

# 〔報文〕 岩窟内環境下の木造建造物の湿害リスク抑制を 目的とした日常管理型パッシブ環境制御の実践

水谷 悦子・小椋 大輔\*・藤井 義久\*・藤原 裕子\*

## 1. はじめに

石川県小松市に位置する那谷寺は、土着信仰である白山信仰と仏教が融合した寺院であり、717年（養老年）に開山したと伝えられている。木造本堂は1597年（慶長2年）に山上善右衛門嘉廣により建立されたもので、国の重要文化財（建造物）に指定されている<sup>1)</sup>。本堂は凝灰岩の岩山中腹に立地し、懸造の拝殿、唐門、本殿の3棟で構成される（写真1、図1）。岩山と一体化した配置が特徴であり、このうち本殿は岩盤中の岩屋（以下、岩窟）に建てられている。本殿内部の建物と一体化した厨子には彫刻や彩色が施されており、建築装飾史的観点からも重要な要素とされている。

2019年（令和元年）には、岩窟南側を対象に耐震補強工事が実施されたが、工事後の2020年（令和2年）5月下旬より本殿側面において結露およびカビの大量発生が相次いで確認された。これにより、岩窟内の湿気環境の悪化が顕在化し、同年より地元関係者によって送風機や除湿器を用いた応急的な環境改善対策が講じられるに至った。結露・カビの顕在化には複合的要因が関与しうるが、岩窟内の湿気環境を把握したうえで、実行可能な改善策を段階的に検討する必要性が高まっている。

本研究は、2021年（令和3年）に那谷寺より岩窟内の環境改善に関する相談を受けたことを契機として、2022年（令和4年）より環境調査を開始し、現在まで継続しているものである。岩窟内という特殊な環境下に立地する木造建造物では、地盤および岩体由来の水分動態や換気条件の影響を強く受け、結露やカビの発生を伴う湿害リスクが顕在化しやすい。一方で、岩窟内に建てられているという立地そのものは、当該建造物の宗教的意味や建築的構成と不可分であり、その関係性を保ちながら適切な修理周期のなかでの維持管理を図ることができるような環境整備策が求められる。

本研究は、岩窟内という特殊な環境条件下にある木造建造物に対して、日常管理の範囲で実施可能なパッシブな環境制御策を実際に導入し、その有効性と限界を実測データに基づいて検証した事例研究である。

本報では、現地調査および長期環境計測に基づき、岩窟内における湿害リスクの実態とその環境形成要因を整理した上で、季節に応じた換気操作を中心とする日常管理型の環境制御策を試行し、その効果検証を行う。

なお本研究で対象とする那谷寺本殿は岩窟に立地する木造建造物という極めて特殊な条件を有するが、高湿度や結露を生じさせる地盤・岩体由来の水分動態の捉え方や、日常管理で取り組み得るパッシブ対策の検討方法やその評価手法は、横穴墓、岩陰遺構、岩窟寺院などといった周囲地盤の湿潤環境に大きく影響を受けるその他の文化財にも十分に適用し得るものである。

\*京都大学

## 2. 岩窟の空間特性とこれまでの保存対策

まずは前提条件として本殿が建立されている岩窟の空間特性と既存の保存対策に関して整理する。

### 2-1. 岩窟の空間特性

本殿の立地する岩窟は、自然浸食によって形成された岩窟を基盤として成立したものであり、境内の中でも最も神聖な場所とされている。本殿を建設するにあたり、岩盤の一部には人為的な加工が施されているものの、岩窟全体の形状は自然地形に強く規定されている。

図1に本堂の平面図と岩窟内の内観を示す。本殿の外周部には幅約1 mの通路が設けられており、参拝者は岩窟内に入り、図1中の矢印で示す順路に従って本殿外周を時計回りに巡る、いわゆる「胎内くぐり」を行う。また岩窟南東奥には竪穴跡が存在し、かつてこの竪穴が胎内くぐりの一部として利用されていたと言われている。

岩窟内空間の形状には、方位による顕著な違いがみられる。西側の唐門のある開口部分は高さ約4.5 mであるのに対し、本殿背面（東面）の地点では約2.5 mであり、高さは奥に行くほど低くなっている。本殿外周通路の端部から岩盤表面までの水平距離は、図1に示す通り、北側および東側で大きく、一方、南側では水平方向の奥行きがほとんどなく、岩盤表面が通路から極めて近接している。また、岩窟の北側および東側においては岩山が連続して広がっており、周囲地形によって包まれた構成となっているのに対し、岩窟南側は岩山の端部に位置しており、屋外は直ちに沢地形へと連続している。

### 2-2. 耐震補強工事と既存の対策

岩窟南側は、岩盤の端部であることから岩厚が薄く、また屋外と岩窟内部を連続するクラックも発達しており、力学的安定性の観点から脆弱な部位とされてきた。このため、2019年（令和元年）には、岩窟南側を中心とした耐震補強工事が実施された。

図2に耐震補強工事の実施状況を示す。岩盤のクラックへのモルタル充填および、屋外の沢部分におけるモルタル補強工事が行われた。また、これらの工事に伴う振動の影響と考えられるが、岩窟南東部奥の竪穴跡についても、工事後に閉塞していることが確認されている。

耐震補強工事後の2020年（令和2年）5月には、本殿表面において大量の結露およびカビの発生が確認された。これを受けて、地元関係者により、岩窟内の湿気環境を改善するための応急



写真1 那谷寺本堂の拝殿（左）と唐門（右）の様子

的な対策が講じられた。具体的には、通年を通して換気を促進することを目的として、唐門上部の板戸を開放するとともに、岩窟内に複数台の送風機が設置された。送風機の運用は、防火対策の観点から、通年を通じて日中の開門時間帯に限定して実施された。

また、業務用除湿器については、一時期導入され、運用が試みられたものの機器故障が生じたため、短期間で運用を中止するに至っている。

以上のように、那谷寺本殿が立地する岩窟は、地形的・空間的に特有の条件を有するとともに、耐震補強工事およびその後の応急的な環境対策が施されてきた経緯を持つ。次章では、これらの前提条件を踏まえ、現地における調査および環境計測に基づいて、本殿および岩窟内における湿害リスクと温湿度環境の特性について整理する。

