

〔資料〕 HERIe を利用した山・鉾・屋台を保管する 倉庫の温湿度環境評価について

間 渕 創・河村 友佳子*・水谷 悦子

1. はじめに

山・鉾・屋台などは日頃、自治会などが所有する倉庫に保管されており、祭礼においては道具として屋外で活用される。保管時と屋外での活用時の温湿度環境の差が大きくなると、山・鉾・屋台を構成する材料への歪みや変形といった機械的損傷に対する影響も大きくなると考えられ、彩色や塗膜がある場合には亀裂や剥離につながる恐れもある。保管倉庫は土蔵や木造、たたき土間など構造は様々のものであるが、機械空調ではなく温湿度は成り行きであることが多い。実際の曳山保管倉庫の温湿度環境の調査では、外気の温湿度に追随しながら変化幅はある程度緩和している環境であり、活用にあたっての温湿度差も軽減していたとされている¹⁾。ただ現状では、保管倉庫の望ましい温湿度環境設定について定量的に評価するまでには至っていない。

文化財等の展示、収蔵施設の環境設計の方針を決めるうえで、空間の温湿度や損傷を予測する数値解析モデルは有用である。既往の研究として個別の博物館収蔵庫や展示ケースなどを対象として空間の温湿度を数値シミュレーションした例がある²⁻⁴⁾。また環境変化に伴う資料の応力、変形分布の予測には有限要素法 (FEM) が用いられるが、近年は拡張有限要素法 (XFEM) の利用により亀裂の進展予測も可能になりつつある^{5,6)}。ただしこれらの手法には予測したい現象に対する理解、現象の数値モデル化、ソフトウェアに対する理解など専門的知見が必要となる。また高価な演算機や専門のソフトウェアとともに物性値の取得やモデルの開発に多大な労力も要する。

2024年現在、学芸員や数値解析を専門としない研究者向けに、文化財等に影響を及ぼすリスクと劣化プロセスの定量的評価を行うデジタル意思決定支援プラットフォームとして HERIe が web 上で提供されている⁷⁾。このプラットフォームは、不適切な相対湿度、光、大気汚染物質、火災の危険度など、10の環境劣化要因による影響を定量化、評価するモジュールによって構成されている (2024現在では5つのモジュールが実装済み)。このうち温湿度環境については、木質材料の機械的損傷の観点から評価される。この機械的損傷による温湿度評価のモジュールでは、アップロード (UL) した温湿度データセットを寸法変化 (歪み) の履歴に変換し、物理的損傷に対する温湿度環境のリスクを定量的に評価する^{8,9)}。また実際の建造物でこのモジュールを利用したリスク評価や温湿度環境の設定を行った事例もある¹⁰⁾。

本研究では、HERIe の温湿度環境による機械的損傷評価モジュールを利用して、山・鉾・屋台を保管する倉庫の簡易的な温湿度環境評価を試みた。

2. 方法

HERIe の温湿度環境による機械的損傷評価モジュールに温湿度データセットを UL し、計

*国立民族学博物館

算したい対象やパラメータを選択することで歪み（変形量 ΔL を初期長 L_0 で除したもの、Strain%）の計算を行う。機械的損傷評価モジュールにおいて選択可能な対象とパラメータは表1の通りである。本研究では山・鉾・屋台の構造体や固定された彫刻・板飾りなどを想定し、固定された木製パネル（Restrained wood）を対象とした計算モデルとパラメータを用いて計算を行った（表2）。Strain は正が引張り側（Tension）、負が圧縮側（Compression）として表され、Restrained wood の計算モデルでは、木材の弾性変形（応力を解放すると即座に回復する歪み）の範囲を $\text{Strain} < |0.005|\%$ とし、塑性変形、破断歪み（木材が破断する歪み）を $\text{Strain} > |0.02|\%$ として評価する⁸⁾。なお厳密には個別の対象の材料物性や幾何学形状などを考慮する必要があるが、本研究では HERIE の計算モデルの妥当性や用意された個々の物性値、パラメータの評価までは踏み込まない。計算された歪みの定量性について信頼が取れているものではなく、本研究はあくまで HERIE によって条件を変えて計算したときの相対的な損傷リスク評価である点に注意が必要である。

歪みの計算には、同じ地域にある実際の曳山保管倉庫2棟（K、A）で実測した温湿度、保管倉庫所在地の外気温湿度のほか、現状の保管倉庫よりも温湿度変動を抑制したモデルデータ2種類を作成した（表3）。またこれらの温湿度データの年平均の温度、相対湿度、絶対湿度の

