

修理記録（建造物）
環境調査報告（1）本丸御殿雁之間障壁画の支持体について
—屋内外温湿度環境が戸襖の反りに及ぼす影響の検討—

小椋 大輔
岡村 知明

1 はじめに

本報告は、文化財障壁画の現地保存及び公開に適した構成材料、工法等について環境調査を行い検討する⁽¹⁾。本稿では、第一報として、これまで原因が明らかになっていなかった戸襖の反りに着目し、原因と反り量を定量的に評価することを目的とする。

障壁画は襖や壁、屏風、障子等に描かれた絵画であり、建造物の一部を構成している文化財である。博物館の収蔵施設等の安定した環境と違い、文化財建造物内は温湿度や日照等の室内環境の変化が大きい。特に美術工芸品指定を受けていない障壁画は、現地保存せざるを得ない場合も多く、保存公開において温湿度等の条件規定がないまま、都度修理を重ねながら現地での公開が行われてきた。障壁画の劣化要因には、本紙の亀裂や破れ等の物理的劣化、カビなどの生物的劣化、光による科学的劣化等がある⁽²⁾。障壁画の劣化要因に関する研究はこれまで行われてきている⁽³⁾、常時公開され、室内環境変化の大きい文化財建造物の内部における保存と公開を念頭とする適切な対処法への取り組みは十分になされていない。

二条城本丸御殿の雁之間の戸襖8面は、片面舞良戸で仕立てられ、室内側の障壁画には雁が羽ばたく様子が描かれる。本丸御殿内で唯一外部に面する障壁画付きの建具である。この戸襖は、屋内外を仕切る外壁としての役割を果たす建具であり、建物内で最も屋内外の環境の影響を受け、変動の大きい外気環境との関連が想定された。

これまで、二条城における障壁画付きの建具の現地保存では、風雨対策として、本紙の支持体（本紙を受ける平滑な材料）⁽⁴⁾が検討されてきた。こうした本紙を支える支持体に着目し、その性能を検討することは、保存修理での仕様や工法を考える上でも重要と考える。

本報告では、以上の経緯から、修理工事に伴う環境調査報告の第一報として、障壁画本紙の亀裂等の

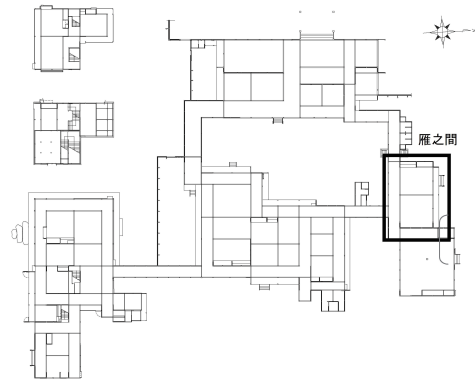


図1 本丸御殿雁之間の位置



写真1 雁之間、廊下より東室をみる

要因と考えられる戸襖構成部材の膨張収縮に基づく戸襖の反りに着目する。調査の方法は二つである。

①現地計測（実環境下による）

簡易な「模擬戸襖」を作成し、実環境下において年間を通して測定した模擬戸襖内の温湿度、および簡単な方法で測定した戸襖の変形（反り発生量）について考察する。

②実験室実験（2室の異なる環境条件による）

現状に倣った仕様の模擬戸襖を作成し、支持体がベニヤとカーボンの2種類の模擬戸襖に対して、2室の異なる環境条件を与えた実験室実験を行うことで、周囲の温湿度環境と戸襖内部の温湿度関係、環境条件と材料変形の関係より、戸襖の変形について考察する。

※本稿のカラー版は「世界遺産元離宮二条城」ホームページ内の調査研究のサイト (https://nijo-jocastle.city.kyoto.lg.jp/introduction/research/research_study/) に掲載を予定。

2 現地計測

2.1 現地計測の概要

実環境下の温湿度把握を目的に、簡易な模擬戸襖を作製し、実環境下に設置し、年間を通して温湿度測定を行った。

1) 現状の戸襖の構成

戸襖は、主に框、綿板（以下では綿板を「外板」と呼ぶ）、舞良棧等で構成されている。

写真2に戸襖の解体時の様子を示す。戸襖は上下左右の框を組み、その中に舞良棧が挿入されている。外側から内側の順に、舞良棧、外板、支持体、目貼り、下浮、上浮、本紙で構成されている。支持体には合板（ベニヤ）約3mm厚が用いられていた。下貼りのうち、みの縛り～骨縛りは施されていなかった。戸襖のチリが薄いと、防水防風のために代わりに合板をいれていたとみられる。

2) 模擬試験体の構成

現状の戸襖を参考に簡易に作製した（図2）。支持体の材料の違いによる戸襖内温湿度及び戸襖の反りを確認する目的で、現状用いられている合板に変わる支持体として、ポリカーボネード（以下「ポリカ」と呼ぶ）、カーボンを加えて、3体の戸襖を作製し、現地に設置した（表1、図3）。

測定項目は表2に示すとおりである。測定は10分間隔で、2019年10月17日から2020年3月まで計測を実施した。

戸襖の反りの計測は、上下框に糸を張り、糸から戸襖の反りを測定（A）し、上下框室内側端部から戸襖までの距離（B）を引くことで、戸襖の反り（A-B）を計測した（図4）。測定の実施は温湿度データ回収時である。

2.2 現地計測による模擬戸襖内温湿度および戸襖反りの測定結果

1) 温湿度結果

図5に2019年9月、2020年1月の温湿度、降雨量の変化を示す。なお、降雨量は、京都地方気象台の測定値である。温湿度ともに、屋外変化に追随して変動している。室内は屋外に較べて日変化の幅が大幅に小さい。

9月の屋内外の相対湿度差は最大時に約30%、1月の屋内外の相対湿度差も、最大時で約30%程度であることがわかる。降水のある日は屋外の相対湿度が100%近くまで上昇するが、室内はいずれも低いままである。