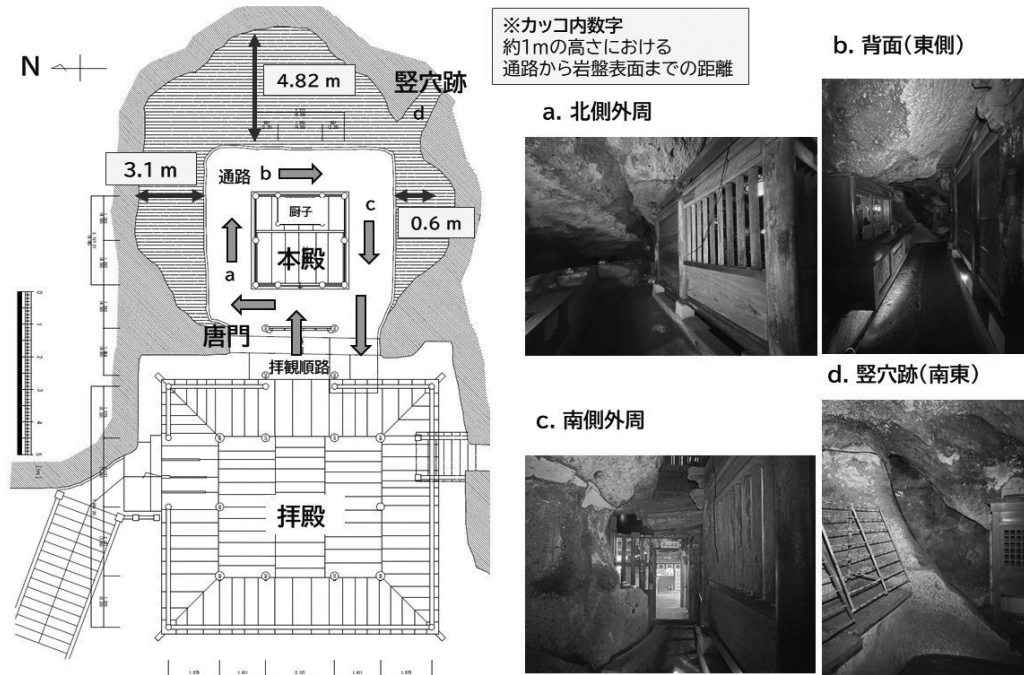


図1 本堂の平面図と岩窟内の内観

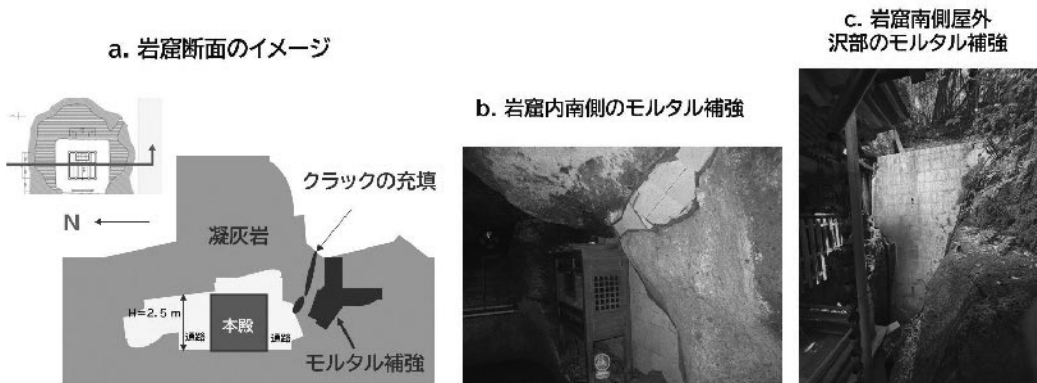


図2 耐震補強工事の実施状況

### 3. 現地調査による本殿の湿害リスクと環境特性の把握

#### 3-1. 本殿で発生している湿害の特徴

本殿における目視観察の結果、顔料の剥離・亀裂、虫害、カビおよび木材腐朽など、様々な損傷が確認された。本報では、湿気環境との関連性が特に強いカビと木材腐朽に着目し、その発生部位の特徴を整理する。

まずカビは本殿全体で確認できるが、外周部に面する背面（図3a）および南面の奥側（岩窟側）の柱の表面（図3b）で発生が顕著であり、後述の通り岩窟内の高湿環境の影響を強く受けていると考えられる。

次に、木材腐朽は蟻害とともに構造物の強度性能にも影響を与えるため特に回避すべき現象である。本殿床下に関しては、蟻害は確認されなかったが、腐朽と甲虫類によるものと考えられる虫害が確認された。床より上層の主要部材については、概ね顕著な腐朽は認められなかったが、部材の結合部の奥部や熱伝導率が異なる材料が使用されている箇所において、一部腐食が進行していると推測される箇所が確認された。具体例として、格子窓の格子の窓台は壁体内に深く差し込まれる「大入れ」の納まりになっており、その部分（図3c）や接合部（図3d）などにこの症状が確認された。また厨子には金属部品や補修材としてモルタルが使用されている箇所が存在し、これらの材料と木材の界面では、熱伝導性の違いから結露に起因する腐朽リスクが高いと推察される。実際に、厨子の垂木の一部は、その奥（根元部）で釘止めしてあるが、釘の結露と、その水分の垂木への浸潤、さらに浸潤部位の腐朽によって、強度が低下し、下垂していた。他の垂木もこの状態に近いと推定される。またこの腐朽部分を食害する甲虫の痕跡（図3d）が確認された。

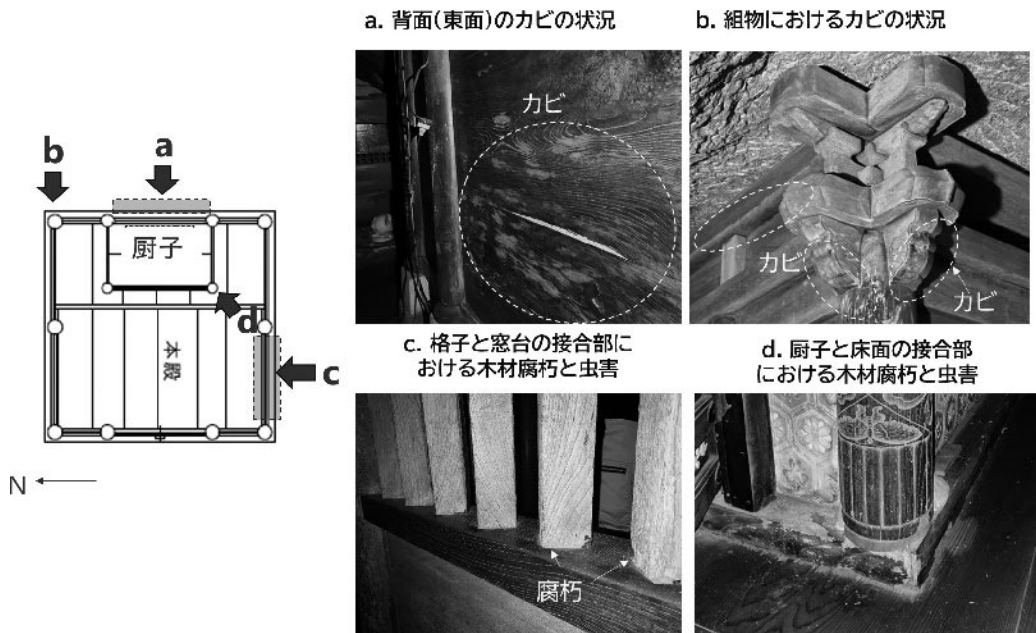


図3 本殿で確認される湿害

### 3-2. 岩窟内の水分浸透、蓄積の状況

図4に、目視観察と寺院職員へのヒアリング調査から整理した、岩窟内の主要な水分浸透箇所と水分蓄積の状況を示す。本殿は岩山の中腹に位置していることから、地下水の影響は少なく、主に雨水が岩盤を通して浸透しているものと考えられる。現時点で確認されている主な雨水の侵入経路は、岩窟北奥（WP1）、岩窟奥（WP2）、竪穴跡（WP3）の3か所である。このうち岩窟北奥（WP1）では、調査のたびに岩盤上部からの水滴の落下が確認されており、継続的に水分が岩窟内へ供給されていると推察される。その他の侵入経路（WP2・WP3）では、降雨時に水分が流入する様子が確認されている。また岩窟奥には土が堆積しており、WP1およびWP2から流入した水分は土中へ浸透している。

本殿外周通路には排水を目的として側溝（図4aの破線部）が設けられているが、現在は図中北側の網掛け領域において側溝内に常時水が滞留している状況にある。北側側溝に溜まった水は屋外へ排出されることなく、WP4付近まで到達した後、岩盤へ浸透している。一方、南側の排水路では通常は水の滞留は見られず、降雨時のみ流水が確認され屋外へ排出される。特に北側側溝での水分滞留は、耐震補強工事以降に確認されるようになった事象である。この結果を踏まえると耐震補強工事以前の岩窟内の温湿度データは存在しないものの、工事に伴い岩盤内の水の流路が変化し、その結果岩窟内の湿気環境がより高湿側に変化した可能性が推察される。