表1 HERIE 温湿度環境による機械的損傷モジュールの計算モデルとパラメータ

対象	パラメータ	選択肢
Painting on wood (ジェッソ層で覆われた木製パネル)	樹種	(広葉樹) Lime, Poplar, Oak, (針葉樹) Pine
	木目	Tangential (板目)、Radial (柃目)
	木板厚み	5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 40 mm
	表面の亀裂間隔	0~30 mm の範囲で1 mm おき
	長期平均温度	UL した温度から計算または7~25℃の範囲で2℃ おき
	長期平均相対湿度	UL した湿度から計算または30~70% RH の範囲で5% RH おき
	ジェッソの硬さ	硬い、柔らかい
	水蒸気移動	片面、両面
Restrained wood (固定された木製パネル)	樹種	(広葉樹) Lime, Poplar, Oak, (針葉樹) Pine
	木目	Tangential (板目)、Radial (柃目)
	木板厚み	5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 40 mm
	長期平均温度	UL した温度から計算または7~25℃の範囲で2℃ おき
	長期平均相対湿度	UL した湿度から計算または30~70% RH の範囲で5% RH おき
	水蒸気移動	片面、両面
Parchment 羊皮紙	長期平均相対湿度	UL した湿度から計算または30~70% RH の範囲で5% RH おき

表2 計算に用いた計算モデルとパラメータ

対象	パラメータ	選択肢
Restrained wood	樹種	Pine
	木目	Tangential
	木板厚み	20 mm
	長期平均温度	UL した温度から計算
	長期平均相対湿度	UL した湿度から計算
	水蒸気移動	両面

表3 計算に用いた温湿度データ

温湿度データ種類	説明
①外気	保管倉庫 K、A が所在する地域の気温と相対湿度。気象庁の過去の気象データから引用。
②保管倉庫 実測	実際の保管倉庫2棟の1年間の温湿度実測値、保管倉庫 K：2019/7/25-2020/7/24、保管倉庫 A：2022/10/27-2023/10/26
③ MODEL 1	保管倉庫の温湿度実測値をもとに、外気温の平均と外気絶対湿度の平均から計算した相対湿度を境界として、温度・相対湿度の変化幅をそれぞれ0.5倍にしたモデル。断熱・気密などを増すことで外部からの熱・水分の影響を軽減した保管倉庫を想定。
④ MODEL 2	保管倉庫の温湿度実測値をもとに、23℃・55% RH を境界として温度・相対湿度の変化幅をそれぞれ0.1倍にしたモデル。博物館等と同様の空調された保管倉庫を想定。

表4 温湿度データの温度、相対湿度、絶対湿度の年平均一覧

	温湿度データ	温度・相対湿度・絶対湿度の年平均
保管倉庫 K	①外気	16.2℃・75.4% RH・10.4 g/m ³
	②保管倉庫（実測）	17.2℃・68.5% RH・10.1 g/m ³
	③ MODEL 1	16.7℃・69.6% RH・9.9 g/m ³
	④ MODEL 2	22.4℃・56.3% RH・11.2 g/m ³
保管倉庫 A	①外気	14.7℃・78.8% RH・9.9 g/m ³
	②保管倉庫（実測）	15.0℃・76.3% RH・9.8 g/m ³
	③ MODEL 1	14.8℃・76.8% RH・9.8 g/m ³
	④ MODEL 2	22.2℃・57.1% RH・11.2 g/m ³

一覧を表4に示す。これらの温湿度データをもとに、保管倉庫から一時的に祭礼で屋外に持ち出し活用することを想定した温湿度データセットを作成し、急激な温湿度変化にさらされたときの歪みについて計算を行った。各温湿度データに曳山が祭礼に利用される期間（実際の祭礼日程を含めた1週間、10月4日から10日）の外気温湿度を挿入することで状況の再現とした。なおこのモジュールでは歪み履歴から独自のリスク指標も算出されるが、本研究では温湿度データセットから計算される歪みの相対的な比較にとどめる。

3. 結果と考察

3-1. 実際の保管倉庫の環境で発生する歪み

外気と各保管倉庫の実測温湿度を図1、2に示す。保管倉庫 K、A とともに年平均温度は外気より若干高いが、絶対湿度については大きな違いはない（表4）。また外気の季節的な温湿度変化に大幅な遅延なく追従するが、温湿度の変化幅は抑制されている（図1、2）。いずれの保管倉庫も外気の温湿度影響を強く受けるが、一定程度緩和する効果があると考えられる。

