

〔報告〕 和紙の平衡含水率について —市販の楮紙および美濃紙における測定結果—

近藤 修平*・島田 正理*・藤原 裕子**・藤井 義久**・
佐藤 嘉則・仁木 真奈美

1. はじめに

2005年の臭化メチル全廃後¹⁾、文化財の菌・虫による生物劣化対策に広く使用されてきた、酸化エチレンおよびフロン HFC-134a を主成分とするエキヒューム S は、人および環境への配慮から2025年3月に販売終了となった。現在、使用可能な文化財向けの燻蒸剤としては、フッ化スルフリルを主剤とするヴァイケーン、酸化プロピレンを主剤とするアルプ、えきたんくん（高純度二酸化炭素ガス）などがある。これらの薬剤は殺虫用途では有効であるが、アルプを除いて殺菌効果を持たない。殺菌効果があるアルプも、有害大気汚染物質を主成分としているため、エキヒューム S の代替として用いることについては課題が残されている。今後の持続的な虫害・菌害対策として、化学薬剤を使用しない新たな生物劣化対策の開発が求められている。

このような背景から、我々は化学薬剤を使用しない湿度制御温風処理^{2,3)}に着目し、本処理を用いて建築物分野における殺虫処理を行ってきた。湿度制御温風処理では、処理対象物周辺空間を60℃に保つことにより、空間からの熱伝導によって対象物内部を60℃程度まで昇温させる。この加温によって木材食害昆虫を構成する体タンパク質を変性させることで、殺虫を行う。本手法では、昇温・降温に伴う相対湿度変化により木材が吸放湿して膨縮するのを防ぐため、木材の含水率に応じた精密な湿度制御を行う点に特徴がある。

さて村松ら⁴⁾は、雰囲気温度55℃かつ加湿条件下において、一部の菌類の生育が抑制されることを報告している。この知見を踏まえれば、湿度制御温風処理における湿度条件の最適化によって、本手法の殺菌・殺虫手段としての適用可能性が示唆される。紙や木などの単純な部材においてこれらの効果が検証されれば、紙、膠、木材、金属、漆等の彩色層を含む複合材料から構成される仏像、絵画、書籍等の文化財への本手法の適用拡大も可能となる。そこで現在、我々は紙を対象とした湿度制御温風処理の殺菌・殺虫手法の開発に取り組んでいる。

ところで温湿度変化によって、紙は伸縮する可能性がある。よって、湿度制御温風処理の際に適切な湿度管理が必要である。しかし、和紙に関する含水率の文献は見当たらない。そこで我々は、現在市中で販売されている2種類の和紙について、平衡含水率に関する基礎的な計測を行った。

2. 目的及び測定方法について

文化財建造物の湿度制御温風処理では、温度・湿度変化による処理木材の変形を防ぐために、温度勾配をつけてゆっくりと加温し、木材の温度に応じて含水率が一定となるよう湿度を制御している。木材に関しては、平衡含水率曲線が古くから計測されている。工業的に大量生産さ

*関西電力株式会社、**京都大学

れる洋紙と異なり、和紙は少量生産であるため品質が必ずしも安定していない。和紙の温度に対する含水率計測については、加藤⁵⁾が実験室内環境下での計測を行っているが、温度・湿度を系統的に変化させた場合の含水率変化については報告がない。そこで我々は、温度・湿度変化に伴う和紙の平衡含水率変化を計測するため、大型恒温槽と電子天秤を用いた計測システムを構築した。

恒温・恒湿環境の構築には ESPEC 社製 ARL-0680-J を使用した。重量測定には、島津社製電子天秤 AUW220 を恒温恒湿槽内に設置した。なお、試験紙の重量測定の際に試験紙を恒温恒湿槽外に取り出すことで生じる測定誤差を防ぐため、電子天秤の表示値を通信線を介して連続的に記録した。

今回の計測では、楮紙 (坪量 37.69 g/m^2) および美濃紙 (坪量 40.78 g/m^2) を用いた。各試験紙は、電子天秤の分解能である $\pm 0.2 \text{ mg}$ および天秤内部に収納可能な大きさを考慮し、 4 g 程度の重量となるように切り出し、計測台に設置できるよう円筒状に加工した。恒温槽内の温度・湿度については、SENSIRION 社製 SHT-75 を用いて試験紙周辺の雰囲気環境を測定した。温度条件は、庫内に設置した電子天秤の耐熱温度を考慮し、 20°C 、 30°C 、 40°C および 45°C の4条件とした。湿度条件は、上記の温度範囲で恒温槽の除霜運転が発生しない範囲である相対湿度 $35\% \text{ RH}$ から $90\% \text{ RH}$ まで相対湿度 $5\% \text{ RH}$ 刻みに設定し、計12条件とした。したがって本計測では、温度4条件および湿度12条件の計48条件について、加温時・降温時の測定を行った。