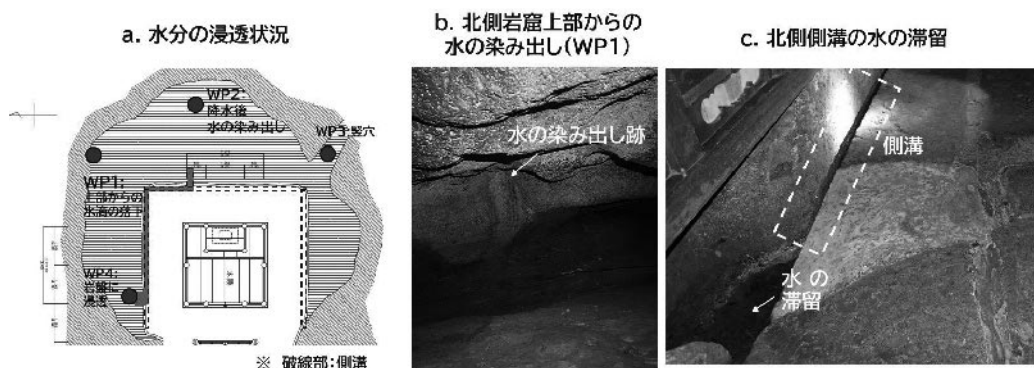


図4 岩窟内の水分の流入蓄積箇所とその様子

### 3-3. 岩窟内の温湿度環境の特徴

図5に岩窟内及び本殿の温湿度センサーおよび表面温度センサーの設置位置を示す。なお3章で示す表面温度、温湿度の結果は、2章2節で示した既存対策として換気を目的として通年に渡って唐門上部の板戸が開放され、日中は岩窟内に設置した送風機（後述するF1～F5）が運転されていた期間のものである。

図6に、2022年6月1日から1年間の本殿および岩窟表面の表面温度を24時間移動平均したものを示す。図より外気に近い本殿床面（L1）と比較し、岩窟（L2、L3）の表面温度の年変動が小さいことが分かる。10月から3月中盤にかけては岩窟内の表面温度が外気より高温になり、それ以外の時期は外気の方が高温になる傾向が見られる。また、岩窟北側（L2）と南側（L3）を比較すると、北側の年間変動が小さいことが分かる。この差は2章1節で示した岩山における岩窟の立地と岩窟の内部形状の特徴により、北側（L2）は、南側（L3）と比べ周辺地盤の

熱容量の影響を受けやすいことが影響していると考えられる。さらに、岩窟奥 (L4) について、機材故障が生じるまでの夏季の測定値を岩窟北側 (L2) と比較したところ、両者に大きな差は見られなかった。このことから、岩窟北側から奥部にかけての水平温度分布は小さく、全体として安定した熱環境を形成していると推察される。外気と最も年間の温度変動が小さい岩窟北側 (L2) を比較すると、外気の年間の日平均温度が $-2.5\sim 30^{\circ}\text{C}$ の範囲で推移するのに対して、岩窟北側 (L2) では年間温度が $5\sim 23^{\circ}\text{C}$ に収まっていた。

図7に、2022年6月1日から1年間の温湿度測定結果を24時間移動平均したものを示す。図7aより、屋外に近い唐門南出口 (P3) を除き、岩窟内の相対湿度は年間を通じて概ね85% RH以上で推移しており、常に高湿な環境にあることが分かる。特に本殿北側通路 (P1) および岩窟奥 (P2) では夏季に相対湿度が100%近くまで上昇する。また、夏季には奥へ進むほど湿度が高くなる一方、冬季には岩窟奥 (P2) の相対湿度が、開口部に近い測定点より低くなる傾向が確認された。

図7bからは、岩窟内の温度が外気の年変動と比べて小さく、かつ岩窟開口部 (唐門) から離れるほど温度の年較差が小さくなることが分かる。また、岩窟内の気温は概ね3~9月には外気より低く、10~2月には外気より高い傾向を示した。

図7cの絶対湿度の結果を見ると、岩窟内は概ね外気よりやや高く推移する時期が多いものの、岩窟奥 (P2) に限っては夏季に外気より低くなる特徴がある。これは、岩窟奥 (P2) では相対湿度がほぼ100%で推移しており、温度に依存した飽和絶対湿度により、その上限値が決まるためである。すなわち、温度の低い岩窟奥では飽和水蒸気量が小さいため、外気に比べ絶対湿度が低くなったと考えられる。

さらに、3章2節で示したように、岩窟内には常時水分供給が存在することから、岩盤温度が空気より低い場合には吸湿、高い場合には放湿が生じていると推察される。これを踏まえると、岩盤温度が高くなる冬季には放湿量が増加すると考えられるが、岩窟奥 (P2) では温度上昇に伴う相対湿度の低下がより強く現れ、結果として冬季に相対湿度が他の測定点より低くなったものと推察される。

### 3-4. 岩窟内における結露の発生リスク

岩盤および本殿表面における結露発生リスクを評価する。ここでは周囲空気の絶対湿度が表面温度から算出される飽和絶対湿度を超えた場合、結露発生条件を満たしていると判断する。3章2節に示した木材腐朽の発生箇所からも示唆されるように、実際の結露発生には材料の組み合わせや構造特性といった要因も関与する。このため、ここでの評価は結露発生の有無を厳密に示すものではなく、結露発生リスクの相対的な強度と季節的な変動傾向を把握することを目的とする。

図8に岩盤表面 (北) と本殿表面 (北) における結露発生条件を満たした場合の、周囲空気の絶対湿度と表面温度から算出される飽和絶対湿度との差 (瞬時値) を示す。数値が高いほど、結露発生のリスクが高いことを示している。図8aより、岩窟表面 (北) では12月~1月上旬を除く期間において結露発生条件を満たしており、特に6~9月はその頻度および絶対湿度差がともに大きく、結露発生リスクが極めて高いことが分かる。

一方、本殿 (北) では結露発生条件を満たす際の絶対湿度差は岩窟表面と比較し小さく、通常の結露発生リスクは岩窟表面と比べると小さいものの、10月から春先にかけて結露発生条件を満たす頻度が増加する傾向がみられた (図8b)。

特に本殿表面における結露は、木材腐朽やカビの発生に直接的な影響を及ぼすため、その防

止は木造建造物の保存上きわめて重要である。そこで、本研究では結露発生条件を満たした際の温湿度および表面温度の測定値に基づき、その発生要因について個別に検討した。その結果、冬季の結露は主として夜間の温度低下時に発生するのに対し、春先においては、外気温が急激に低下する場合に加え、外気温が急上昇して暖かく湿った空気が流入する場合の双方が、結露発生の要因となり得ることが確認された。

### 3-5. 本殿における湿害リスクの整理と対策の枠組み

ここまでの現地調査の結果を踏まえ、那谷寺本殿における湿害リスクの現状と、それに対して考え得る保存対策の枠組みについて考察する。

#### 3-5-1. 現状の本殿の湿害リスクに関する考察

那谷寺本殿では、カビの発生や木材腐朽など、湿気環境の影響によると考えられる損傷が確認されている。しかし、これまでに実施した現地調査時の目視観察および関係者へのヒアリング結果を踏まえると、これらの損傷はいずれも短期間に急激に発生したものではなく、岩窟内という特有の高湿環境のもとで、長期的に進行してきたものと推察される。一方で、耐震補強工事の前後において、岩窟内の水分浸透経路や水分の蓄積状況の変化が確認されており、湿気環境が悪化する方向に推移している可能性があることには留意が必要である。