次にそれぞれの保管倉庫について、温湿度変化による歪みの計算結果を図3に示す。またそれぞれの歪みの絶対値の平均、最大値を表5に示す。保管倉庫 K、A とともに、外気条件の歪みと同様に推移するが（図3）、歪みの大きさは平均的に抑制されており、最大値は若干小さくなっている（表5）。2棟ともに夏（高温高湿）に外気条件との差が小さくなる傾向が見られ弾性変形を超えた変形も見られることや、冬（低温高湿）に歪みが抑制される傾向があるなどの共通

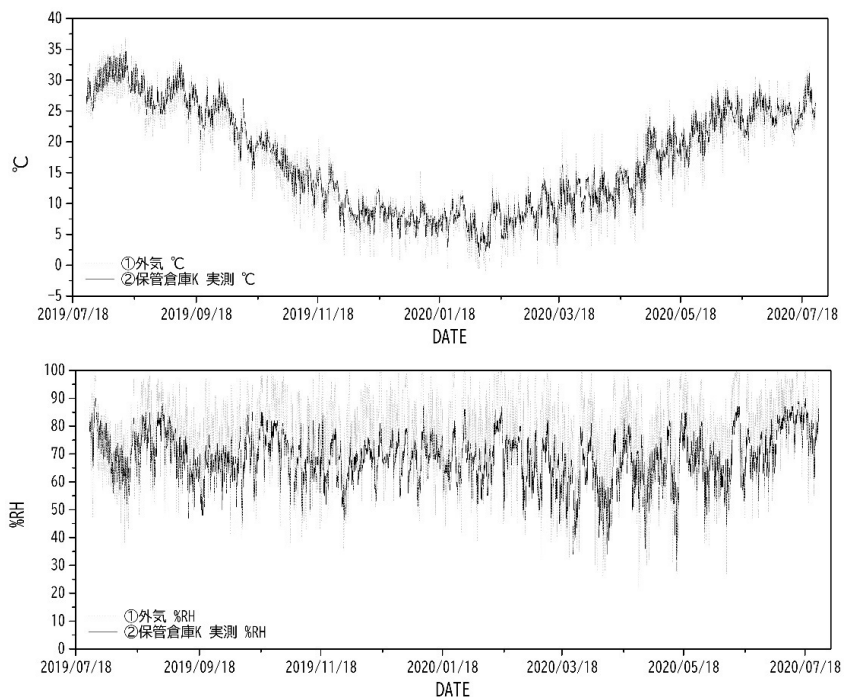


図1 保管倉庫 K (実測) と外気の温湿度

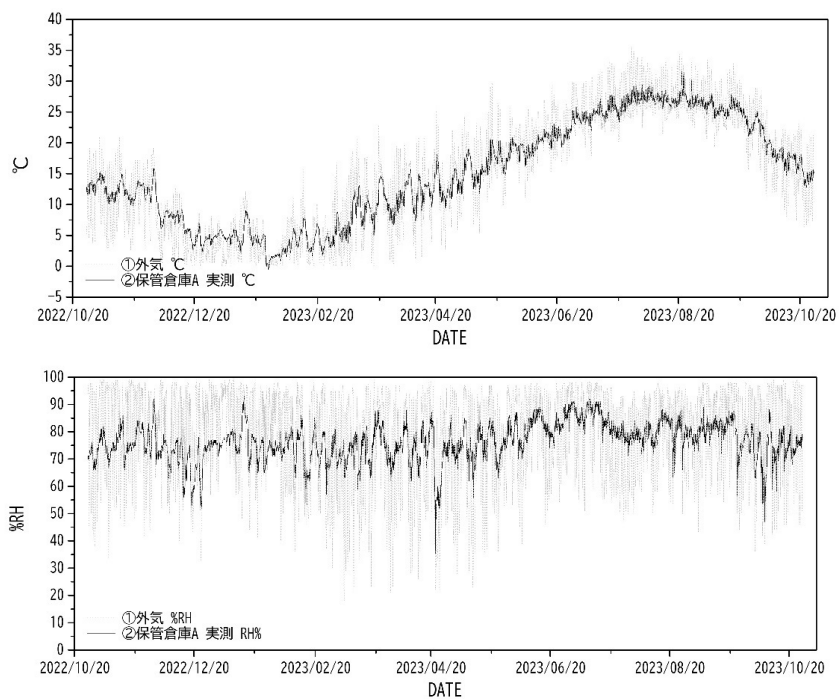


図2 保管倉庫 A (実測) と外気の温湿度

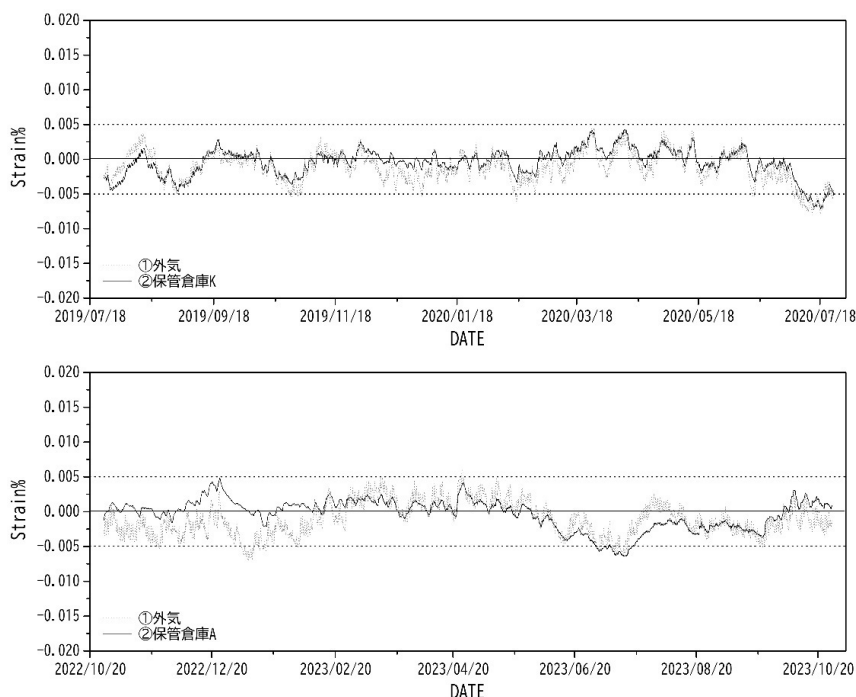


図3 保管倉庫の温湿度環境における歪み（上段：保管倉庫 K、下段：保管倉庫 A）

点が見られた（図3）。

本手法により、現状の保管倉庫において、外気温湿度の変化幅が緩和されることによる、歪みの抑制を読み取ることができた。また歪み量が大きくなる時期、抑制される時期についても一定の評価ができ、現状の保管倉庫の特性をとらえることができると考えられる。

3-2. 急激な温湿度変化にさらされることで発生する歪み

各保管倉庫の温湿度変化を抑制したモデルデータ MODEL 1、MODEL 2の温湿度を図4、5に示す。これらの図及び表4から、MODEL 1では実測の温湿度と同様に季節変化しながら現状よりも建物外部からの影響を軽減させていること、MODEL 2では年間を通じて国指定品の借用公開にあたっての望ましい温湿度環境とされている $22 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $55 \pm 5\%$ RH の範囲内で概ね一定であることが確認できる。