2) 支持体同士の比較

図6に、2019年9月3日～7日（夏季）、2019

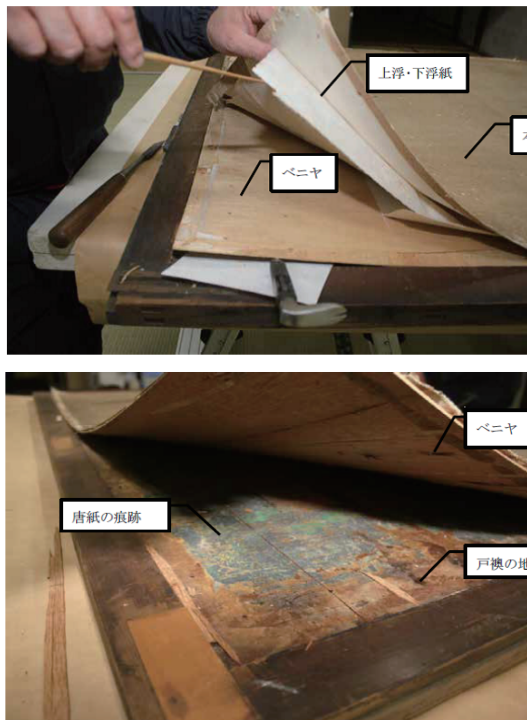


写真2 戸襖解体時の様子（上、本紙側、下、外板側）

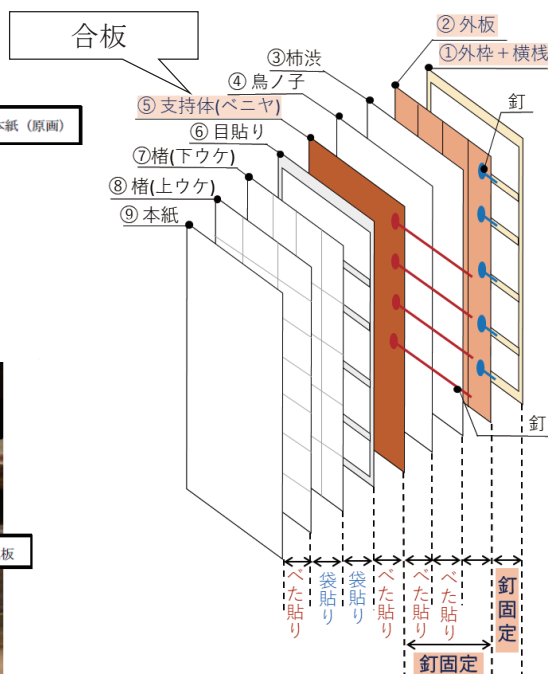


図2 模擬試験体の構成、模式図

表 1 支持体の種類

合板	ポリカーボネート (以下ポリカ)	カーボンシート (以下カーボン)
普通合板，輸入，ラワン材 1類1等 F☆☆☆☆ 製造業者：ウヰンヤトウリタ株式会社工場 製造日：2014/12/14 サイズ：3mm×1100mm×1700mm	タロンボリカーボネートプレート 国産 PC1600（プラスチック板） 製造業者：タロンシア株式会社 表示年月日：2017/4/1 サイズ：2mm×1100mm×1700mm	CABKOMA シート成型版 国産 12K2plyプレシート成型版 製造業者：小松精練株式会社 製造日：2019.4 サイズ：1.2～1.3mm× 1100mm×1700mm

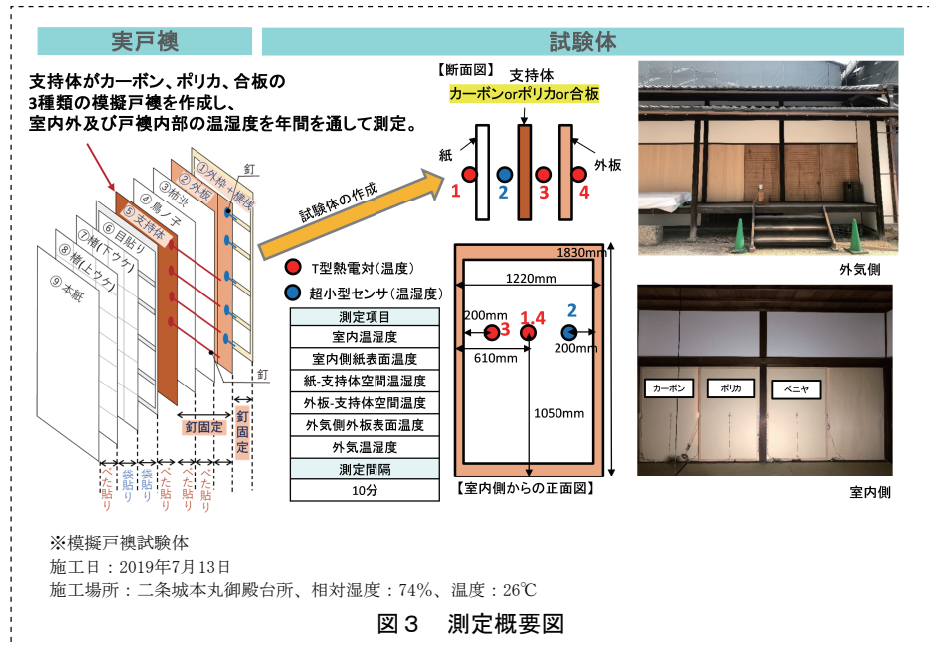


図 3 測定概要図

表 2 測定項目

測定項目	測定機器
外気温湿度	Onset HOBO pro v2 u23-002(日射シールド付き)
室内温湿度	Onset HOB0 UX100-011
各試験体戸襖表面・室内温度	T型熱電対
外板-支持体間空間温度	T型熱電対
支持体-和紙間空間温湿度	超小型温湿度センサ SHT35+小型ロガー SHTDL-3