加えて、既存の対策が講じられている状況下においても、岩窟内は年間を通じて高湿な環境にあり、本殿では特に秋季から春先にかけて結露発生リスクが高まる傾向が確認された。これらの結果を総合すると、現時点において湿気環境を主要因として急速に進行している損傷は確認されていないものの、長期的な保存の観点からは、湿害リスクの顕在化を防ぐための緩和策を計画的に講じていくことが望ましいと考えられる。

#### 3-5-2. 有効な保存対策に関する考察

湿害リスク低減に向けた対策を検討するにあたり、岩窟内に浸透・蓄積した水分を適切に排水し、地盤からの水分蒸発量を低減することは、技術的には有効であり、実現可能性の高い対策の一つである。しかしながら、排水経路の調整や改修には、岩窟内外の構造や参拝動線への影響、ならびに関係者間での調整を要するため、短期間での実施は容易ではない。これらの理由から、本研究では排水対策そのものの有効性を否定するものではないが、今回の検討対象からは除外し、今後の検討課題として位置づけることとした。

一方で、岩窟内温湿度および結露リスク評価の結果を踏まえると、冬季には外気流入に伴う本殿表面温度の低下を抑制し、結露発生リスクを緩和することが有効であるのに対して、夏季には外気条件を適切に利用した換気により、岩窟内の高湿環境を緩和することが期待される。すなわち、岩盤温度が低く外気温が高い夏季には換気を積極的にを行い、岩盤温度が比較的高く外気温が低い冬季には換気を最小限に抑えて熱を保持するとともに、比較的高い温度である岩盤からの放射熱を活用することが、本殿における湿害リスクの低減に有効であると考えられる。

以上を踏まえ、本報では日常管理の範囲で実施可能なパッシブな環境制御として、季節に応じた換気対策を試行し、その効果について検証を行った。

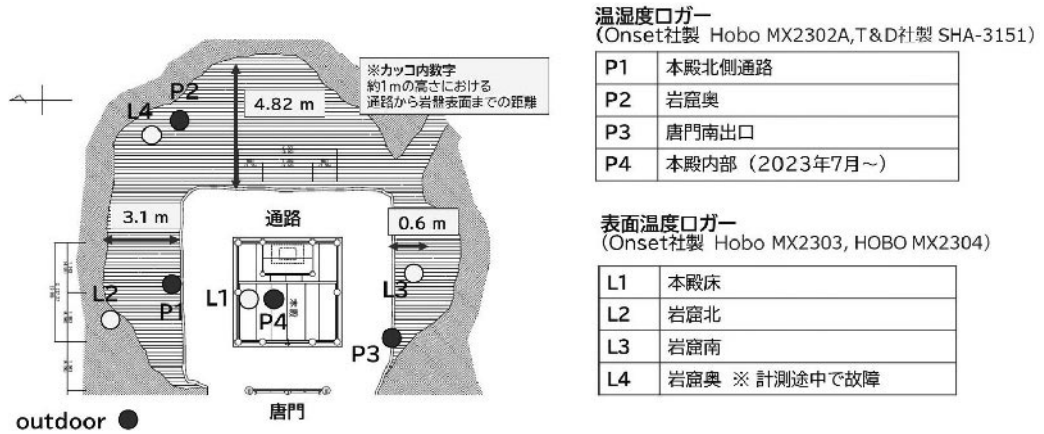


図5 温湿度センサー及び表面温度センサーの設置箇所

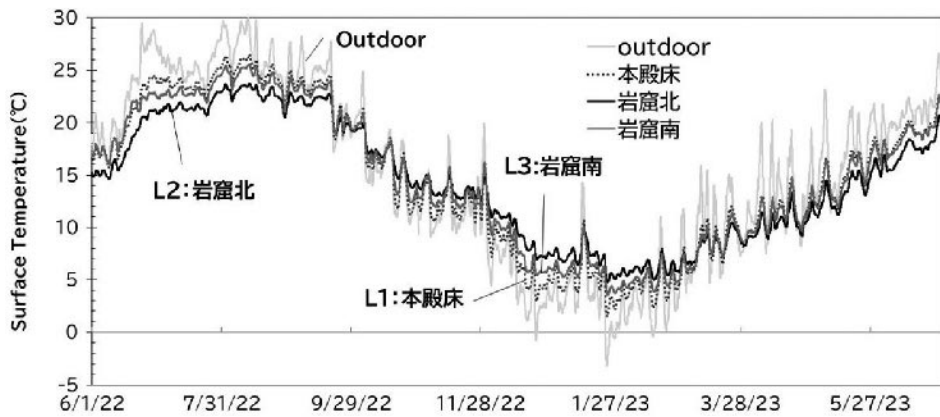


図6 岩盤・本殿の年間の表面温度の推移 (24時間移動平均)

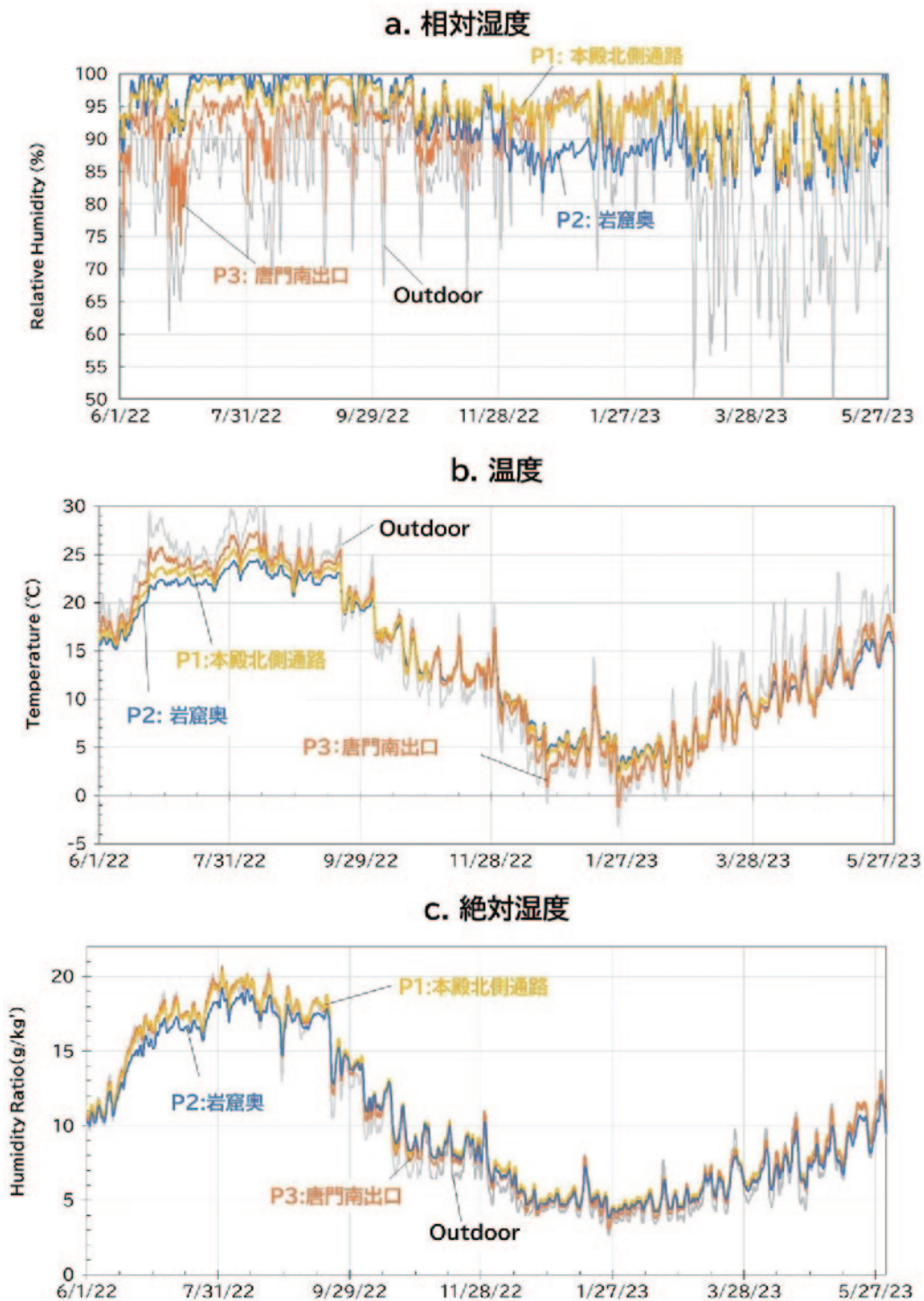


図7 岩窟内の年間の温湿度の変化 (24時間移動平均)

