度は3℃/h とし、恒温恒湿槽の制御温度が60℃に到達した後、1時間保持する設定とした。

温湿度制御は木材の平衡含水率曲線に基づき、温度上昇に応じて相対湿度を連動させる方式とした。具体的には、24℃/55% RH (A 点) から昇温を開始し、45℃/60% RH (B 点) を経て60℃/65% RH (C 点) に至り、保持後に24℃/55% RH まで降温する一連の操作を1サイクルとした。本研究ではこの処理サイクルを鏡 X では4回、鏡 Y では3回繰り返す、繰り返し処理が鏡の温度およびひずみ挙動に及ぼす影響を評価した。

4-4. 実験結果

4-4-1. 内部の温度

鏡 X に設置した熱電対の計測結果を図11に示す。内部温度は槽内温度に対して2℃程度の遅れを伴いながら上昇し、模擬試験体で確認した場合よりも速い追従性を示していた。また、処理中の内部温度は最高で約59.0℃であった。約54.5℃以上の状態が1時間継続しており、設定した条件が十分に満たされていたことを確認できた。

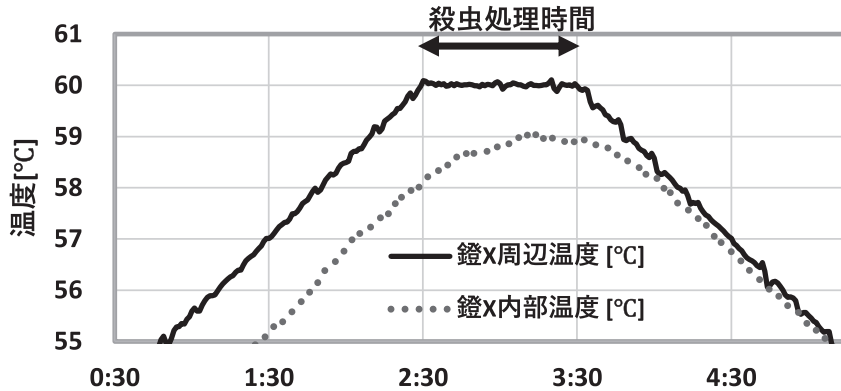


図11 鏡 X 内部温度

4-4-2. 表面ひずみ

鏡 X および鏡 Y に設置したひずみゲージの結果を図12、図13に示す。いずれの鏡においても、漆面・木地面ともに昇温時には引張、降温時には圧縮となる共通した挙動が確認された。次に漆面、木地面、金属部について結果を整理する。

鏡 X の X 漆1、X 漆2、X 漆3では1サイクルあたり約1,300~2,000 $\mu\epsilon$ の変化が観測され、鏡 Y の Y 漆1、Y 漆2では約400~1,200 $\mu\epsilon$ であった。

鏡 X の X 木地1、X 木地2では約2,000~3,000 $\mu\epsilon$ の変化幅が確認された。また、鏡 X の実験では湿度制御温風処理中に相対湿度が65% RH から35% RH へ急激に変動した際、X 木地1、X 木地2で一時的に約250 $\mu\epsilon$ の変化が発生し、短期的な湿度変動に対して反応する様子が確認された。

鏡 X の XM、鏡 Y の YM1、YM2では、1サイクルあたりの最大変化幅は約100 $\mu\epsilon$ と小さく、木地や漆面とは異なる挙動を示した。

1回目の昇温時には X 木地1、X 木地2において、他のサイクルと異なる挙動が認められた。さらに、処理を繰り返すごとに、木地面 (X 木地1、X 木地2) および漆面 (X 漆1、X 漆2、X 漆3、Y 漆1、Y 漆2) でひずみが徐々に圧縮側へ移行する傾向がみられたが、金属面ではその傾向は認められなかった。

実験終了後、鏡 X は5日間、鏡 Y は13日間、実験室環境に曝露した結果、木地面・漆面ともに徐々に引張側へ移行する傾向が観察された。これらの事象については次節で考察する。