さて、図1には、設定温度 20°C 一定の下で楮紙を相対湿度 $35\% \text{ RH}$ から $90\% \text{ RH}$ へステップ状に加湿し、また相対湿度 $90\% \text{ RH}$ から $35\% \text{ RH}$ へ除湿した際の重量変化を示す。湿度を変更すると、和紙は水分を吸収・放出し、その重量は緩やかにステップ状に変化した。湿度変更後、数時間が経過すると重量変化は収束した。この時点の重量を当該湿度における和紙の平衡重量とした。図2及び3に昇温時と降温時の相対湿度と重量の関係を示す。 20°C 条件では昇温・降温時の湿度・重量の変化に大きな差は無い。一方、 45°C ・相対湿度 $70\% \text{ RH}$ 以下では、昇温時の重量は若干増加する方向にあった。これは、紙の吸収放出のヒステリシスに起因するものと推測される。今回の報告では、和紙における温度と相対湿度の変化を把握することを目的として

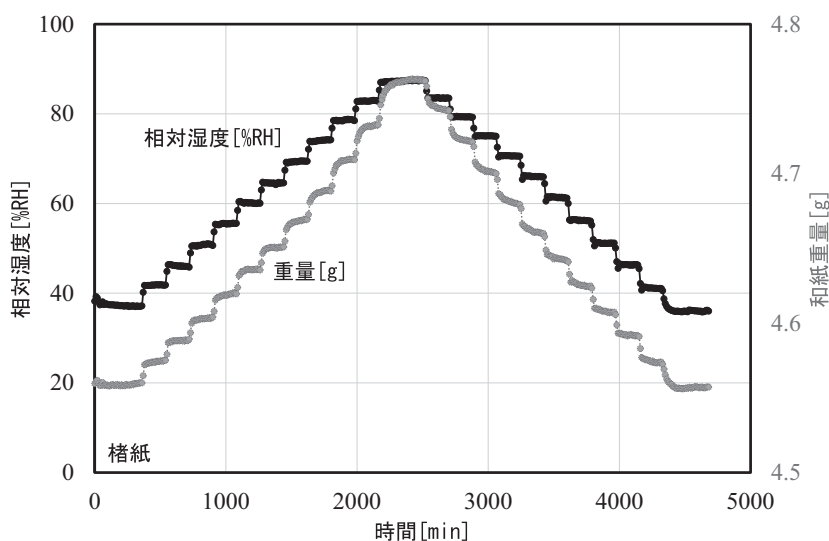


図1 楮紙の雰囲気温度 20°C における湿度と重量の10分間平均値の推移