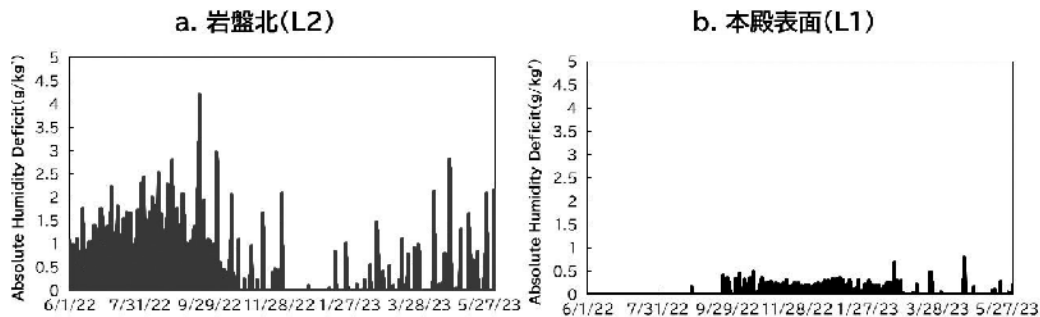


図8 岩盤表面（北）と本殿表面（北）における結露発生リスクの経時変化

## 4. 日常管理による環境改善策の効果検証

### 4-1. 季節による換気対策の方法

岩窟内の高湿化の抑制を目的とした、季節に応じた換気対策の方法について述べる。日常管理における環境制御策は、実際に対応にあたる職員にとって継続的に実行可能な方法であることが重要である。そのため、以下に示す具体的な対策内容については、寺院側との協議を重ね、運用上無理のない形となるよう調整した。

まず夏季は、外気の導入量を増やし岩窟内の温度を高めて相対湿度を下げることを目的に、送風機の追加設置を行った。送風機の設置状況を図9に示す。既存の対策として運用されていた送風機（F1～5）は全て岩窟内部に設置されていたことから、外気の導入量を増加させる目的で、2023年7月に唐門北側屋外に外気導入送風機（F6）を追加した。唐門上部の板戸を開け、職員のいる日中（8：30頃～16：30頃）に送風機を運転した。また雨天時には、湿気の流入を防ぐため外気導入送風機（F6）の運転を停止する運用とした。

冬季は、岩窟内への外気流入に伴う温度低下を防ぐことで相対湿度の上昇を抑制することを目的として、唐門に換気を抑制するカーテンを設置した。2023年の11月より、冬場は夏に開けていた唐門上部の板戸を閉じ、閉門時間（16：30頃～8：30頃）には、カーテンを下した（写真2）。カーテンの設置にあたっては、釘打ちなど建物本体への干渉を避けた設置が可能である

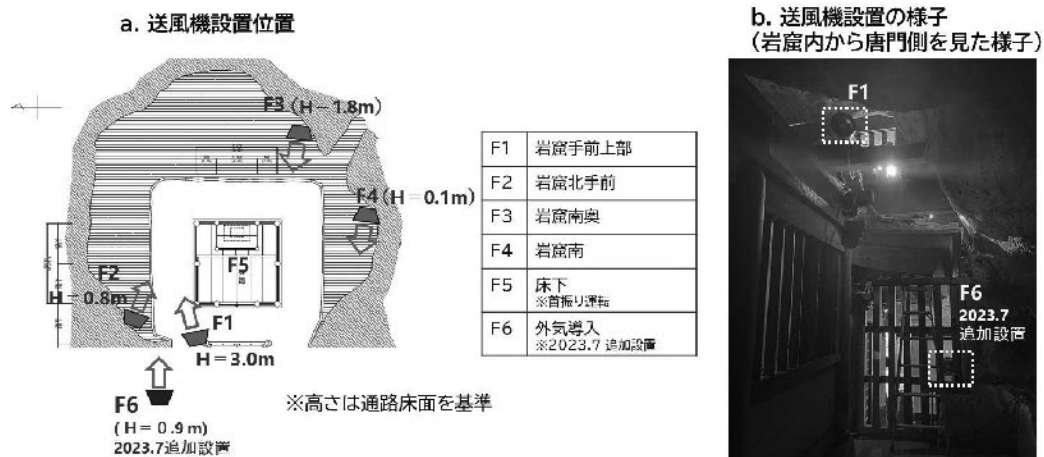


図9 送風機の設置位置と設置の様子

ことや、開閉の容易さや収蔵の都合を考慮し、プラスチックダンボール、エアキャップ、断熱シートを材料として使用した。カーテンの材料の選定と製作は那谷寺職員によって行われた。

夏季の対策と冬季の対策の切り替え時期については、拝殿受付前と本殿背面に設置したモニター付き温湿度ロガーの値を、開門・閉門時に記録し、1週間のうち半数以上で岩窟内温度が受付前より高くなった場合を冬季の対策、逆の場合を夏季の対策への切り替えの判断基準とした。

本報では、これら季節に応じた換気対策が岩窟内の温湿度環境に与えた影響をまず評価する。さらに、結露発生リスク評価に基づき、湿害リスク低減策としての有効性を検討する。

#### a. カーテン設置の様子



#### b. 唐門上部の板戸の様子



写真2 冬季の換気対策の様子

### 4-2. 夏季の送風機の追加設置が温湿度環境に与える効果

図10に、外気導入送風機 (F6) の設置前後における岩窟内の相対湿度の測定結果を示す。温湿度ロガーの種類と設置場所は図5と同様である。唐門に外気導入用の送風機 (F6) を設置する前は、外気の相対湿度が50% RH まで低下した7月31日を除き、本殿北側の相対湿度は常に95% RH 以上の高い状態で推移している。一方、送風機の追加設置後は、日中の相対湿度が90% RH 程度まで下がる日が増えていることが分かる。また屋外送風機の設置後は、唐門出口 (南) との相対湿度差が小さくなった。

図11に、屋外送風機の設置前 (2021年) と設置後 (2023年・2024年) の7月の1か月間における、本殿北側 (P1) および唐門南出口 (P3) の日中の温度・絶対湿度・相対湿度の累積相対度数分布を示す。特に本殿北側 (P1) では、屋外送風機を追加設置した後、温度・絶対湿度ともに外気の分布に明確に近づいていることがわかる。送風機設置後の2024年に関しては設置前の2022年と比べて外気の相対湿度が高く、より過酷な条件であったにもかかわらず、本殿北側 (P1) では高湿度が出現する割合が低下していた。これらの結果から、屋外送風機を追加設置は、本殿北側の湿気環境改善に一定の効果を有することが確認された。

一方、唐門南出口 (P3) においては、送風機を追加設置後に岩窟内の絶対湿度が外気に近づき、外気との絶対湿度差が小さくなる傾向は認められたものの、温度の上昇は限定的であり、外気導入送風機 (F6) の追加設置前後で相対湿度に明確な差は認められなかった。これは、2023年および2024年の7月が、送風機追加設置前の2022年と比較して外気自体の絶対湿度が高い条件にあったことに加え、温度の上昇が十分でなかったため、結果として相対湿度としては