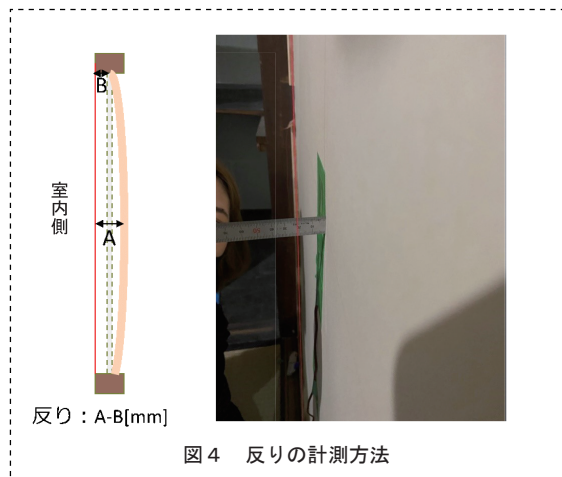


図 4 反りの計測方法

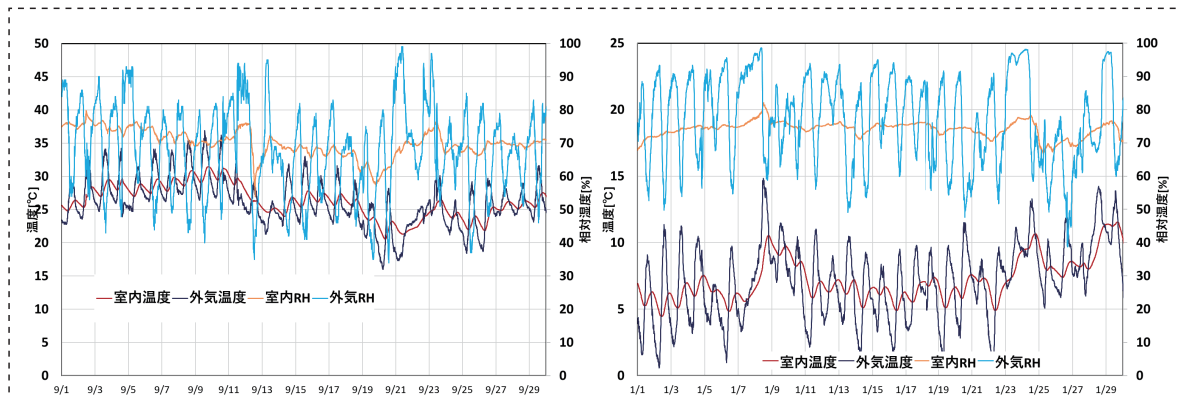


図5 温湿度結果（左：9月、右：1月）

- ・9月の室内外の相対湿度差は、最大時に約30%程度
(ex 9/9 13:30 外気RH40%室内RH70% 9/13 5:10 外気RH92% 屋内RH68%)
- ・1月の室内外の相対湿度差は、最大時に約30%程度
(ex 1/20 14:00 外気RH47% 屋内RH75% 1/16 5:50 外気RH94%室内RH75%)

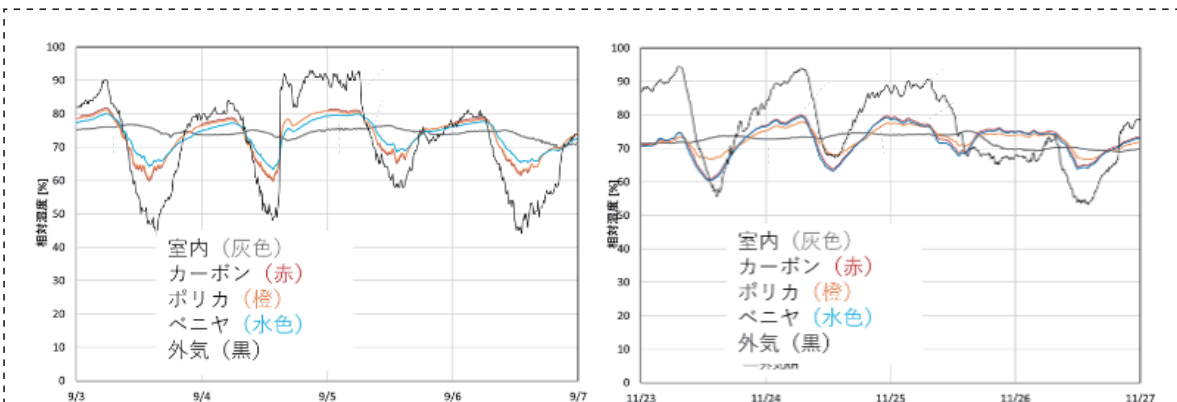


図6 支持体別戸襖内部相対湿度（左：9月 右：11月）

年11月23日～27日（冬初期）の各試験体支持体紙内空間での相対湿度を示す。

9月の屋外、戸襖内、室内の順に相対湿度の変動幅は小さく、月間を通して屋外の日較差は約40～70%程度で、戸襖内は約15～20%程度、室内は5%以下である。支持体同士を比較すると、合板の相対湿度変動幅は他2つの試験体よりも小さく、相対湿度が最大値をとる。明け方はポリカ、カーボンよりも値が小さく、最小値をとる昼過ぎはその逆であることが分かる。これはポリカやカーボンには吸放湿性がないが、合板は吸放湿性が高いことと、合板が他2つよりも断熱性が高いことが関係していると考えられる。

11月の屋外、戸襖内、室内の変動幅は9月と同じような傾向を示す一方で、支持体同士を比較する

と合板の相対湿度はカーボンとほとんど一致する。これは温度差も絶対湿度差もほとんどなくなるためだと考えられる。

3) 戸襖反りの測定結果

表3、図7に、戸襖の反り測定の結果および室内外の温湿度を示す。表3より、ポリカは反りが顕著であることがわかった。また、カーボン、合板は若干ではあるが、冬期は屋外側に反り、春先は室内側に反る結果となった。