保管倉庫実測とモデルデータの温湿度データに、それぞれ祭礼期間の外気温湿度を挿入した温湿度データセットから計算した歪みについて図6、7に示す。これらの図及び表5から、保管倉庫実測では保管倉庫 K、A はともに、祭礼期間に一時的に外気条件下に置かれることによる歪みへの影響は小さい（図6、7矢印部分）。MODEL 1では祭礼期間の歪みは実測値を用いた場合とほとんど変わらないが（表5）、それ以外の保管期間で歪みが抑制されており、実測で見られた弾性変形範囲超過（表5網掛け）が見られなくなっている。MODEL 2では、保管倉庫 A と B とともに期間全体での歪みは抑制されており安定しているが、祭礼時に外気条件下に置かれることによる大きな歪みが見られ弾性変形範囲を超過しており、現状の保管状況よりも大きな歪みが発生している。

温湿度の実測値やモデルデータを使用することで、今回設定した祭礼期間においては、博物

表5 温湿度データセットごとの歪み絶対値の平均と最大値

温湿度データセット		平均 $ \text{Strain} \% \times 10^{-3}$	最大 $ \text{Strain} \% \times 10^{-3}$
保管倉庫 K 2019/7/25-2020/7/24	外気	1.96 (0.64)	7.98 (2.00)
	実測	1.50 (0.53)	7.17 (1.54)
	実測_祭礼あり	1.53 (0.88)	7.13 (2.89)
	MODEL 1	0.76 (0.33)	3.22 (0.85)
	MODEL 1_祭礼あり	0.79 (0.70)	3.18 (2.54)
	MODEL 2	0.13 (0.05)	0.46 (0.15)
	MODEL 2_祭礼あり	0.26 (2.95)	6.47 (6.47)
保管倉庫 A 2022/10/27-2023/10/26	外気	2.26 (1.41)	7.05 (3.22)
	実測	1.71 (1.18)	6.45 (3.13)
	実測_祭礼あり	1.68 (1.20)	6.39 (2.76)
	MODEL 1	0.90 (0.72)	3.07 (1.77)
	MODEL 1_祭礼あり	0.91 (1.04)	3.05 (2.85)
	MODEL 2	0.11 (0.11)	0.40 (0.28)
	MODEL 2_祭礼あり	0.29 (3.93)	9.12 (9.12)