4-4-3. 外観の変化

処理前後の目視による外観観察では、塗膜の光沢や亀裂の目立った変化は認められなかった。また、既に剥離していた漆部についても、処理によりさらなる剥離が進行した様子は見られなかった。

4-4-4. 色差計を用いた評価

色差計による計測結果を図14に示す。各パラメータの平均値について、処理の有無による差はほとんど認められなかった。また、 t 検定の結果は鏡 Y の L^* で有意差があったものの、試験体の色に目視で確認できるような明らかな変化はなかった。

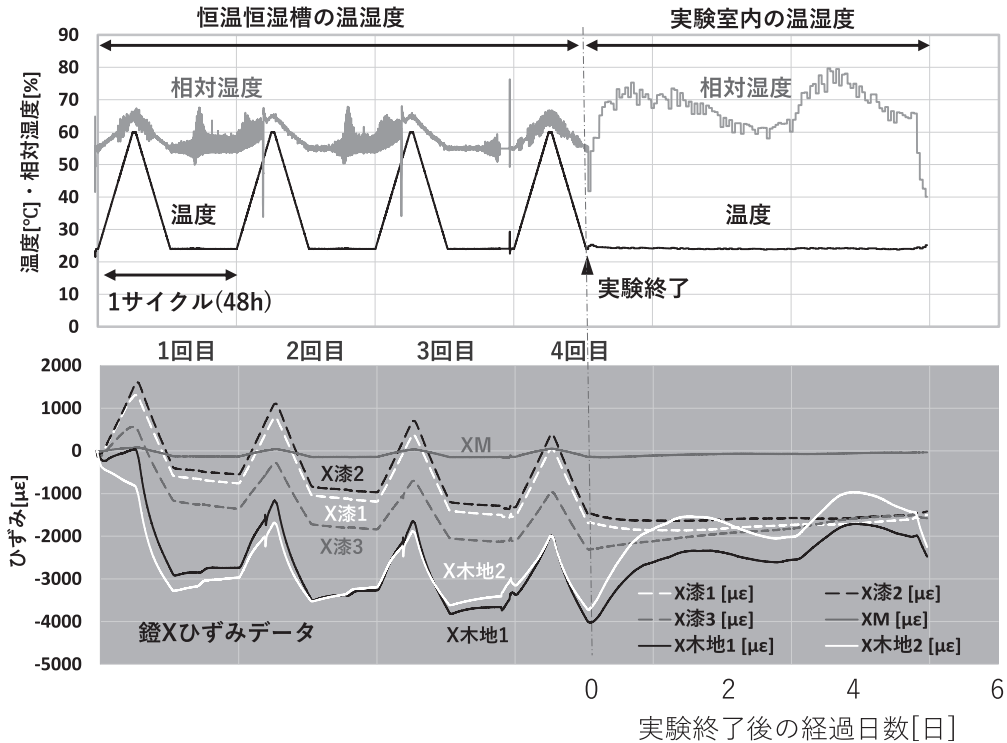


図12 鏡 X 実験結果

4-5. 考察

本節では、鏡試験で得られた結果について、3章の模擬試験体実験で得られた知見との関連を踏まえて考察する。

4-5-1. 実験条件に関する補足

本実験では、模擬試験体実験とは異なる恒恒温湿槽を使用したため、温度制御は安定していたものの、相対湿度制御がやや不安定で、設定値に対して短時間周期の変動が生じていた。これは、実験条件に合わせて槽内の気流を抑制したことなどが装置の制御機構に影響したものと考えられる。本実験の結果は、このような短期的な湿度変動を含む環境下で得られたものである。