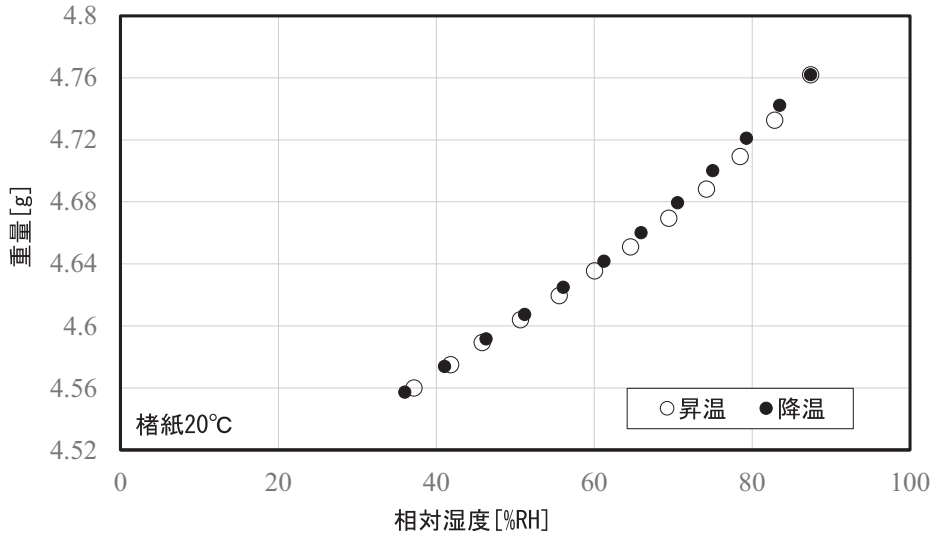


図2 楮紙の雰囲気温度20℃における湿度と重量10分間平均値の関係

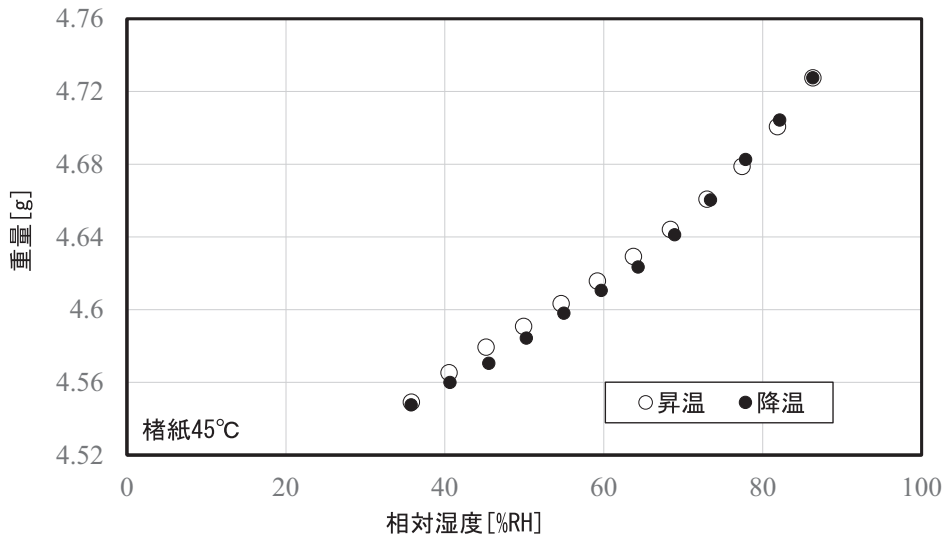


図3 楮紙の雰囲気温度45℃における湿度と重量10分間平均値の関係

おり、昇温・降温の重量変化に大きな差は無いものとして、昇温時の重量変化を採用する。20℃・30℃・40℃・45℃条件で得られた相対湿度と重量変化の関係から、図4に示す温度・相対湿度変化による重量変化の近似曲線を定めた。同様の処理を美濃紙についても行い、図5に示す近似曲線を得た。

3. 測定結果について

図4および図5から得た近似曲線の縦軸の紙の重量について各試料を105℃で乾燥させて得た絶乾重量で除し、測定した4つの温度条件毎の全乾重量基準とした含水率と湿度の表を作成した。この表を基に、含水率が同一（今回は7～12%）となる温度・湿度の組み合わせを求めた。

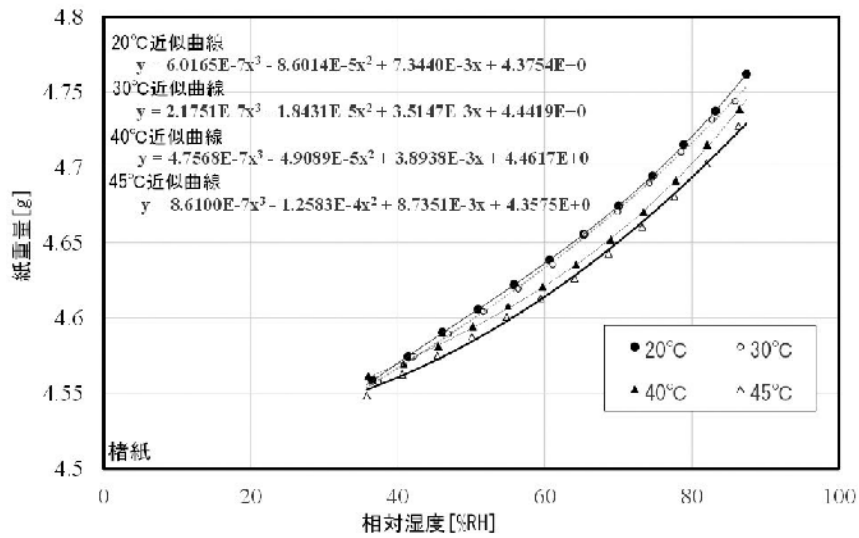


図4 相対湿度と重量の関係 [楮紙]

