

I 博物館の収蔵・展示スペースの空気温湿度環境最適化と省エネルギーに向けた調査研究

第1章 研究目的

第2章 研究の背景

- 2.1. 文化財資料の劣化と熱・湿気環境の関係
- 2.2. 文化財収蔵・展示施設における環境制御の現状
- 2.3. 文化財収蔵・展示施設における熱・湿気環境の改善方法
- 2.4. 既往研究
- 2.5. 研究の目的・方法

第3章 調査対象

- 3.1. 博物館の建築構成
- 3.2. 収蔵室の概要及び換気・空調設備と使用状況

第4章 収蔵スペース、展示スペース環境の実態調査

- 4.1. 調査概要
- 4.2. 測定対象室と測定概要
- 4.3. 温湿度測定結果：外気
- 4.4. 温湿度測定結果：収蔵室1
- 4.5. 温湿度測定結果：収蔵室2, 3, 4（2階収蔵室）
- 4.6. 温湿度測定結果：収蔵室5
- 4.7. 収蔵室の温湿度と建物構造・漏気特性・除湿運転との関係
- 4.8. 第4章のまとめ

第5章 展示室の空調システムの制御方法に関する調査と解析

- 5.1 目的と概要
- 5.2 解析対象とする展示室の空調システム
- 5.3 冷房時の空調シミュレーション
- 5.4 本章のまとめと今後の検討課題

第6章 収蔵スペースの最適設計、最適換気制御に関する検討

- 6.1. 目的と概要
- 6.2 検討対象と検討条件
- 6.3 室温のみを許容値以下に維持すること
- 6.4 収蔵室空気の相対湿度のみを許容値以下に維持すること
- 6.5 収蔵室の室温および相対湿度をともに許容値以下に維持すること
- 6.6 室内での発熱、水分発生がある場合
- 6.7 熱水分シミュレーションによる最適方策の検討
- 6.8 本章のまとめと今後の検討課題

第7章 今年度のまとめと今後の課題

- 7.1. まとめ

7.2. 今後の課題

Ⅱ 高齢者施設での換気が室内の空気質・温湿度・エネルギー消費量に及ぼす影響 室間空気移動による人由来の汚染物質の移動に関する評価と室内環境の改善策

I 博物館の収蔵・展示スペースの空気温湿度環境最適化と省エネルギーに向けた調査研究

1. 研究目的

本調査研究では関西に建つ博物館を対象として、資料の保管・展示環境の状態と空調換気設備のエネルギー使用の実態を把握し、その結果に基づいて望ましい収蔵・展示環境とその制御の考え方の確立を目的とする。また、地域の気象条件に適した収蔵室の壁体設計法と換気制御法を提案する。

2. 研究の背景

2.1. 文化財資料の劣化と熱・湿気環境の関係

博物館や美術館などの施設には、さまざまな形状、構成素材から成る文化財資料が収蔵・展示されており、周辺の温湿度・空気質・光環境などの条件によっては、さまざまな劣化が生じる[1-3]. 熱・湿気環境により誘発・促進されるものとしては、温湿度の変動による構成素材の変形、金属腐食や紙の加水分解といった化学反応、カビや虫の繁殖による生物被害などが知られている[4,5]. 文化財資料の保存には、資料ごとに起こりうる劣化現象を考慮したうえで、それらを抑制するための適切な環境制御が求められる。

2.2. 文化財収蔵・展示施設における環境制御の現状

博物館の収蔵室や展示室などでは、外気条件や滞在者などによる温湿度の長期・短期の変動を抑制し、資料に適した環境を維持する必要がある。環境調整のために、熱容量の大きい厚い壁体や調湿性の高い内装材料が用いられ、空調設備による環境制御が行われる。ただ、建物躯体の断熱性、熱・湿気容量、気密性が不十分であったり、空調がある場合でも、容量の過不足や制御の不備により環境温湿度の急変動や負荷処理が遅れるなどの問題が生じる[6,7]. さらに、環境管理を行う人員の不足や経済的な理由によって、保存環境のモニタリングや制御が十分に行われないこともある[8]. 本来の用途ではない空間が資料の収蔵に利用される場合[9]、保存のための改修や設備導入および運転が困難になる場合もある[10].