4-5-2. 漆面よりも木地面のひずみ変動が大きくなった点

鏡 X、Y のいずれにおいても、木地面に相当する計測点では、漆面よりもひずみの変化量が大きい傾向が確認された。この点は、模擬試験体と同様の傾向である。木地では、温度変化による線膨張に加え、含水率変動に伴う膨潤・収縮がひずみに影響する。一方、漆塗膜は木材より十分に薄く木地に密着しているため、漆自体が木材より大きく変形することはなく、主に木地の熱的変動が表層に反映した挙動を示す。なお、木固めや布着せの工程により漆が木材や布に浸透・硬化している場合、漆層が木地の変形を拘束する可能性も考えられる。しかし、本実験においては、塗膜と木地の間で剥離や分離は認められず、漆と木地は一体化して変形していると考えられる。また、漆の透湿性は低く、木地面に比べ水分移動が制限されるため、含水

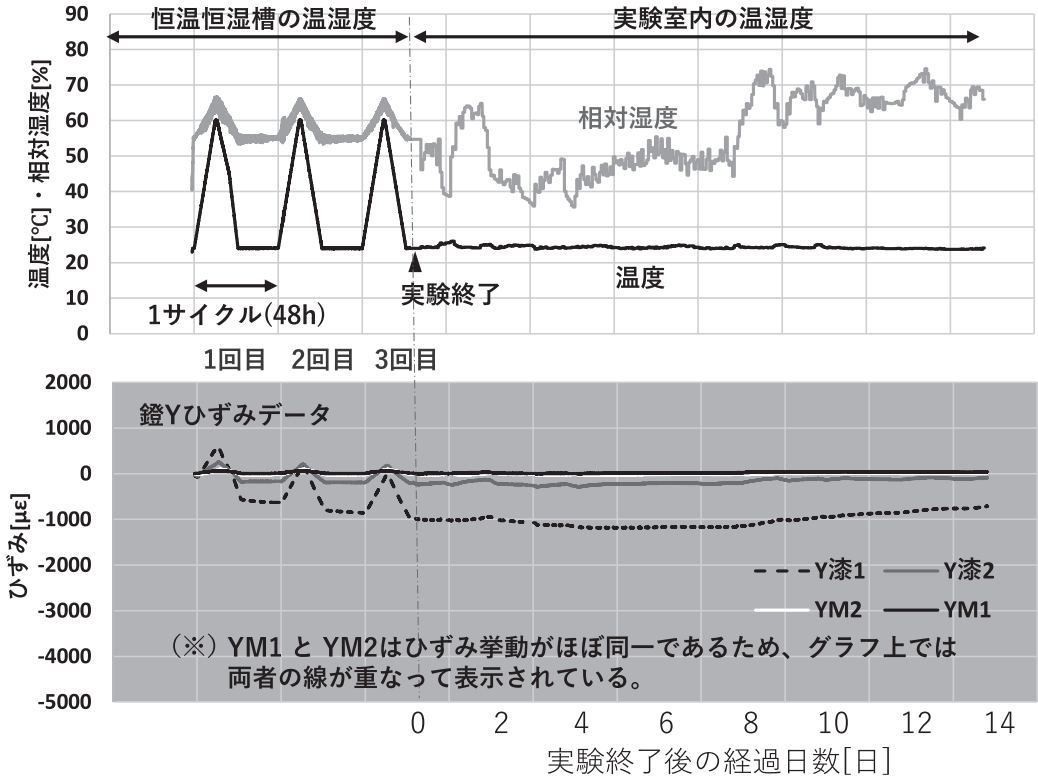


図13 鏡 Y 実験結果

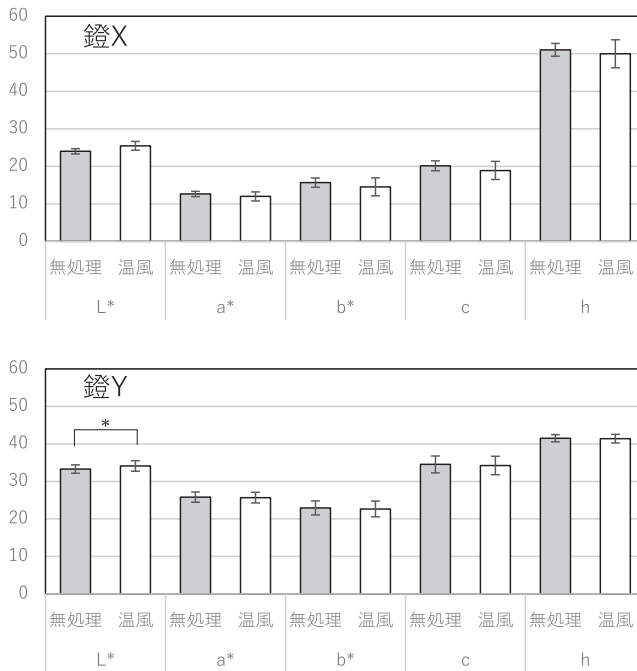


図14 色差計による計測結果

率由来のひずみ変化は木地露出面ほど大きくならない。これらの点が重なり、漆面よりも木地面のひずみ変動が大きくなったものと考えられ、模擬試験体における結果と整合する。

ここで、鏡において観測されたひずみ量の大きさについて検討する。鏡は古材であり、材料内部にはこれまでの温湿度履歴や経年変化に起因する応力状態が存在している可能性がある。既往の調査では、建造物に用いられていた古材において、日常的な温湿度変化により年間を通じて最大で6,000 $\mu\epsilon$ 程度のひずみ変化が生じる事が報告されている²⁾。これと比較すると、今回の湿度制御温風処理中に観測されたひずみ量はそれ以下であり、それによって特異的に大きな変形が生じたとは考えにくい。