2.3 現地計測のまとめ

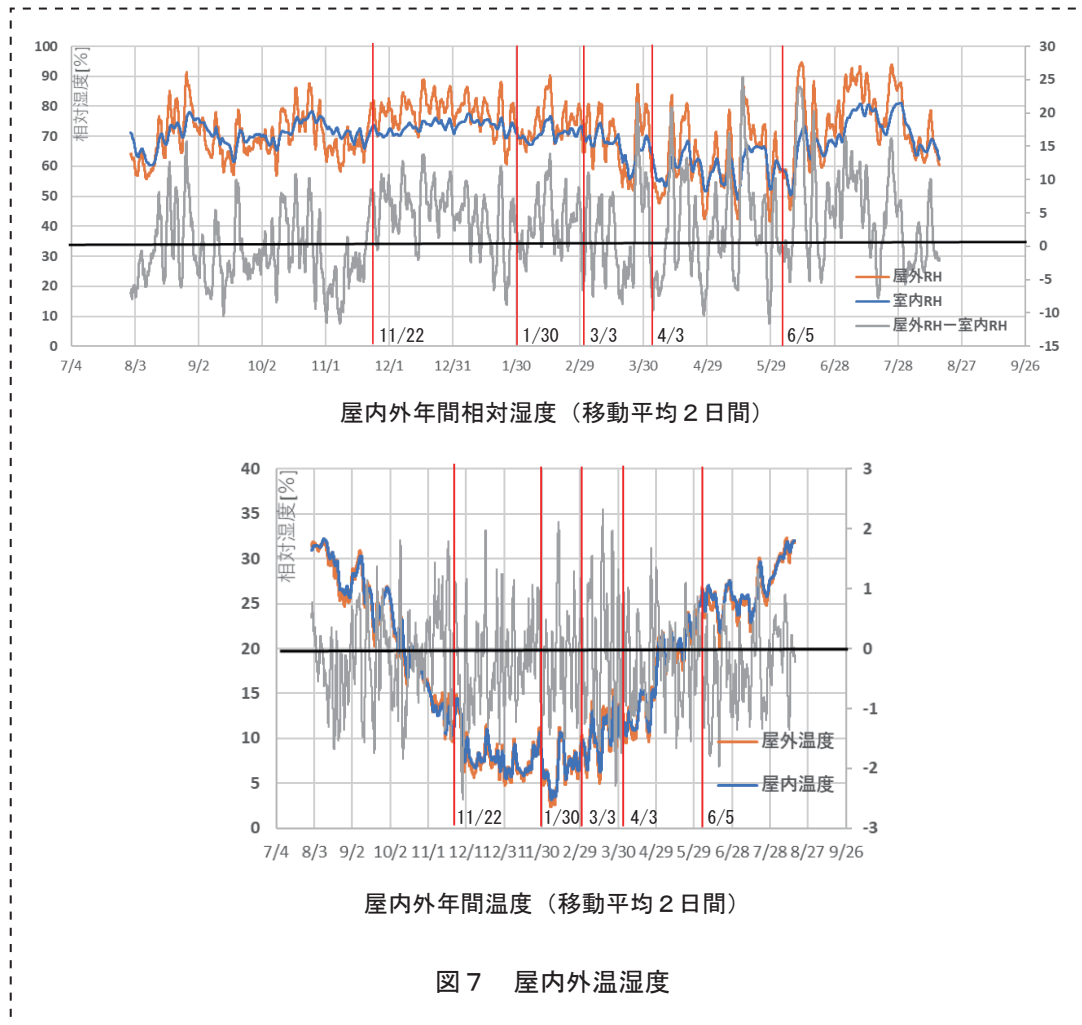
実際の戸襖周辺の環境を把握するため、簡易な模擬戸襖を作成し、実環境下での現地計測を行い、戸襖内温湿度および反りの年間測定を実施した。

室内と屋外の温湿度関係については、温湿度とも

表3 戸襖反りおよび室内外温湿度結果

		施工日 7/13	11/22 13:30	1/31 10:40	3/3 10:00	4/3 10:00	6/8 11:40
反り※ [mm]	カーボン		+2	+4	-2	-2	0
	ポリカ		+19	+20	+14	+4	0
	合板		+3	0	-1	-3	0
相対湿度	室内側	74%	70%	71%	69%	66%	62%
	外気側		64%	69%	60%	54%	47%
温度	室内側	26℃	10℃	7℃	9℃	9℃	26℃
	外気側		14℃	6℃	11℃	12℃	31℃