() 内は祭礼期間 (10/1~14) に限定した数値、網掛けは弾性変形超過、弾性変形: $|\text{Strain}| \% < 0.005$ (5×10^{-3})、破断変形: $|\text{Strain}| \% > 0.02$ (20×10^{-3})

館での所謂望ましい温湿度環境 (MODEL 2) よりも、外気の温湿度変化に追従して変化幅を抑えた環境 (MODEL 1) の方が歪みが抑制されており、損傷リスクが小さいことを読み取ることができる。保管倉庫においてどのような温湿度環境が相対的に望ましいか、本手法によって一定の評価ができると考えられる。

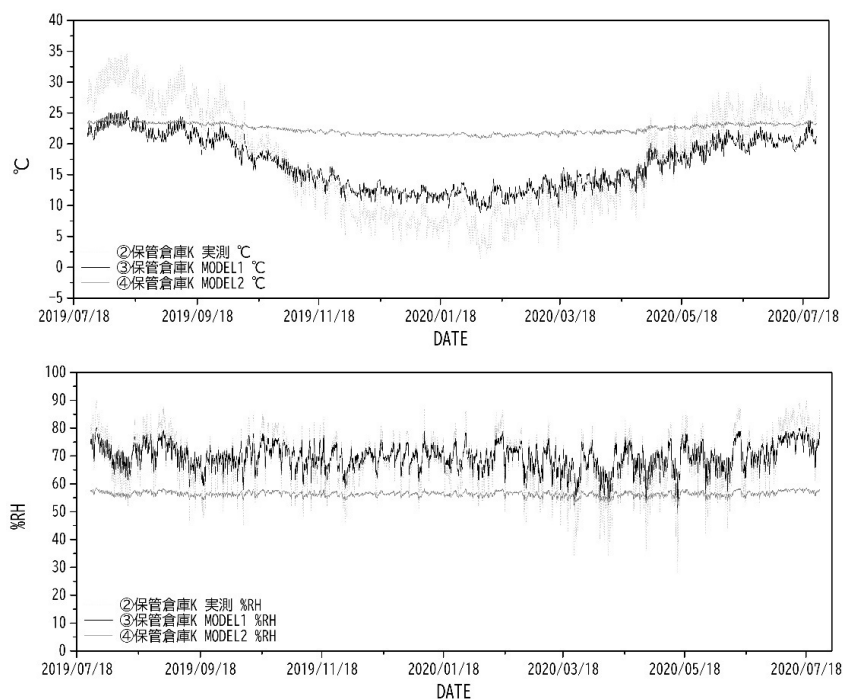


図4 保管倉庫 K における温湿度モデルデータ (MODEL 1、MODEL 2)