また、木取り方向に関する情報についても考察する。木地面が観察可能であったのは鏡 X のみであり、繊維直交方向にひずみゲージを貼付している。柾目か板目かの判断は困難であるが、繊維直交方向伸縮を捉えることで、木地の変化を比較的大きく測定できると判断している。漆面についても、木地が一部剥離で露出している部分から、同様に繊維直交方向と考えられる箇所にひずみゲージを貼付しており、比較的大きな変化が観測されと考えられる。一方、鏡 Y では木地が確認できなかったため、漆面のひずみゲージは鏡 X の貼り付け方向に合わせて配置されているが、直下の繊維方向を正確に捉えていない可能性があり、その結果として Y 漆1、Y 漆2におけるひずみ変化は鏡 X に比べて小さく観測されていると考えられる。

一方、鏡には実験開始前から破損や損傷部位が存在しており、これらの部位で応力解放等が生じた可能性は否定できない。今回の実験では破損部近傍を含めてひずみ挙動を確認したが、健全部と比較して顕著な差異は認められなかった。ただし、損傷部位の影響については、今後さらに検討する必要がある。

以上より、鏡 X において湿度制御温風処理後に収縮側のひずみが相対的に大きく観測されたものの、本実験条件下では、塗膜の外観上の損傷に直結するような変形が生じた可能性は低いと考えられる。

4-5-3. 1回目の昇温時の挙動が2回目以降と異なった点

鏡 X、Y の双方において、1回目の昇温時のみ、2回目・3回目・4回目と異なる挙動が確認された。これは、模擬試験体と同様の現象であり、以下の点によって説明できる。すなわち、鏡はこれまで湿度制御温風処理を受けた履歴がなく、日光地域において、比較的湿度の高い環境下で長期保管されてきたものと考えられる。また、実験実施前には実験室内に一定期間保管されていたものの、内部の含水状態が実験室環境における平衡含水率と完全に一致していなかった可能性がある。このため、初回処理時において、これまでの保管環境下で形成されていた残留ひずみの解放が生じ、湿度制御温風処理に対する応答が他のサイクルと異なる挙動となったと考えられる。この初期応答は、過去の実証試験でも同様に確認されており²⁾、本試験結果もそれと整合的である。