※ +: 室外側に反る -: 室内側に反る



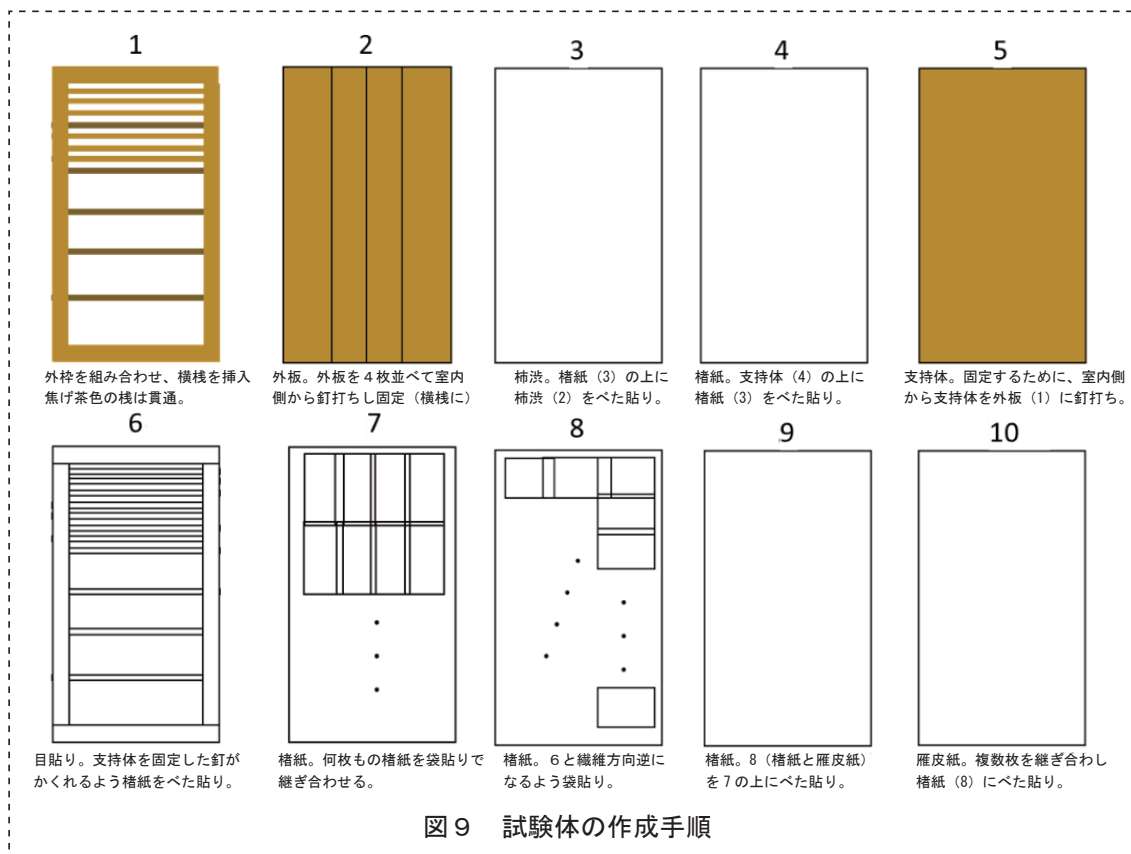
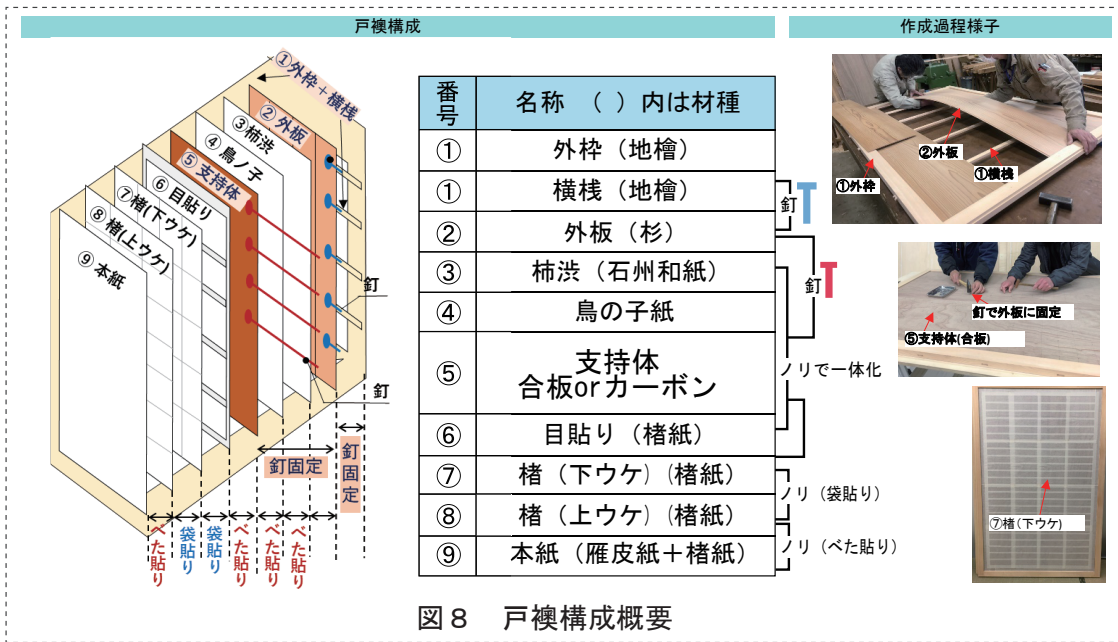
に、室内変動は屋外に追従して変化するが、変動幅は、屋外と比較して大幅に抑えられている。屋内外の相対湿度差は最大時で約30%程度である。

支持体の比較については、特に夏季において戸襖内の環境の差が見られ、合板は、他2つより断熱性と吸放湿性が高い結果となった。

紙と支持体間の相対湿度は、支持体の種類によって若干の差はあるものの、その差は最大時で3%

程度であり、大差はみられなかった。

反りの簡易測定では、ポリカは室外側に大きく反り、カーボンと合板は若干の反りがあった。次の実験室実験では、更に定量的な戸襖の反りを検討するため、支持体としてカーボンと合板の2つをとりあげる。



3. 実験室実験

3.1 実験室実験の概要

戸襖を挟んだ2室に異なる環境条件を与えた実験室実験を行った。対象戸襖となる同じ材料、工法、構成の模擬試験体を新たに作成し、2室の異なる温湿度を設定可能な2室型環境試験機（定常環境下）を用い、温湿度変化に基づく戸襖の反りを確認した。

1) 実験室

日本建築総合試験所試験研究センター環境試験室にある2室型環境試験機内で実験を行った。2室型環境試験機の詳細を表4に示す。

表4 2室型環境試験機の詳細

設備名称	2室型環境試験機
型式	CH=N010
製造番号	210101012
性能	温度範囲～20～80℃湿度範囲20～95% 内法寸法 W2600×D2600×H3200mm 間仕切り壁 W2000×H3000×厚150mm 温湿度 PD制御

2) 試験体

模擬試験体となる戸襖は、対象の戸襖と同じ材料、工法によって1枚を作製した（図9）。模擬戸襖の支持体は、ベニヤ、カーボンの2種類を用いた。ポリカは、実環境下での測定から、明らかに他2種と比べて反りが顕著であったので、支持体として適切ではないと考えたため、2室型環境試験機内での実験時はベニヤとカーボンを選択した。

模擬戸襖試験体の2つの支持体の交換については、まず合板の日本建築総合試験所での2室実験を終了し、約2週間20℃55%の一定環境下の養生室に保管した後に二条城に輸送および解体し、合板とカーボンを入れ替えた。図8に試験体の概要を示す。戸襖は、外気側から室内側の向きに、舞良棧（①）、外板（②）、柿渋紙（③）、鳥ノ子紙（④）、支持体ベニヤ（⑤）、目貼り（⑥）、楮紙（下浮）（⑦）、楮紙（上浮）（⑧）、本紙（⑨）、そしてそれらが、外枠（⑩）に囲われている。外枠及び舞良棧は地檜を使用し、外板は杉を使用している。柿渋紙、鳥ノ子紙、目貼り、楮紙、本紙はそれぞれ和紙で、柿渋紙は渋紙を使用し、本紙は雁皮紙および楮紙を使用している。