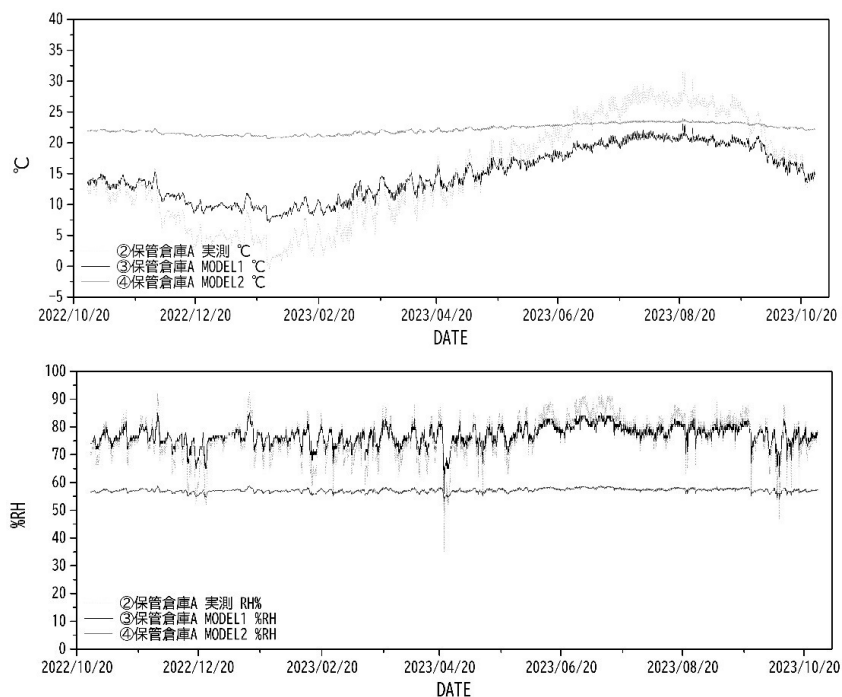


図5 保管倉庫 A における温湿度モデルデータ (MODEL 1、MODEL 2)