4-5-4. 処理の繰り返しによってひずみが徐々に圧縮側へ移行した点

鏡 X および鏡 Y の多くの計測点において、処理を繰り返すごとにひずみが徐々に圧縮側へ移行する傾向が認められた。この挙動は、先に検討した三角柱の模擬試験体において観察された傾向と概ね一致している。本試験に用いた鏡は、模擬試験体と同様に、実験実施前まで実験室内に保管されており、その保管期間の平均温湿度条件から、実験開始時点においては実験室環境に対応する含水状態に近い状態にあったとみなしていた。一方で、試験体内部の実際の含水率は直接測定していないため、実験開始時点での含水率が平衡含水率より高かった可能性は

否定できない。その場合、今回の湿度制御温風処理によって相対的に乾燥方向へ作用することになり、処理の繰り返しに伴って木材が徐々に収縮方向へ推移し、ひずみは圧縮側へ移行したものと解釈できる。次に、実験終了後に試験室環境内へ曝露した際のひずみ挙動について検討する。鏡 X では、実験終了直後の実験室の環境は概ね24℃一定で安定していた一方、相対湿度は実験終了後の5日間にわたり60~70% RH の範囲で比較的高めに変動していた。この期間において、湿度変動の影響を受けやすい測定点である X 木地1と X 木地2では、相対湿度の変化に連動しながら、ひずみが緩やかに引張側へ移行する傾向が認められた。これは、恒温恒湿槽内の平衡含水率条件から、実験室内のやや高い平衡含水率条件へ、木材の含水状態が過渡的に移行している過程を反映したものと考えられる。一方、鏡 Y は鏡 X の後に実験を行っており、実験終了後の養生期間におけるひずみ変動をより長期にわたって観測している。鏡 Y の測定点のうち、変動が比較的大きかった Y 漆1に着目すると、実験終了後およそ8日間までは、実験室環境が恒温恒湿槽内の平衡含水率条件よりやや低い状態で推移しており、この期間には Y 漆1のひずみはわずかに圧縮側への変化を示した。その後、実験室内の相対湿度が60~75% RH の範囲で変動するようになると、それに対応して Y 漆1のひずみも緩やかに引張側へ移行した。

以上の結果から繰り返し湿度制御温風処理期間中には、試験体は相対的に乾燥側へ作用を受けて圧縮方向へ推移し、実験終了後には実験室環境の相対湿度変動に応じて、両鏡のひずみが連動して変化する様子が確認された。この挙動は、温湿度条件の変化に伴う木材の含水状態の変動が影響した結果の一因として考察することができる。一方で、処理終了後に観測された圧縮側のひずみについては、湿度制御温風処理および実験室環境への曝露に伴う吸放湿過程に起因するヒステリシスの挙動の影響や、それらに関連して生じる可能性のある残留ひずみの有無について、本研究で得られたデータのみからは判別できない。この点は、前章で述べた模擬試験体における考察においても同様であり、これらについては不確実性を含む要因として位置付け、今後の検討課題とする必要がある。

4-5-5. 金属部のひずみ変化が小さかった点

金属部（鏡 X、Y）の1サイクルあたりのひずみは約100 $\mu\epsilon$ と小さく、木材部や漆層に比べて低い値であった。文献によれば、木材の繊維直交方向の線膨張係数は20~50 $\times 10^{-6}/K$ 程度であり⁹⁾、鉄（11~12 $\times 10^{-6}/K$ ）より大きい¹⁰⁾。本試験では、木地面・漆面ともに繊維直交方向にひずみゲージが貼付されており、観察されたひずみの大きさは材料特性として予想される範囲内である。さらに、金属部に残存する漆は透湿性が低く含水率変動がほとんど生じないため、金属部のひずみは主として温度変化に伴う材料の線膨張や収縮によるものと考えられ、木材部より小さい値となったと考えられる。