3) 実験条件

表5、図10に示すように2室の温湿度を変化させ、合計3条件の実験を実施した。

各計測項目は試験体の表面温度、空間温湿度、環境温湿度及び面外変形、含水率、面内変形で、5分間隔で連続測定した。試験体は、2室型環境試験機横にある20℃55%RHの一定環境下の養生室（写真）で保管した後、模擬戸襖移動前に事前に20℃55%RHに調整しておいた2室型環境試験機内に移動し、試験体設置およびセンサの取り付けが終了した後に、実験を開始した。模擬戸襖試験体は、2室型環境試験機の2室間の開口部に設置し、変形を拘束しない状態で試験体の周囲の隙間を発泡スチロールおよび粘着テープでふさいだ。

4) 測定項目

温湿度は、両室の空間、模擬戸襖の室内側の紙と支持体の間、支持体と外板の間で計測を行った。また図11に模擬戸襖の変位とひずみの計測概要を示すように、面外変形について、変位計を用いて計測し、戸襖全体の反りを算出し、ひずみゲージを用いて、温湿度変化時の材の伸縮率を計測した。

3.2 実験室実験による模擬戸襖内外温湿度および戸襖変位の測定結果

1) 合板試験体の実験結果

図12に合板試験体の場合の実験結果と考察の概要を示す。

図より、相対湿度（以下RH）は戸襖内部で分布があることがわかった。条件1,2の反りの発生理由は、①戸襖構成要素の前後空間のRH差で材単位が反り、②釘により反りが伝達し、③外枠の反りが内板に伝達することによると考えられる。また、条件3の反りの発生理由は、①合板の反りが釘を通して外板に伝達し、②合板と外板の初期からの膨張率差と釘の連結の影響によると考えられる。

2) カーボン支持体試験体の実験結果

図13にカーボン試験体の場合の実験条件ごとの実験結果と考察の概要を示す。

図より、相対湿度はカーボンを挟んで大きな差が生じていることが分かった。条件1は①外板とカーボンの初期からの膨張率差と釘の連結の影響により反りが生じていると考えられる。

カーボン試験体の場合、相対湿度の変化はカーボ

表 5 実験条件

合板試験体

期間	場所	環境条件
9/1~9/30	養生室	養生 20°C55%
9/30~10/5	2室型環境試験機内	条件1 室内側 20°C55%外気側 20°C90%
10/5~10/11	2室型環境試験機内	条件2 室内側 20°C90%外気側 20°C55%
10/11~10/16	2室型環境試験機内	条件3 室内側 20°C55%外気側 40°C55%

カーボン試験体

期間	場所	環境条件
11/10~11/24	養生室	養生 20°C55%
11/24~12/1	2室型環境試験機内	条件1 室内側 20°C55%外気側 20°C90%
12/1~12/8	2室型環境試験機内	条件2 室内側 20°C90%外気側 20°C55%
12/8~12/14	2室型環境試験機内	条件3 室内側 20°C55%外気側 40°C55%

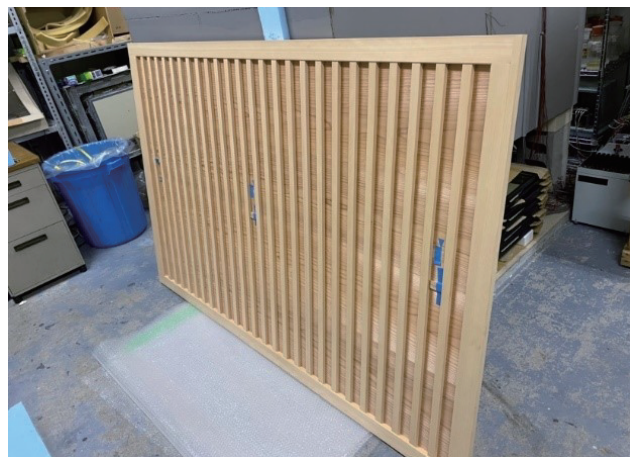
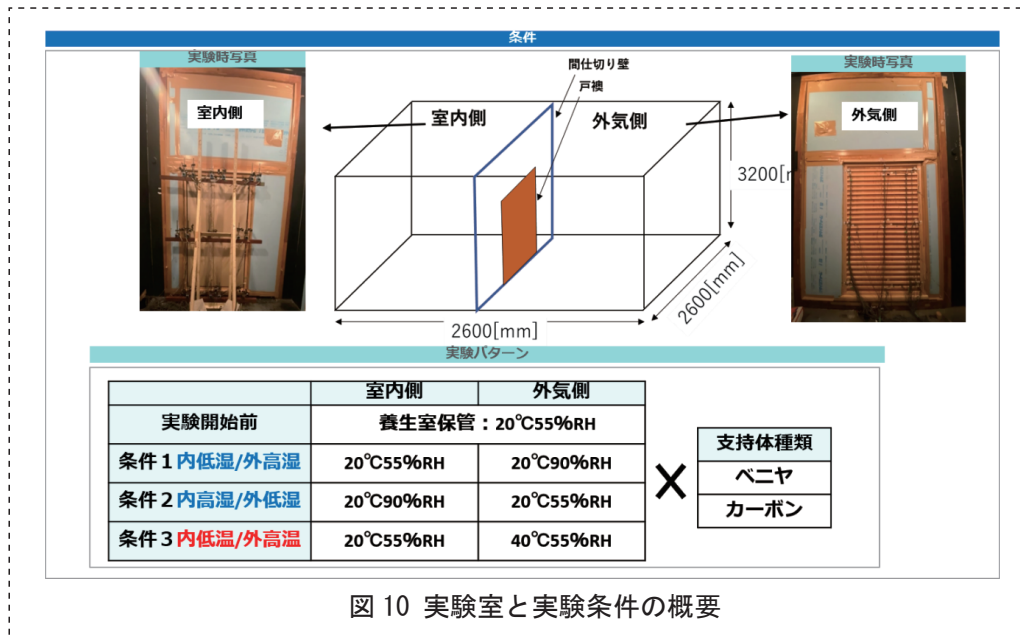