国内外の広範囲な調査において、収蔵・展示空間の温湿度制御を行う設備が設置されていない施設が多数あることや、環境管理に関する専門家が不足していることが指摘されており[11,12]、資料が被害を受けた事例も挙げられている[13,14].

2.3. 文化財収蔵・展示施設における熱・湿気環境の改善方法

これまでに保存科学と空調工学の両面から、環境制御の目標となる温湿度が示されてきた。しかし、その実現のための収蔵・展示施設の建物性能、空調・換気設備の性能と運用方法について、数値的な判断基準は示されていない。また、環境の改善には、現場の温湿度モニタリングと解析などを用いた現状分析および環境予測を行い、建物性能、空調・換気設備性能、および施設運用方法に関して総合的な検討をすることが必要である。

2.4. 既往研究

(1)文化財資料保存施設の建物性能に関する研究

欧州の建築事例における実測調査[15,16]と数値解析による検討[16]により、建物の熱慣性、内装材料の湿気容量、気密性が、保存施設の熱・湿気環境の安定に寄与することが示されている。場合によっては、空調された近隣室からの熱を受けることで、機械設備に頼らないパッシブな湿度制御が成り立つ事例も示されている[16]. 石崎ら[17]は、埼玉県の山車の収蔵施設と熊本城天守閣の細川家舟屋形展示施設を対象として、調湿性の高い材料による収蔵・

展示施設の温湿度の安定への寄与を数値解析により評価した。

収蔵施設の建物性能に関しては、建物部材の性能のみならず、建物構造の工夫による環境調整方法が用いられてきた。代表的なものは二重壁構造である。躯体と内装の間に空気層を設け、空気層では空気が循環する。空気層による断熱性の向上と、対流による空気層および庫内の温湿度の均一化が目的であると考えられる。文化庁による文化財収蔵・展示施設に関する行政上の指針において、現在でも収蔵用途の建物の二重壁構造が奨励されている[18,19]。1980年代には、二重壁構造とともに断熱性の高い躯体、調湿性の高い内装を利用することで、空調設備に依存しない収蔵施設の環境制御を推奨する主張もなされた[20,21]。ある博物館収蔵庫内の温湿度の実測調査が行われ、実際に安定した温湿度を保つことが確かめられた。また、権藤らにより、空調との併用による環境制御について実験的検討が行われ、二重壁構造が空調の発停時における温湿度の急変動を抑制することが示された[22,23]。しかしながら、空気層の空気流動を定量的に評価した例はない。また、空調の併用については、実験室実験しか行われておらず、気象条件、建物の規模と材料、運用方法など、さまざまな要素が関与する実建築における空調制御の有効性に関しては、検討の余地がある。

(2)空調・換気設備による保存環境の制御に関する研究

保存環境に対し、積極的に空調設備を用いて環境制御を行う手法（アクティブ手法）については、空調設備の方式や運転方法に関する検討[11,24]がなされてきた。国内においては、熱的緩衝のために用いられる二重壁構造を、エアチャンバーとして利用して間接的に室内を空調する事例[20,25]が示され、有効性が検討[22,23]されてきた。また、冷却器、加熱器、加湿器を一体に備える空調設備の利用に加え、除湿機の使用や暖房による湿度の抑制、換気による絶対湿度の制御について検討が進められてきた。Janssenら[26]は、デンマークの博物館収蔵庫を対象とし、除湿機を用いた温湿度の制御方法について検討を行った。収蔵室の温湿度予測モデルを用いた検討から、収蔵庫の断熱性能を変更して熱取得を増やし、気密性を上げ、内装材料の調湿性能を上げることで、除湿負荷が減少し、相対湿度の日変動が小さくなることが示された。さらに、Christensenら[27]は、提案された除湿機の運転方法の有効性を実測によって示した。栗木ら[28]は、国内のRC造の書庫を対象とした数値解析により、換気口を封鎖し庫内への外気流入を抑制することが除湿負荷の抑制と庫内の低湿度の維持に寄与することを定量的に示した。Neuhausら[10]は、オランダの歴史的建物の中にある博物館の温湿度実測と数値モデルを用いて、暖房により相対湿度の制御を行う手法の有効性を示した。和田ら[29]は、法隆寺金堂焼損部収蔵庫を対象とし、収蔵する壁画の生物被害を抑制するための温湿度制御に関して、庫内の温湿度予測モデルを用いて、新しい換気方法の導入による環境制御方法を検討した。Ferdyn-Grygierekら[30]は、ポーランドの博物館について、換気による絶対湿度の制御と空調による温度制御によって、展示空間の相対湿度を資料の保存に適切な範囲に制御できることを、温湿度予測モデルを用いて示した。Larsenら[31]は、冬季のデンマークの気候条件において、暖房による湿度抑制と除湿機運