4-5-6. 短期的な環境変動への反応

実験中には、装置側の湿度制御の影響により、相対湿度が65% RH から35% RH へ急激に変動する場面があった。この際、木地面に相当する計測点では約250 $\mu\epsilon$ の一時的なひずみ変化が生じ、短時間の湿度変動に対しても一定の感受性を有することが確認された。一方、漆面ではこのような変化はほとんど認められず、急激な湿度変動に対する反応は主として木地露出部で顕著であった。

また、実験中にはより短い周期で小刻みに発生する湿度変動も確認されたが、ひずみ波形はそれらと同じ周期で同期しておらず、変動の瞬間的な上下動を直接反映する挙動は見られな

かった。ただし、湿度変動幅に見合う平均的なひずみの変化は確認されており、今回のサンプリング周期が1分であったことを踏まえると、より細かいサンプリングであれば短周期の湿度変動に追従したひずみ挙動が検出できた可能性も考えられる。

これらの結果は、木地面では改めて湿度変動の影響を受けやすいことを示すものであり、言い換えると、湿度制御温風処理において湿度制御の精度が高いほど、不要な短期的ひずみ応答を抑制できることを意味している。すなわち、木材の水分移動特性とひずみ挙動の関係から、安定した処理環境を確保することが、ひずみ変化を最小限に抑える上で重要であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、漆塗り工芸品に対する湿度制御温風処理の適用性を検討するため、模擬試験体および実資料である鏡を対象に実験を実施した。模擬試験体では、設定した温湿度スケジュールに対して内部温度が十分に追従し、殺虫に必要とされる温度条件を満たすことが確認された。また、木地および漆塗膜において、温湿度条件の変化に応じたひずみ挙動が観測され、複数回の処理サイクル後には、実験室環境下の温湿度条件に対応する平衡状態へ向かう過渡的な変化が認められた。さらに、処理前後の目視による外観観察の結果、漆塗膜に顕著な損傷やマクロな外観変化は確認されなかった。

実資料である鏡においても、試験体内部温度が殺虫に必要とされる条件を満たすことが確認された。漆塗膜は温度変化に対して比較的安定した挙動を示した。一方、木地面では短期的な湿度変動に応じたひずみ変化が観測されたが、その挙動は模擬試験体の結果と整合的であり、実験終了後には実験室環境の相対湿度変動に連動した過渡的な変化を示した。金属部分ではひずみ変化が小さく、木地や漆面とは異なる応答を示すことが確認された。

以上の結果から、本研究で設定した処理条件および評価手法の範囲においては、実験に供した模擬試験体および実資料である鏡に関して、短期的に顕著な外観上の損傷や不可逆的な変形を生じさせないことが確認された。なお、本結果はあくまで今回の事例研究に基づくものであり、漆塗り工芸品全般に一般化できるものではない。

本研究で得られた知見は、非化学薬剤型の文化財殺虫処理手法を検討する上での基礎的資料として位置付けられるものと考えられる。

6. 今後の課題

本研究では、模擬試験体および実資料である鏡を対象として温度およびひずみに基づく評価を行ったが、検討すべき点が残されている。まず、今回使用した装置では湿度制御が短時間で変動する場面が見られたため、文化財への適用を前提とする場合には、より安定した温湿度制御機構の検討が必要となる。また、本研究で対象としたのは木材と漆塗膜を主体とする工芸品であり、紙・布・皮革など、異なる材料から構成される文化財については十分な検証が行われていない。

さらに、本研究では温度変化とひずみ挙動を中心に評価を行ったため、材料内部の水分状態や漆塗膜のより細かな変化については把握できていない。漆塗膜の外観評価についても、今回の結果は主に目視による色変化やマクロな亀裂の有無に限定されており、微細な亀裂（マイクロクラック）や光沢の変化など、より客観的・定量的な評価は行われていない。この点は今後の課題として整理する必要がある。

また、湿度制御温風処理後のひずみ挙動については、温湿度条件の変化に応じた挙動が確認

された一方で、その可逆性や残留性を含め、現段階では十分に整理できていない点があり、評価には一定の不確実性が残されている。これらの点は今後の課題として整理する必要がある。