設置前後の違いが顕在化しなかったことによると考えられる。

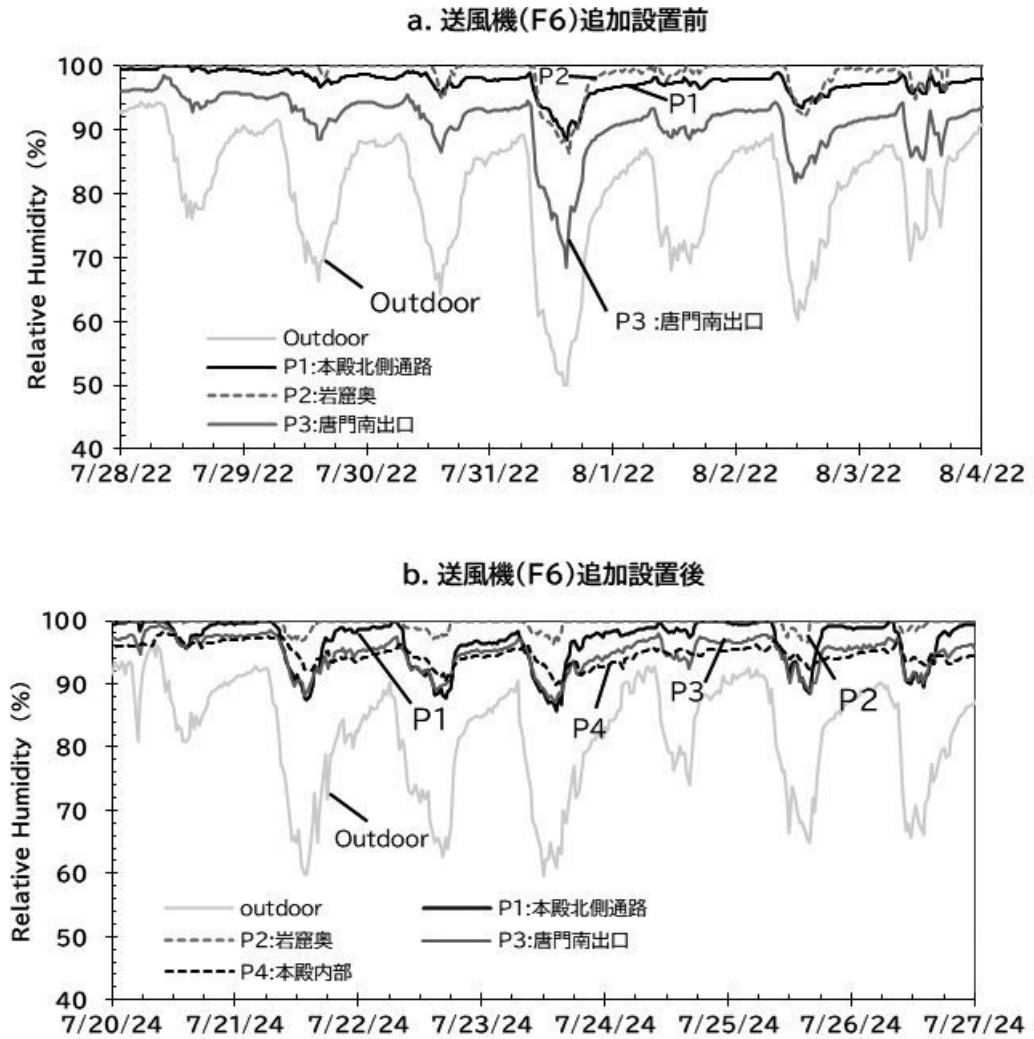


図10 屋外のファンの設置前と設置後の岩窟内の相対湿度 (30分間隔瞬時値)

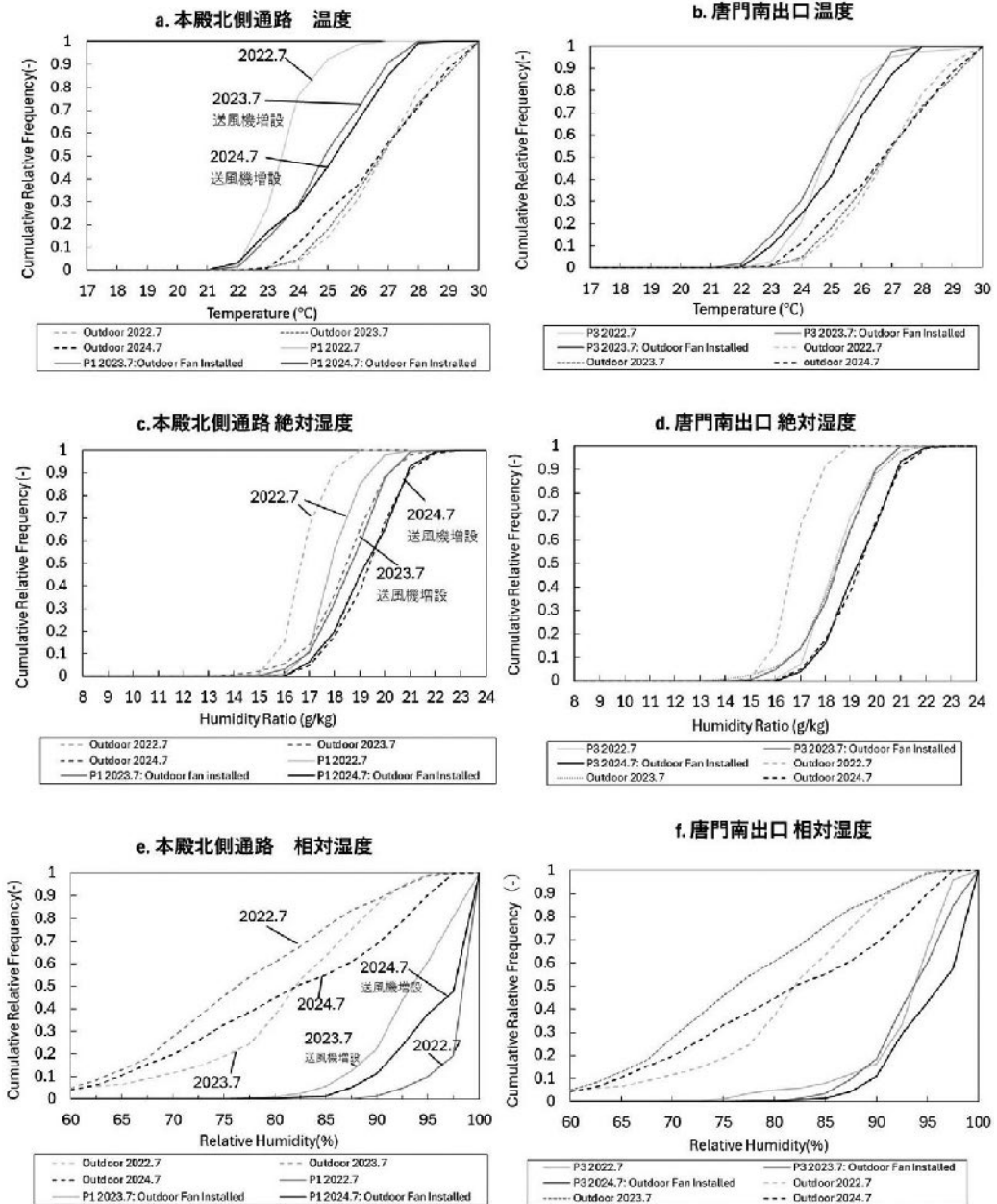


図11 7月の温度、絶対湿度、相対湿度の累積相対度数分布の年度比較  
(破線：外気、実線：岩窟内部)