写真 4 養生室での試験体の保管状況

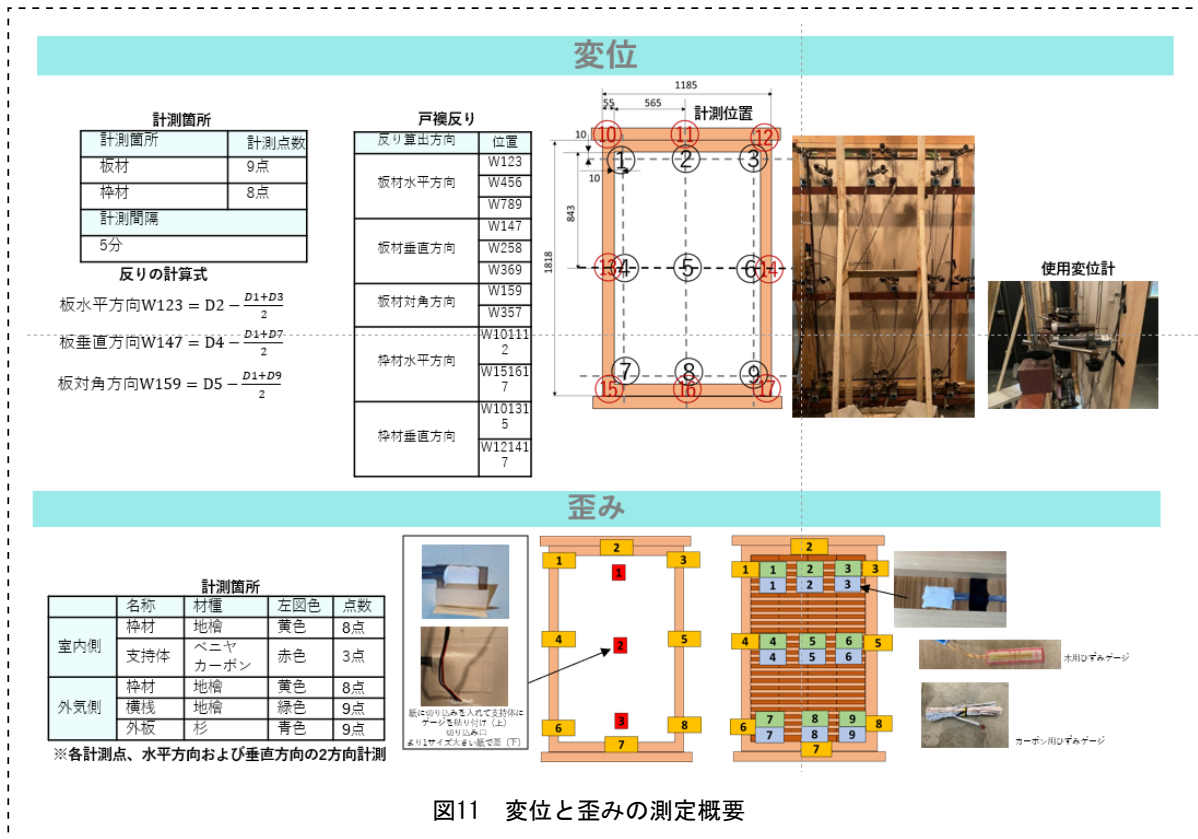


図11 変位と歪みの測定概要

※各温湿度、複数計測箇所の平均、変位は幅を示す。

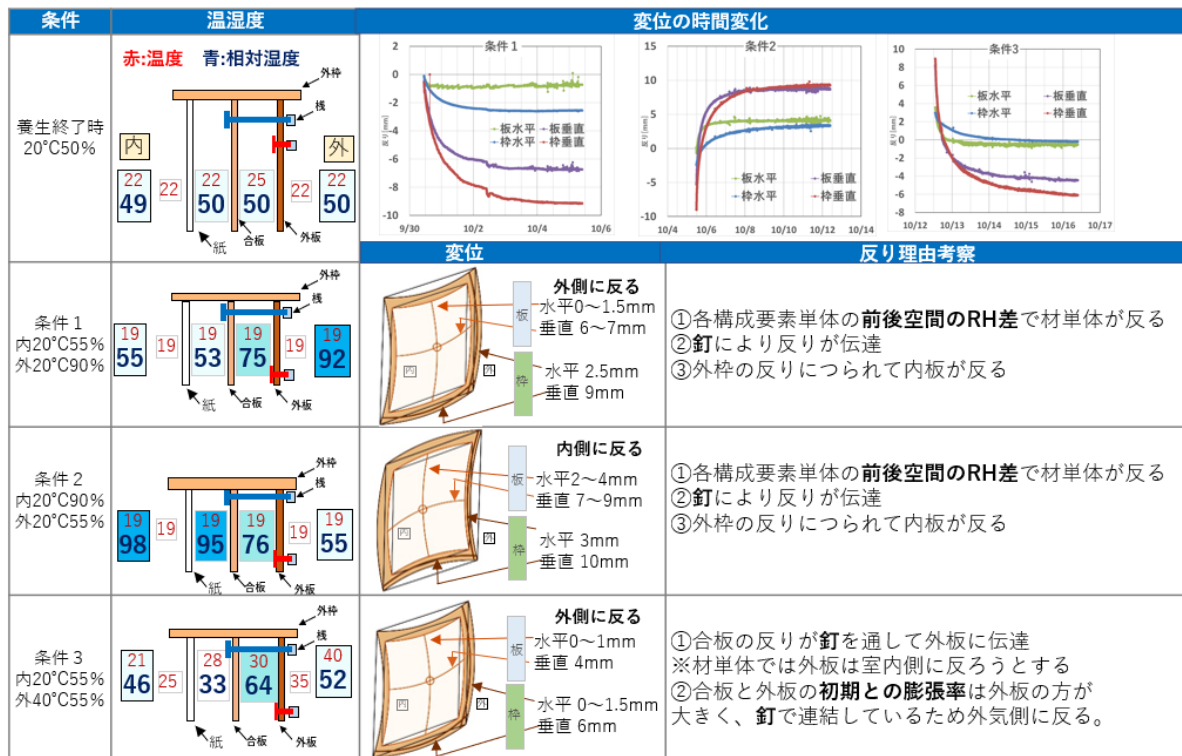


図12 合板試験体の実験結果と考察の概要

※各温湿度、複数計測箇所のアverage、変位は幅を示す。

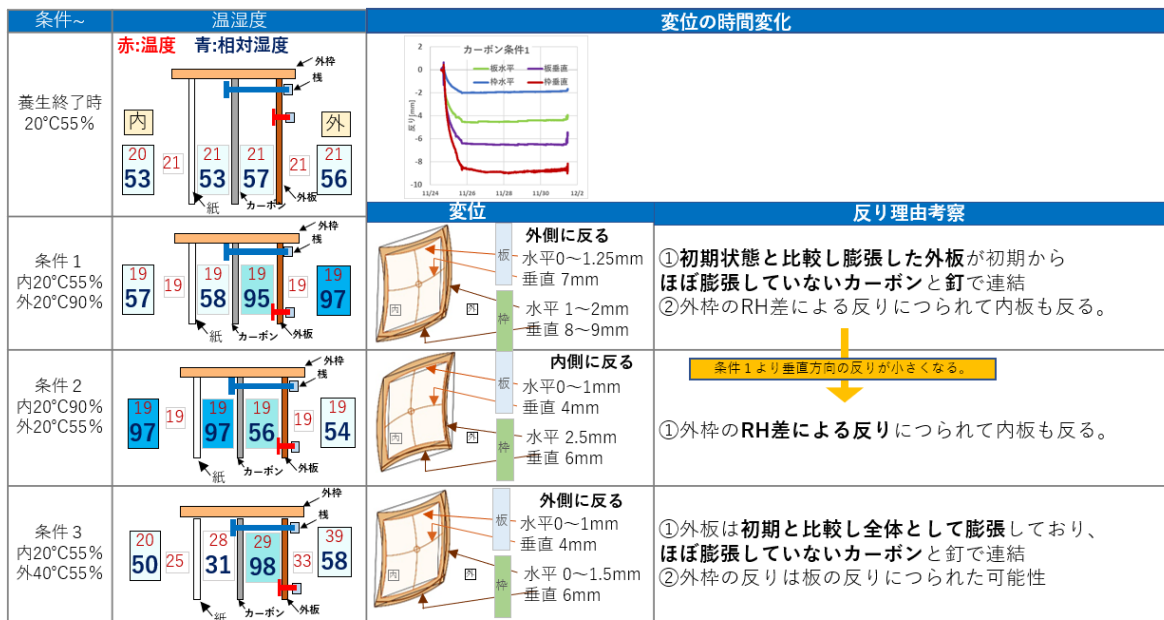


図13 カーボン試験体の実験結果と考察の概要

ンの前後空間が支配的で、膨張しないカーボンと膨張した材が釘で連結した影響で戸襖全体が反っていると考えられ、合板試験体と反りのメカニズムが一部異なる。

3.3 実験室実験のまとめ

支持体が合板、カーボンの2種類の模擬戸襖を作製し、2室型恒温試験機内で、戸襖を挟んだ両空間の温湿度を変更させ、戸襖の反り発生量を確認した。①室内側低湿外気側高湿、②室内側高湿外気側低湿、③室内側低湿外気側高温の計3パターンの実験を行った。いずれの場合も、合板とカーボンの試験体は反りが確認されたが、それぞれの戸襖内の温湿度と材の特徴を考慮すると、合板とカーボンの反りの発生メカニズムは異なると予測される。合板試験体の場合は、各材前後空間の相対湿度差によって材単体として反りが発生し、かつ膨張率の異なる材同士が釘で連結していることにより反りが発生していると考えられる。これらの反りの仕組みの解明および保存公開に適した戸襖の構成材料及び接合方法を明らかにするため、戸襖の変形解析を行う必要があり、今後実施予定である。

4. 施工にあたって

本丸御殿の修理工事では、雁之間北面の戸襖8

枚について、支持体にカーボンを施工することとした。今回の現地計測と実験室実験より、戸襖の支持体として合板とカーボンの性能を比較した結果、支持体にどちらを選択しても戸襖全体の反りに大きな差はない。また、支持体としてのカーボン自体に、反りは発生していないと考えられた。