転のエネルギー効率を比較した。建物容積、熱貫流率、換気回数を変数とし、各パラメータに対して適切な制御方法が検討された。Ryhl-Svendensen ら[32]は、空調システム、暖房、除湿機の運転による環境制御のエネルギー効率を、実例の調査をもとに比較した。また、建物の気密性を変数として、暖房と除湿機の運転にかかるエネルギーを、数値モデルを用いて比較した。Napp ら[33]は、エストニアの教会において、デシカント式除湿機による除湿と暖房による湿度制御について、実測に基づいて有効性評価とエネルギー効率の比較を行った。さらに、上記の手法に加えて、換気による絶対湿度の制御と取り込み空気を加熱する方法について、数値モデルを用いてエネルギー効率の比較を行った。

以上のように、アクティブ制御においては、さまざまな外気条件や建築形態に対して各手法の有効性やエネルギー効率が比較されてきた。また、建物性能の向上や運転方法の工夫による消費エネルギー低減の可能性が示されてきた。しかしながら、手法の適用可能性に関しては、その有効性や消費エネルギーに加え、運用にかかる人的な労力や工事の必要性、初期投資にかかる費用も重要なファクターとなる。これらを総合的に加味し、定量的に評価した研究はこれまでなされておらず、検討の余地が残されていると考えられる。

2.5. 研究の目的・方法

本研究では、ある博物館の収蔵室に注目し、熱・湿気環境が、資料保存の観点から適切であるかを把握し、不適切な収蔵室について、現状の性能評価、換気・空調設備、施設運用方法の更新による改善策の提案を第一の目的とする。第二の目的は、展示スペースを中心として空調・換気設備におけるエネルギー消費を把握し、それに基づいて今後の省エネルギー方策について検討することである。

本研究で対象とした博物館は、1980年代の竣成以降、計画当初に想定されていなかった室用途変更や設備更新を行いながら運営されてきた。複数の収蔵室が博物館バックヤードに配置され、このうち数室が二重壁構造の収蔵室であった。この博物館では、収蔵環境管理のための設備や専門的人員の不足から、保存環境把握のための収蔵室の温湿度調査が難しかった。本研究では、最初に博物館管理者への聞き取り調査や設立時の図面を用いて収蔵室の建築・設備仕様を把握した。次いで、複数の収蔵室の温湿度測定を行い、その結果が収蔵物に対して適切であるか分析を行った。

以下、第3章では研究対象建物と収蔵室・展示室について説明し、第4章では収蔵室の温湿度環境の測定概要と測定結果を述べる。対象とする施設では竣工後に、空調設備とその制御方法に変更が加えられているが、詳細は不明である。第5章では、竣工時の図面情報を基に空調システムの運転を模擬するシミュレーションモデルを作成し、シミュレーション結果と展示室における空調吹出し・吸込み温湿度の測定結果を比較することで、現状の空調システムの制御方法を推定する。第6章では、収蔵室の温湿度を断熱・気密化、換気により空調無しで適切な値に保つことは可能かを検討し、可能な場合には必要とされる壁体の断熱・透湿性、熱湿気容量、室の気密性を提示する。