### 4-3. 冬季のカーテンの設置による換気抑制効果が温湿度環境に与える影響

#### 4-3-1. カーテン設置の有無による換気量の変化

次に、冬季の対策として実施したカーテン設置による熱湿気環境の改善効果について、その検証結果を示す。まず、カーテン設置が岩窟内外の換気量をどの程度抑制するかを確認するために、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) をトレーサーガスとして用いた換気性状の測定結果を示す。

測定は、冬季のカーテン設置期間の拝観終了後に実施した。1回の測定あたり実験用 CO<sub>2</sub>ガス缶（5 L）を10本用い、本殿背面付近において岩窟奥部に向けて CO<sub>2</sub>を放出した。その後、岩窟内を無人状態とし、二酸化炭素濃度計（RTR-576-S）により10秒間隔で CO<sub>2</sub>濃度の減衰を記録した。本測定は、通常自然換気条件下における換気性状の把握を目的としたものであるため、送風機の運転による強制的な空気の攪拌は行っていない。

自然換気による換気性状は、空間内外の温度差や外部風速の影響を受けて変動するが、本報では同一日に時間間隔を空けずに、カーテン未設置時および設置時の測定を実施している。このため、測定時の外的環境条件の差による影響は小さいと考えられ、カーテン設置の有無による換気量の相対的な変化を評価することが可能であると判断した。

図12に、2025年1月25日に実施した CO<sub>2</sub>濃度の測定位置および濃度減衰の経時変化を示す。カーテン未設置時には、CO<sub>2</sub>噴出後に濃度が急速に低下しており、外気との空気交換が生じやすい状態であることが確認された。一方、カーテン設置時には、カーテン未設置時より岩窟内での濃度減衰が緩やかとなり、換気量が大きく抑制されたことが分かる。ここで本殿内部の換気量が同様であると仮定して、測定点（C3）の結果から換気回数を算出すると、カーテン設置時の換気回数は未設置時の1割程度まで低下しており、カーテン設置による気密性の大幅な向上が確認された。

#### 4-3-2. カーテン設置時の温湿度変化

図13に、厳冬期の代表例として、夜間にカーテンを設置した2024年1月の岩窟内における温度、絶対湿度および相対湿度の経時変化を示す。特に本殿内部では、夜間の温度低下が顕著に抑制され、それに伴い相対湿度が低下する明瞭な変化が確認された。一方、本殿北側においても夜間の温度上昇は認められたものの、同時に絶対湿度も増加したため、相対湿度の日中・夜間差はほとんど生じなかった。

以上より、冬期の夜間にカーテンを設置することにより、本殿内部では温度低下が効果的に抑制され、その結果として相対湿度の低下につながることを確認された。一方、その他の測定点では、温度上昇と絶対湿度上昇が同時に生じるため、相対湿度に顕著な変化は見られなかった。

カーテン設置による温度上昇効果をより有効に活かすためには、絶対湿度をいかに低減するかが重要である。特に、地盤や排水溝からの水分蒸発を抑えることが鍵であり、そのための具体的な方法と効果については今後さらなる検討が必要である。

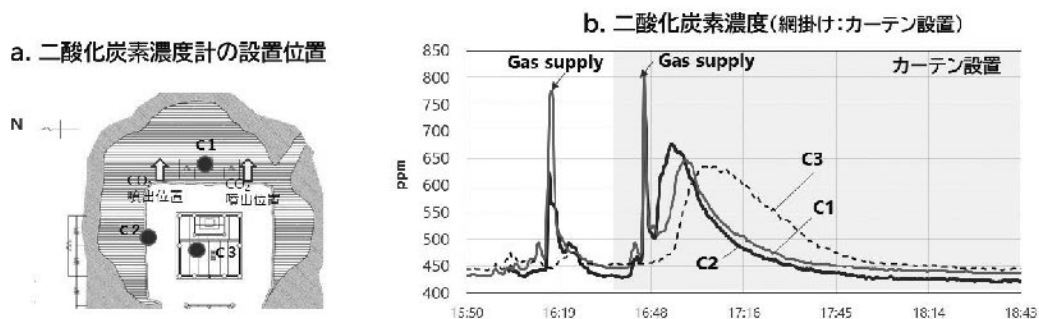


図12 二酸化炭素濃度の測定位置とカーテンの有無による二酸化炭素濃度の違い

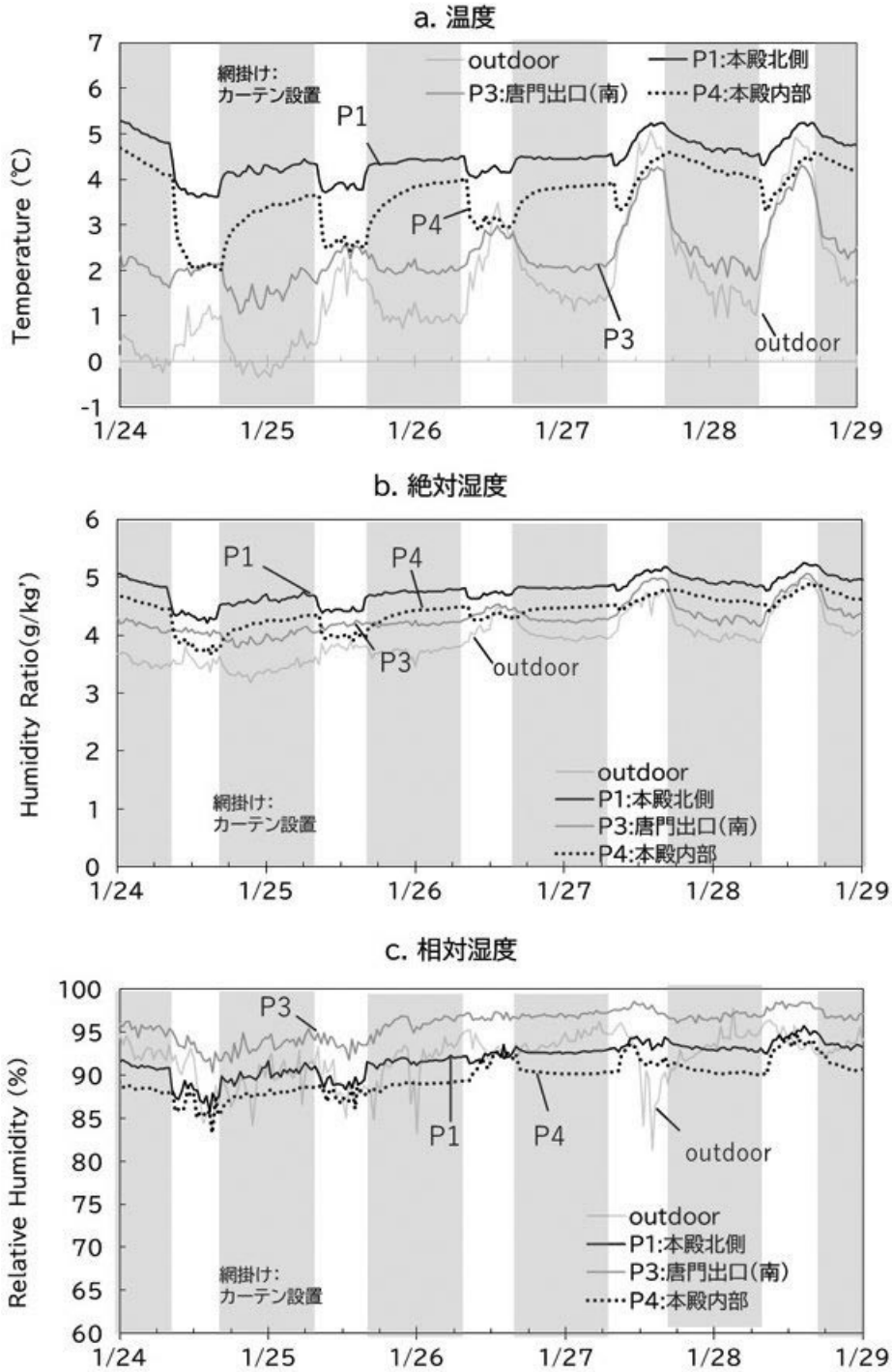


図13 夜間にカーテンを設置した冬季の温湿度 (2024/1/22~2024/1/28)