これらの課題を踏まえ、材料や構造の異なる文化財を対象とした検証を段階的に進めることで、湿度制御温風処理の適用範囲と条件の整理が進み、より実践的な保存処置技術の確立につながると期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、実資料である鐙を提供いただいた日光東照宮に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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：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 -、保存科学、62、13-33 (2023)
- 2) 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：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 -、保存科学、62、179-192 (2023)
- 3) 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、日本建築学会熱環境運営委員会第50回シンポジウム、109-116 (2021)
- 4) Strang, J. T. : The Effect of Thermal Methods of Pest Control on Museum Collections, *Biodeterioration of Cultural Property 3, Proceedings of the 3rd International Conference on Biodeterioration of Cultural Property*, 334-353 (1995)
- 5) 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、165-174 (2017)
- 6) Kamiyoshi, K., & Hashimoto, H. Permeation through and sorption of water vapor by the Japanese lacquer film (Urushi). *Science Reports of the Research Institutes, Tohoku University, Series A: Physics, Chemistry and Metallurgy*, (2), 193-204 (1950)
- 7) Obataya, E., Ohno, Y., & Tomita, B. *Changes in the vibrational properties of wood coated with urushi lacquer during moisture adsorption and desorption. Journal of the Japan Wood Research Society*, 47(5), 440-446 (2001)
- 8) Arriaga F., Peraza F., Esteban M., Bobadilla L., García F. : Mechanical properties of wood: A review, *Forests*, 14, 1102 (2023)
- 9) 石丸優・古田裕三・杉山真樹 編：木材の物理 改訂版、49-60、海青社 (2022)
- 10) Raeisi M., Etefagh M. M., Shariati M., Ahmadian M. T. : Assessment of thermal expansion coefficient for pure metals, *Mechanics Research Communications*, 50, 8-15 (2013)

キーワード：湿度制御温風処理 (humidity-controlled warm-air treatment)；ひずみ (strain)；含水率 (moisture content)；木製漆塗り工芸品 (urushi-coated wooden artifacts)

Evaluation of Temperature, Strain, and Surface Stability of Urushi-Coated Wooden Artifacts under Humidity-Controlled Warm-Air Treatment

SHIMADA Masanori^{*}, KONDO Shuhei^{*}, HARADA Masahiko^{**}, FUJIWARA Yuko^{***}, FUJII Yoshihisa^{***} and SATO Yoshinori

Humidity-controlled hot air treatment is a non-chemical method for pest control in wooden cultural properties, but its effects on urushi-coated wooden artifacts remain unclear. This study evaluated its applicability by examining temperature responses, surface strain behavior, and appearance stability of urushi-coated wooden samples.

Mock-up specimens of hinoki cypress partially coated with urushi-coated were subjected to heating-cooling cycles in a controlled chamber. Internal temperatures reached pest-lethal conditions, while surface strain remained within reversible limits. Strain variation was larger on uncoated wood surfaces than on coated areas, but no notable cracking or peeling was observed.

The treatment was then applied to coated stirrups from Nikko Tosho-gu Shrine. Internal temperatures satisfied pest control requirements, and strain behavior was consistent with the mock-up results. Wooden components exhibited larger strain than urushi-coated surfaces, while metal fittings showed minimal deformation. Visual inspection and color measurements revealed no significant changes due to the treatment.

These results confirm that, within the treatment conditions and evaluation methods used in this study, neither the mock-up specimens nor the actual stirrups showed significant short-term appearance damage or irreversible deformation. The findings are specific to this case study, and generalization to urushi-coated artifacts in general requires caution. Nevertheless, the results provide a foundational reference for evaluating non-chemical pest control methods for cultural properties.

^{*}The Kansai Electric Power Co., Inc

^{**} Association for the Preservation of Nikko World Heritage Site and Temples

^{***} Graduate School of Agriculture, Kyoto University