3. 調査対象

3.1. 博物館の建築構成

調査の対象としたのは、文化史系の資料が収蔵・展示される建物である。昭和 60 年代に竣成した前身の建物の設備を更新・変更し、一部の室の改装・用途変更を行った京都市内に存在する博物館である。地下一階には空調設備が入る機械室、地上階には展示室 1, 2, 3 があり、さらにバックヤードに複数の収蔵室がある。本報告では、主に 2~3 階の収蔵室について報告する。

3.2. 収蔵室の概要及び換気・空調設備と使用状況

例として、収蔵室 1 (3 階), 収蔵室 2 (2 階) の平面, 断面を図 3-1~3-4 に示す。

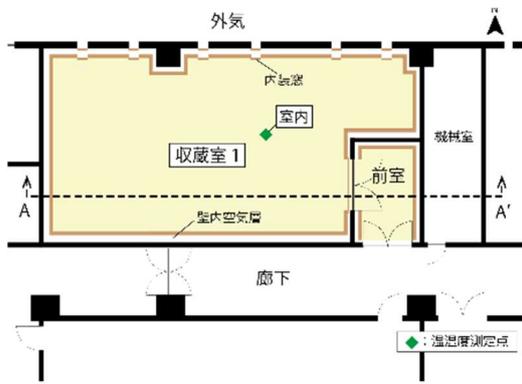


図 3-1 収蔵室 1 平面図

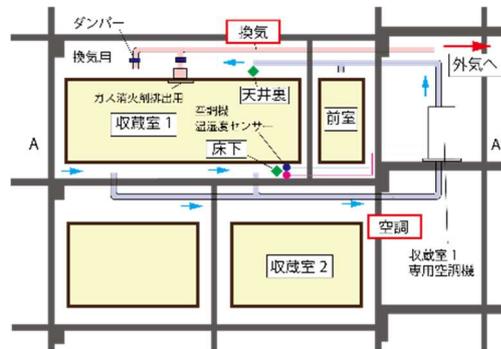


図 3-2 収蔵室 1 断面図

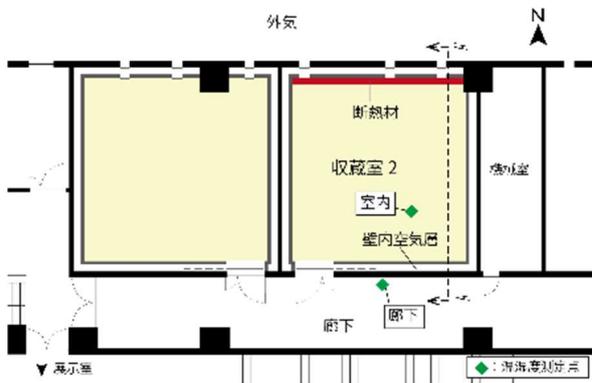


図 3-3 収蔵室 2 平面図

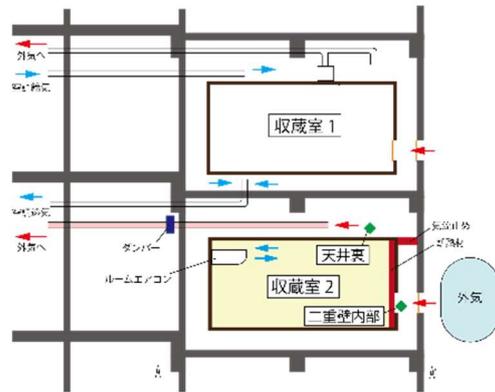


図 3-4 収蔵室 2 断面図

収蔵室 1, 2 ともに排気設備が設けられているが、通常は停止している。

収蔵室 1 は、6 か所の換気用窓を持つ北面が外気に、南面が廊下に面した二重壁構造をとり、前室を持つ。二重壁外側の躯体は RC 造断熱 (XPS50mm) であり、内装は木材である。収蔵物は紙類・布類であり、ICOM では温度 20°C, RH55~65% という保存の基準が示されている [3]。空調は常時稼働状態にあり、天井裏 15 か所から供給 (内 2 か所は前室天井裏) された空気は、壁内の空気層を介して床下の 2 か所で吸い込まれ、下階の天井裏を通る