戸襖全体の反りは、カーボンと外板とを釘でしっかりと固定したため、戸襖木部（框、外板）の動きにつられたことによる。したがって、支持体としてカーボンを選択する場合は、材料単体としては水分膨張しないカーボンと、水分膨張する外板（木材）との接合の仕方を考慮することで、環境変化による戸襖木部の挙動につられることなく、全体の反りを抑える方法が考えられる。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 21H01491（研究代表者：小椋大輔）の助成を受けたものです。

【注】

- (1) 本報告は、以下の既往研究に基づいている。
 - ・陶器美詠「文化財建造物における障壁画を有する戸襖の材料変形に屋内外温湿度が及ぼす影響」京都大学修士論文、2021年
 - ・小椋大輔他「文化財建造物における障壁画を有す

る戸襖の材料変形に屋内外温湿度が及ぼす影響」
第38回日本文化財科学会大会研究発表要旨集 78
～79頁（口頭発表：B-016）、2021年

- (2) 三浦定俊「美術史研究者のための環境工学講座その(1)」1-10頁、物理的劣化は、温湿度環境変化に基づく戸襖の構成部材の膨張収縮に、生物的劣化は微生物の生育しやすい温湿度環境に、科学的劣化は紫外線による退色に影響を受けやすい。
- (3) 植松みさと（2015）「文化財建造物の室内環境と障壁面の経年劣化—水戸偕楽園内好文亭奥御殿を事例として」日本建築学会計画系論文集 第80巻第707号 213-220頁 等
- (4) 二之丸御殿では銅板を戸板に貼り込み、補強するとともに、その手前に木製の組子を入れることで、本紙を受ける支持体としていた。
- (5) ポリカの相対湿度が他2つよりも低いのは、ポリカ試験体の外枠を11月末からクッション材で覆ったことにより、支持体の温度が室内側に近づいたためだと思われる。
- (6) 作成にあたっては、株式会社大谷建具工芸に委託した。

（小椋大輔：京都大学大学院教授

岡村知明：元離宮二条城事務所文化財保護技師）