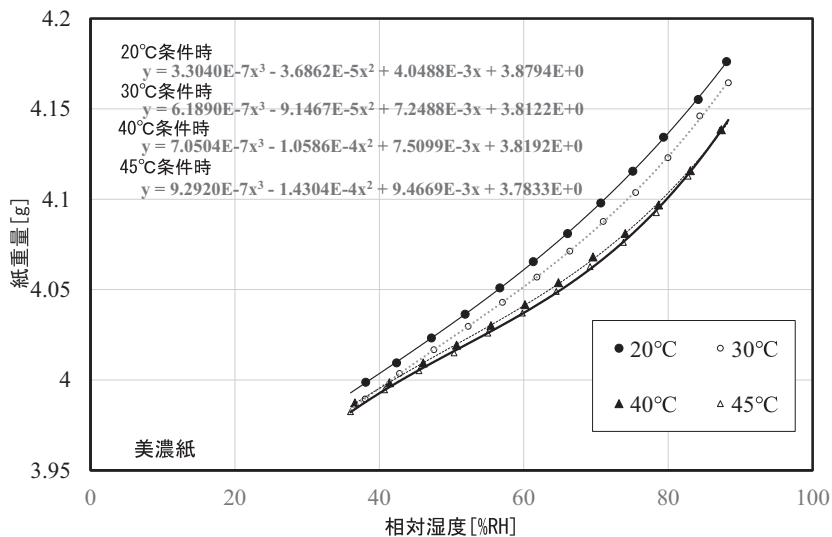


図5 相対湿度と重量の関係 [美濃紙]

これらの温度・湿度の組み合わせから平衡含水率曲線を算出し、図6及び図7を得た。楮紙および美濃紙の含水率は、この温度・湿度範囲内では、両紙とも相対湿度に対してほぼ直線的な変化を示した。この温度領域では、水分は単純に繊維の間に取り込まれている状況を示唆するものと推察される。また、この20～45°Cの温度領域においては、和紙は温度上昇に伴って急激に水分を取りこまないことがわかる。また、楮紙よりも美濃紙の方が同一湿度に対して含水率が高くなる傾向にあった。これは楮紙よりも美濃紙の方が、坪量が若干大きく単位面積あたりの繊維量が多いため、吸水能力が高いものと考えられる。