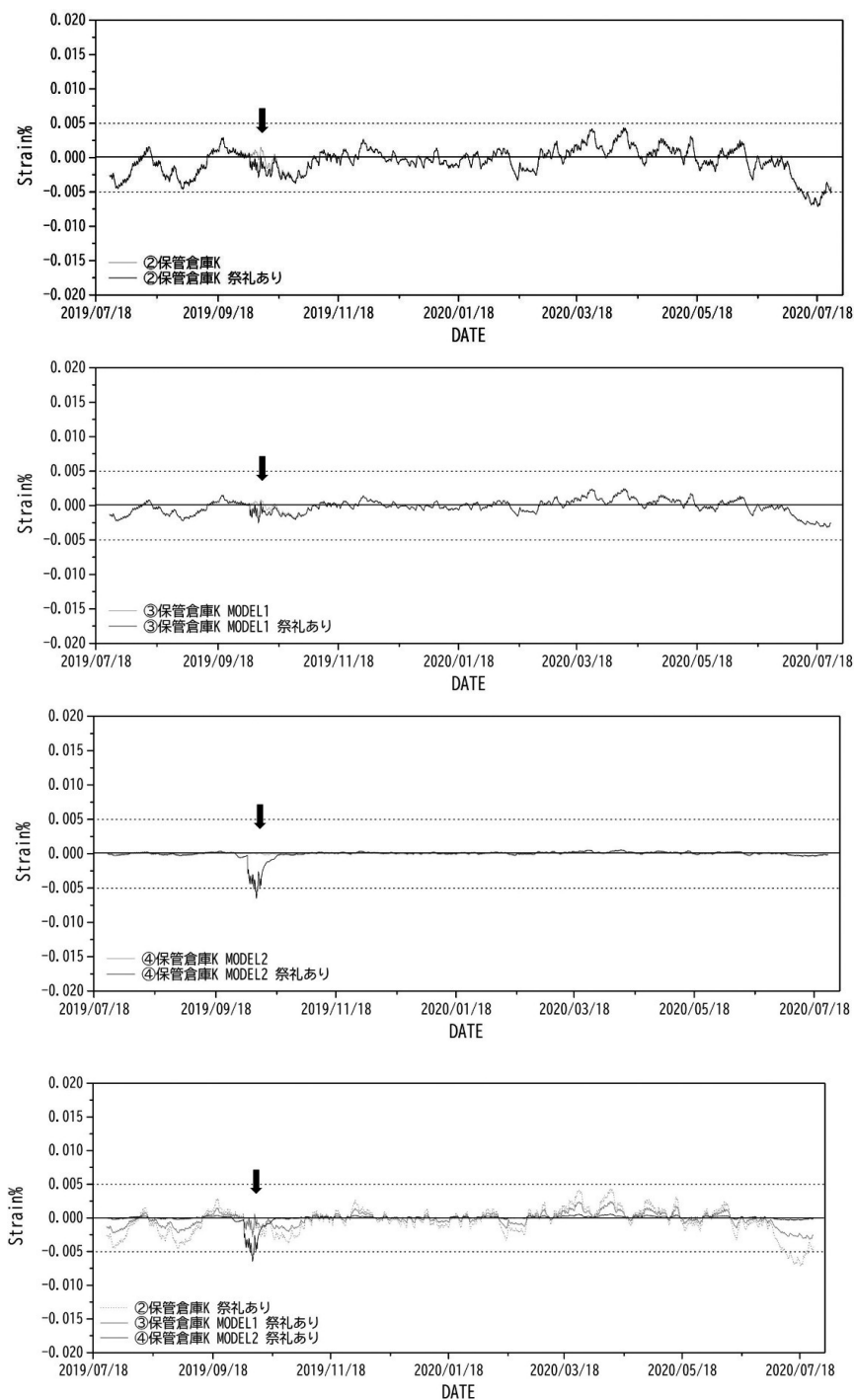


図6 保管倉庫 K：急激な温湿度変化にさらされた時の歪み（上段から実測、MODEL 1、MODEL 2、歪み比較）

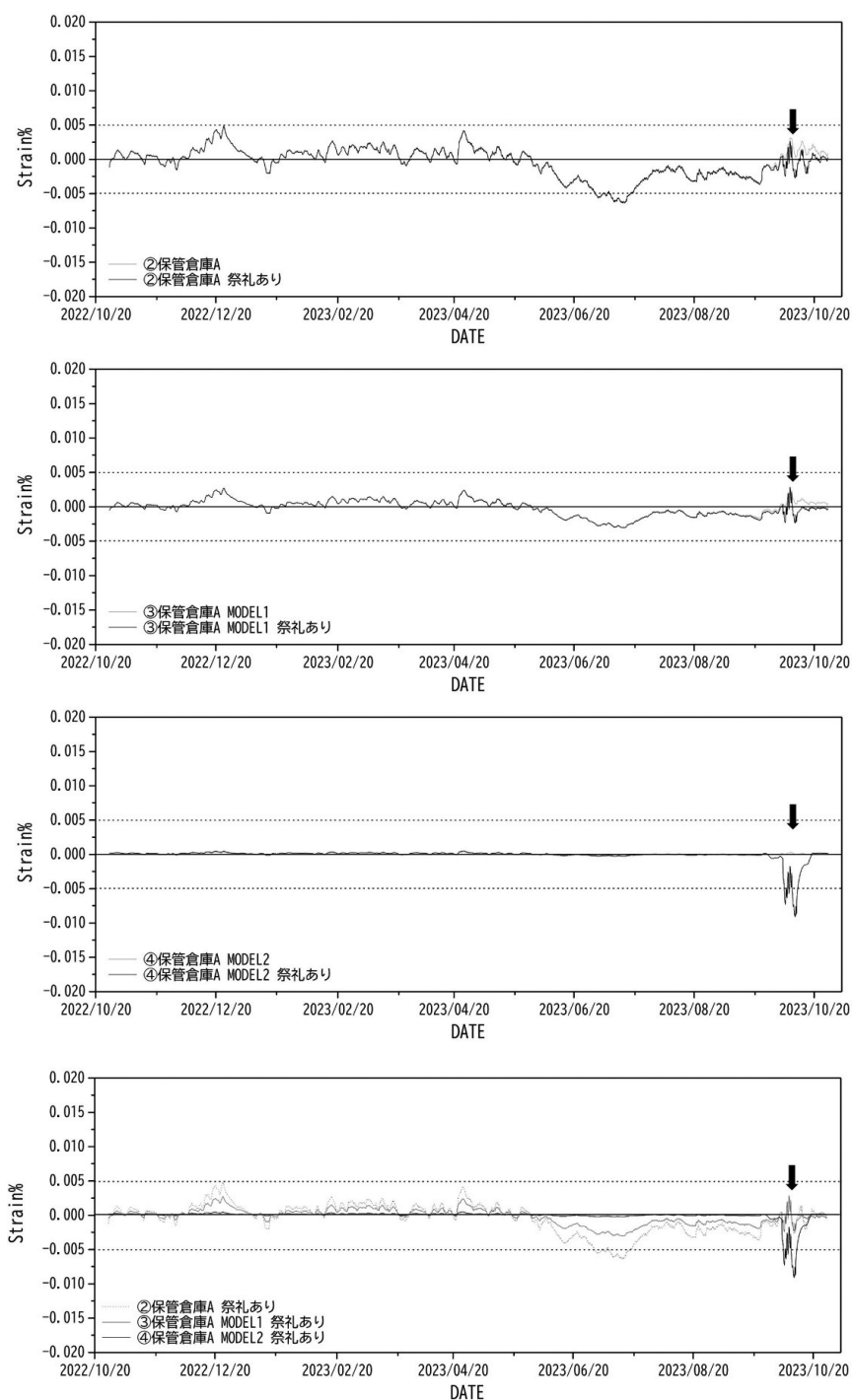


図7 保管倉庫 A：急激な温湿度変化にさらされた時の歪み（上段から実測、MODEL 1、MODEL 2、歪み比較）

4. まとめ

普段は倉庫に保管されている山・鉾・屋台などが祭礼に使用され、急激な温湿度変化にさらされる状況における木製パネルの歪みについて、HERIEの温湿度環境による機械的損傷モジュールを用いて計算を行った。本手法により現状の保管倉庫の特性や、温湿度環境を変えたときの木製パネルの歪みへの影響について相対的な評価ができるものと考え。山・鉾・屋台等の保管環境を新たに構築する場合や、改修などを行う際の目安となる情報を提供できると考えられる。