還気ダクトを通して空調機に戻る。外気の取り込みはない。空調制御用の温湿度センサーは床下であり、設定温湿度は 21℃、相対湿度 49%となっていた。

収蔵室 2 は収蔵室 1 の下階にあり、同様に北面は外気、南面は廊下に面した二重壁構造をとり、後付けの手動制御のルームエアコンを備える。天井と壁の内装は特殊ケイ酸カルシウム板、床は木材素地仕上げである。2018 年 3 月に内装の窓をふさいだ上で北面を断熱改修し、北面空気層と天井裏の間の気流止めを施した。2018 年 4 月から金属資料を保管しており、室内の温湿度は 20℃、相対湿度 45%以下が目標となる[3]。

第4章 収蔵スペース，展示スペース環境の実態調査

4.1. 調査概要

収蔵室と展示スペースおよびこれらのスペースとつながりを持つ廊下，トイレ，ロビーなどのサービス用の空間，更に天井，二重壁内，床下，収容物ケース内，展示ケース内の温湿度の測定を行ったが，通常時の使用形態とはやや異なり，COVID-19 の影響を受けた状況での測定となった．また，感染抑制のため博物館への入館に制約があり，データの一部は適切な間隔で回収することができず欠測となっている．

金属資料を収蔵している収蔵室 2 においては，コロナ対策としてトイレファン運転を再開したことによる湿度環境の悪化を抑制するために，2019 年および 2021 年の夏季に窓の気密性を増した．また，2019，2021 年夏季には除湿機の運転を行った．結果の湿度の変化性状と除湿機による高湿度抑制効果を調べた．

以下では，主対象とする収蔵室 1，2 とその周辺で行った温湿度測定の結果に加え，これまでに行った他の収蔵室についての測定結果も合わせて示し，それをもとに，建物の熱湿気特性，気密性が収蔵庫の保存環境に及ぼす影響を分析する．これは，第 6 章の収蔵スペースの最適設計，最適換気制御に関する検討の基礎資料ともなる．