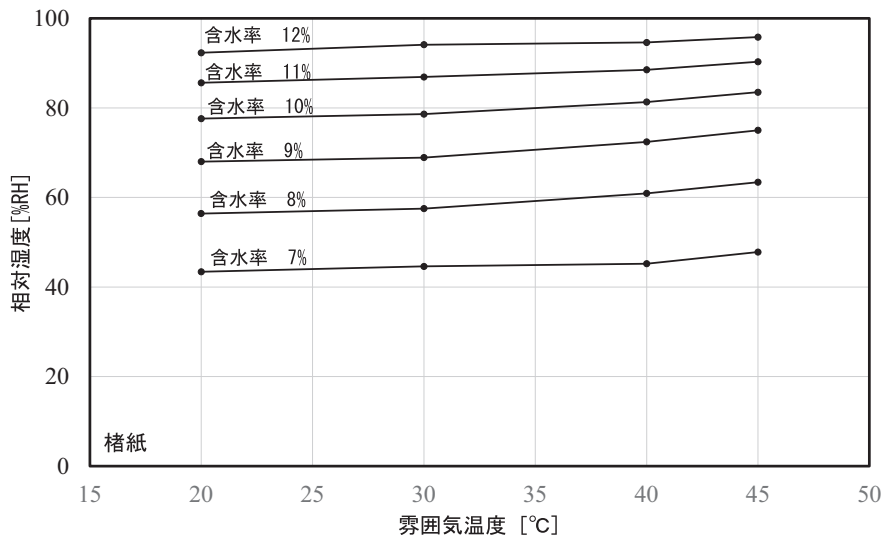


図6 楮紙の平衡含水率曲線

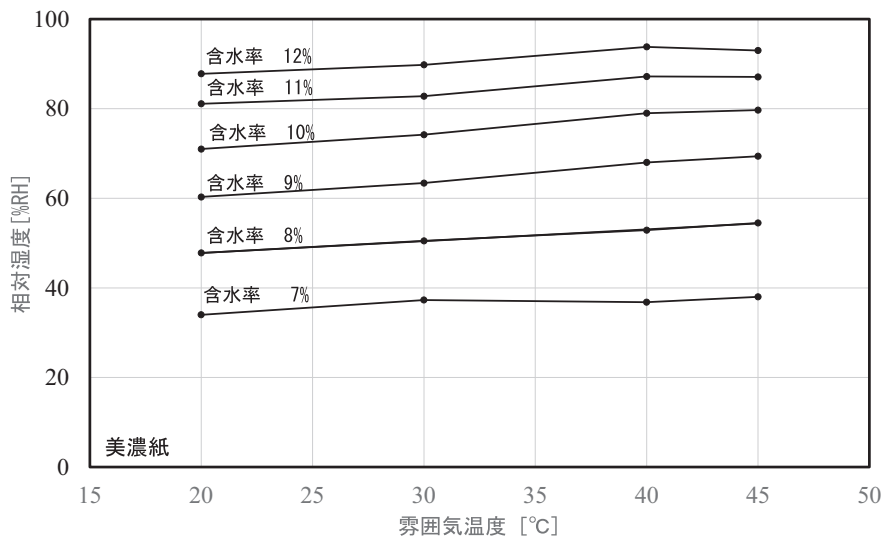


図7 美濃紙の平衡含水率曲線

4. まとめ

和紙の平衡含水率曲線の算出を目的として、温度・湿度変化による和紙の重量変化を自動計測するため、恒温恒湿槽および電子天秤を用いた連続計測システムを構築した。その結果、市販の2種類の和紙について平衡含水率を算出することができた。今回の計測では、電子天秤および恒温恒湿槽の制御・測定能力に起因して、測定可能な温湿度条件が限定された。そのため得られた含水率曲線も、当該範囲に限られたものとなった。今後の電子天秤の改良により温度条件の拡張が見込まれる。特に湿度制御温風処理への適用を考える場合には、60℃付近における含水率特性の把握が重要であり、これは今後の課題である。

参考文献

- 1) 三浦 定俊、木川 りか、佐野 千絵：臭化メチル全廃とその後の10年の歩み、保存科学、55、37-45 (2016) <https://www.tobunken.go.jp/ccr/pest-search/2025forum/2025forum.html> (2025年11月21日参照)
- 2) 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築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)
- 3) 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築物加害甲虫類の殺虫 (2) —殺虫効果の確認と建築物への影響の検討—、保存科学、62、179-192 (2023)
- 4) 村松 芳多子、高鳥 浩介：物理的微生物制御技術の今とこれから (9) 湿熱および低温処理によるカビ制御、日本防菌防霉学会誌、47(12)、507-511 (2019)
- 5) 加藤 晴治：和紙に関する研究 (第9報) 和紙の含水率、紙パ技協誌、15(10)、674-676 (1961)

キーワード：湿度制御温風処理 (Humidity-controlled warm-air treatment)；温湿度制御 (Control of temperature and humidity)；平衡含水率 (Equivalent moisture content)；和紙 (Japanese paper)

Equivalent Moisture Content in Washi: Measurement Results for Commercially Available Kozo Paper and Mino Paper

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

In recent years, humidity-controlled warm-air treatment that does not rely on chemical agents has gained increasing attention. Considering both its reported inhibitory effects on fungal growth under heated and humid conditions, as well as the established insecticidal conditions achieved within humidity-controlled warm-air systems, the method shows promise not only for pest control but also as a potential sterilization technique.

If such effects are verified, this technique could be applied to small cultural artifacts. However, Buddhist statues, paintings, and other works composed of complex combinations of materials—such as paper, glue, wood, metal, lacquer, and pigments—require a range of verification tests tailored to the thermal properties of each constituent material.

As an initial step, we focused on books and related materials, which are composed of relatively simple components. During treatment, paper may swell or shrink due to fluctuations in temperature and humidity, making appropriate humidity management essential in humidity-controlled warm-air treatment. Despite this importance, data on the moisture content of washi (Japanese paper) remain limited.

To address this gap, we constructed a continuous measurement system using a constant temperature—humidity chamber and an electronic balance to automatically record weight changes in washi under varying temperature and humidity conditions. Using this system, we measured the equivalent moisture content of two types of commercially available washi.

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

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