なお繰り返しになるが、HERIEは学芸員や数値解析を専門としない研究者でも簡単にアクセスできる、保存環境における意思決定支援のためのツールであり、今回の歪み量や変形特性についてもあくまでHERIEを利用したときの計算結果として取り扱う必要がある。

謝辞

本研究にあたって、曳山保管倉庫の実測温湿度データをご提供いただいた国立民族学博物館 共同利用型科学分析室に謝意を表します。

参考文献

- 1) 河村友佳子、日高真吾、園田直子ほか：滋賀県米原市所在の壽山組山倉における温湿度環境の調査、第42回文化財保存修復学会大会要旨集、p446-449 (2020)
- 2) 石崎武志、白石靖幸、肥塚祐美子：熊本城「細川家舟屋形」の保存環境に関する研究、保存科学、第45号、p227-239 (2006)
- 3) 石崎武志、白石靖幸：空調のない文化財展示・収蔵施設内の温湿度環境解析及び環境改善の試み、日本建築学会学術講演梗概集、p433 (2016)
- 4) 鉾井修一、小椋大輔、伊庭千恵美、高田暁：博物館の収蔵・展示スペースの空気温湿度環境の最適化に向けた調査研究、一般財団法人住環境財団2020年度助成報告書 (2020)
- 5) Mecklenburg MF, Tumosa CS, McCormick-Goodhart MH: A general model relating externally applied forces to environmentally induced stresses in materials, MRS Proc., 352, 285-292 (1995)
- 6) D.S.H.Lee, et.al., : Numerical modelling of mechanical degradation of canvas paintings under desiccation, Heritage Science, 10, 130 (2022)
- 7) HERIE, <https://herie.pl/Home/Info>
- 8) HERIE - Mechanical damage tool manual, <https://herie.pl/Home/Manual>
- 9) Arkadiusz Kupczak, et al. : HERIE: A Web-Based Decision-Supporting Tool for Assessing Risk of Physical Damage Using Various Failure Criteria, Studies in Conservation, 63: sup1, 151-155 (2018)
- 10) Terje Grøntoft and Lena P. Stoveland: Painted Wood Climate Risk Analysis by the HERIE Model of Building Protection and Conservation Heating Scenarios in Norwegian Medieval Stone Churches, Heritage, 6, 3089-3112 (2023)

キーワード：温度 (temperature)；湿度 (humidity)；歪み (strain)；HERIE (HERIE)；数値解析 (numerical analysis)；山・鉾・屋台 (Yama/Hoko/Yatai: float for festivals)

Evaluation of Temperature and Humidity Conditions in Storehouses for *Yama*, *Hoko*, and *Yatai* Using HERIE

MABUCHI Hajime, KAWAMURA Yukako* and MIZUTANI Etsuko

Yama, *hoko*, and *yatai*, floats for traditional festivals in Japan, are stored in simple storehouses and are utilized outdoors during festivals. Significant differences in temperature and humidity between storage and outdoor environments can cause mechanical damage to the components of these floats. In cases where painting or coatings are applied, such differences could lead to cracks or peeling.

As of 2024, HERIE, a web-based digital decision-supporting platform, is available for the assessment of risks and deterioration processes that affect heritage assets. The temperature and humidity environment is evaluated by transforming climate-versus-time histories into strain histories of wooden materials. The strain caused while panels of *yama*, *hoko*, and *yatai* are exposed to sudden changes in temperature and humidity was calculated using HERIE's mechanical damage module.

The results of the experiments show that the current storehouses suppress strain of wooden panels by mitigating changes in outdoor temperature and humidity. Assuming that stored floats are utilized at outdoor, under the conditions set in this study, the calculations indicate that environments moderating changes of temperature and humidity in response to outdoor climate is suppressing strain on wooden panels more than a strictly air-conditioned environment like museum storages.

While this experiment using HERIE is not a substitute for quantitative numerical analysis that uses physical property measurements and heat and moisture transfer analysis of individual structures, it is considered that relative risks of temperature and humidity conditions can be evaluated. Evaluation using HERIE provides information for decision-supporting of the environment management of *yama*, *hoko*, and *yatai* storehouses.

*National Museum of Ethnology