#### 4-4. 結露リスクの評価

本節では、季節に応じた換気対策が、本殿における結露発生リスクに与えた影響について評価する。結露リスクの評価方法は3章4節と同様とし、周囲空气の絶対湿度と表面温度から算出した飽和絶対湿度との差に基づき実施する。評価対象箇所は、対策前後の比較を行うため、3章4節と同様に本殿北側表面とした。

図14に、2024年1月20日から2025年8月20日までの期間を対象として算出した本殿表面の結露発生リスクの経時変化を示す。結露発生条件を満たす頻度は季節に応じた換気対策の実施前の図8bと比較して低下していることが分かる。

特に冬季において、2024年および2025年のいずれの年においても、カーテン設置前と比較して、結露発生条件を満たす頻度が大幅に低下していることが確認できる。

この結果は、4章3節で示した温湿度測定結果と整合的であり、冬季にカーテンを設置することで外気流入に伴う本殿表面温度の低下が抑制され、表面温度が相対的に高く維持されたことが寄与したものと考えられる。

一方、夏季においては、2024年と2025年で結露発生条件を満たす時間割合に差が認められた。両年における換気対策の実施条件は同一であることから、この差は主として年ごとの外気温および湿度条件の違いによる影響が大きいものと推察される。

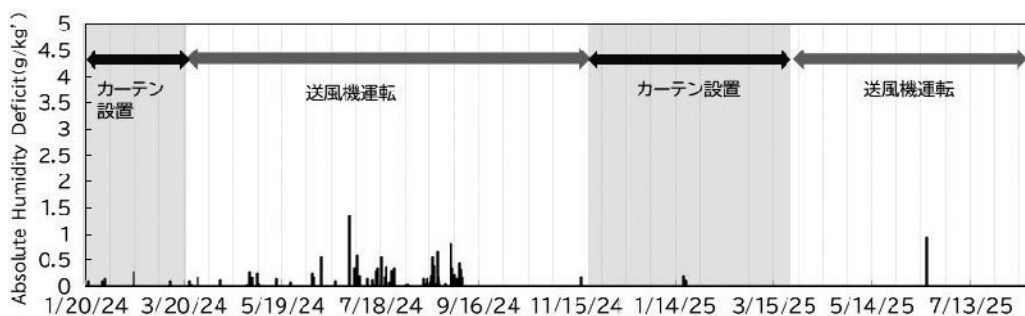


図14 本殿表面における結露発生リスク (2024/1/20~2025/8/20)

## 5. まとめ

本研究は、岩窟内という湿害リスクの高い立地条件下にある木造建造物を対象とし、現地保存を目的とした環境整備のあり方について検討したものである。現地調査および温湿度の長期モニタリングに基づき、湿害リスクの実態とその環境形成要因を整理したうえで、日常管理の範囲で実施可能なパッシブな環境制御を導入し、その有効性を検証した。

現地調査および環境モニタリングの結果、岩窟内は年間を通じて高湿な環境にあり、岩盤からの水滴の落下、降雨後の水分流入、側溝部での水分滞留など、複数の水分供給・蓄積要因が重なって湿害リスクが高いことが確認された。岩窟内の相対湿度は夏季には岩窟奥の方が相対湿度が高いのに対し、冬季は岩窟手前の開口部に近い方が高い傾向が確認された。加えて、結露発生リスクの評価では、岩盤表面（北側）では夏季に結露発生条件を満たす頻度が高いのに対し、本殿表面（北側）では秋季から春先にかけて結露発生条件を満たす頻度が高まる傾向が認められた。これらの結果から、岩窟内では季節に応じて高湿化に寄与する要因や結露発生条件が大きく変化し得ることが示された。

これらの特性を踏まえ、本研究では、夏季には換気の促進による岩窟内の温度上昇を、冬季

には換気の抑制による夜間の温度低下抑制を基本方針とする、季節に応じたパッシブな環境制御を実施した。その結果、夏季には送風機の追加設置により、外気の導入量を増やすことで、岩窟内の相対湿度が低下する傾向が確認された。冬季にはカーテン設置によって換気量が大幅に低減され、本殿内部の夜間の温度低下が抑制され、それに伴い、本殿表面における冬季の結露発生条件を満たす頻度が低下した。季節に応じた環境制御の基本的な方向性が、湿気環境の改善に有効であることが実測データに基づいて確認された。

以上より、岩窟内という特殊な高湿環境下においても、年間の岩窟内の熱湿気環境の特性を十分考慮した、季節に応じた環境管理を行うことで、湿害リスクを一定程度低減できることが示された。本研究で得られた知見は、岩窟や洞窟空間に立地する文化財建造物に対する保存環境管理を検討するうえで、実務的な判断に資する基礎的知見を提供するものと考えられる。

**謝辞**：本研究は、那谷寺木寄馨雄住職をはじめ、職員の皆様および地元関係者の方々の多大なるご協力により実施することができた。また、東京文化財研究所保存科学研究センターの秋山純子保存環境室長ならびに佐藤嘉則生物科学研究室長には、本研究の遂行にあたり多くのご助言を賜った。ここに深く感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 自生山那谷寺：開山一千三百年記念 那谷寺の歴史と白山・泰山、自生山那谷寺、2017
- 2) 宗教法人那谷寺：名勝おくのほそ道の風景地 那谷寺境内（奇石）耐震対策事業工事報告書、2019

キーワード：湿害 (Moisture Damage)；結露 (Dew Condensation)；岩窟 (Rock Cave)；木材腐朽 (Wood Decay)；換気 (Ventilation)

## Practical Implementation of Passive Environmental Control in Routinized Operation for Mitigating Moisture-Related Risks in a Wooden Structure Built inside a Rock Cave

MIZUTANI Etsuko, OGURA Daisuke<sup>\*</sup>,  
FUJII Yoshihisa<sup>\*</sup> and FUJIWARA Yuko<sup>\*</sup>

This study investigates moisture-related deterioration risks in the wooden main hall of Natadera Temple, a nationally designated Important Cultural Property built inside a natural rock cave in Japan. Based on on-site surveys and long-term environmental monitoring, the characteristics of the hygrothermal environment inside the cave and their relationship with condensation and moisture-related damage risks were examined. The results indicate that the cave interior remains persistently humid throughout the year due to continuous moisture supply from water dripping from the rock surface, rainfall infiltration, and water accumulation in drainage channels. Condensation risk analysis revealed seasonal differences: condensation conditions occurred frequently on the cave rock surfaces during summer, while the risk on the wooden surfaces of the main hall increased from autumn to early spring.

To mitigate these risks within the scope of daily management, passive environmental control strategies were implemented, consisting of enhanced ventilation during summer and ventilation restriction with thermal retention during winter. Field measurements demonstrated that summer ventilation reduced relative humidity, particularly near the northern side of the hall, while winter curtain installation significantly decreased air exchange rates and suppressed nighttime temperature drops, leading to a reduction in condensation risk. This case study provides practical insights into risk-based, low-impact environmental management for cultural properties located in caves or similarly humid geological settings.

---

<sup>\*</sup>Kyoto University