4.2. 測定対象室と測定概要

温湿度測定点の例として，収蔵室 1 の状況を図 4-1，2 に，収蔵室 1 の状況を図 4-3，4 に示す．測定の時間刻みは基本的に 10 分とした．

なお，“外気”には，気象庁ホームページの「過去の気象データ」から京都市の温度・相対湿度を取得して用いる．

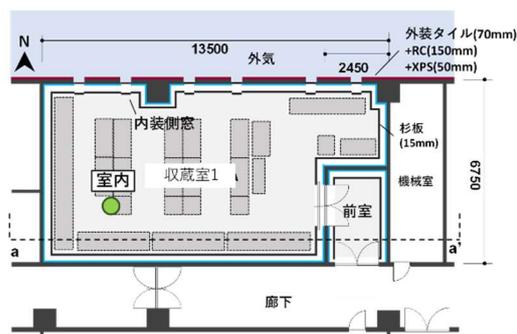


図 4-1. 収蔵室 1 の
温湿度測定点（平面）

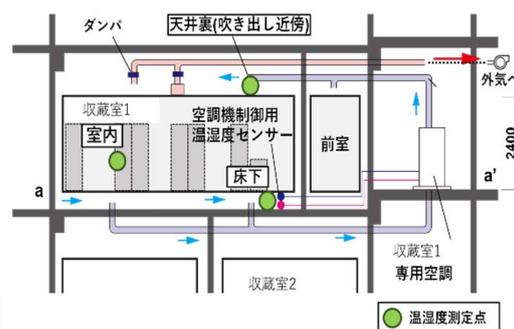


図 4-2. 収蔵室 1 の
温湿度測定点（断面）

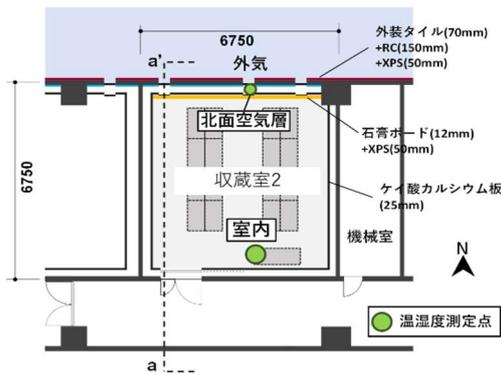


図 4-3. 収蔵室 2 の温湿度測定点（平面）

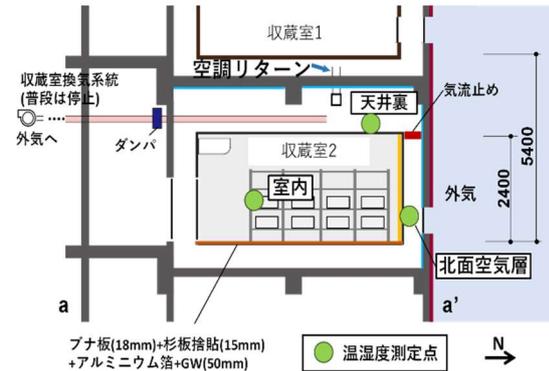


図 4-4. 収蔵室 2 の温湿度測定点（断面）

4.3. 温湿度測定結果：外気（図 4-5, 4-6）

(1) 外気温

- ・年平均気温 16.5℃，標準偏差 9.1℃である。1月中旬～2月後半に最低温度 0℃程度，7月下旬～8月上旬に最高気温 37℃前後となる。毎日の温度振幅は 10℃程度である。

(2) 外気相対湿度

- ・年平均相対湿度は 68%，標準偏差は 16%である。4月後半に最低湿度 10～15%となり，5月後半，7月上旬，8月中旬に最高 97%程度に近い日が続く。年間を通して日最高湿度は 95%程度になる。
- ・なお，測定期間中に 4 回（30～50 分間）相対湿度が 0%となっているが，これは気象庁ホームページの「過去の気象データ」の欠測データに対応している。

4.4. 温湿度測定結果：収蔵室 1

温度，相対湿度を図 4-5, 4-6 に示す。この収蔵室には紙類，布類資料が収蔵されている。

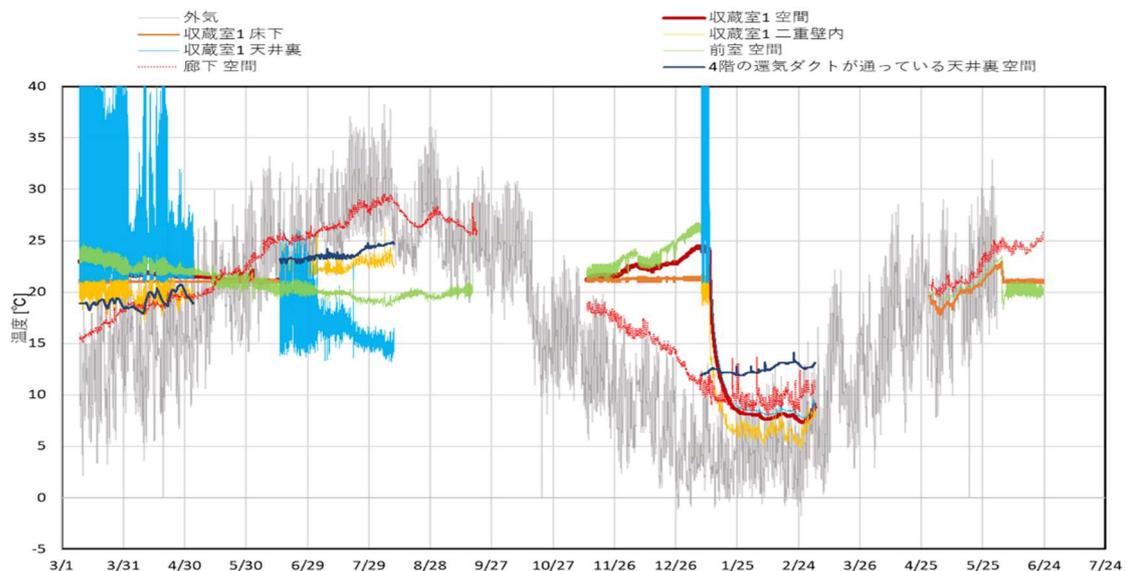


図 4-5 収蔵室 1 の各部の温度

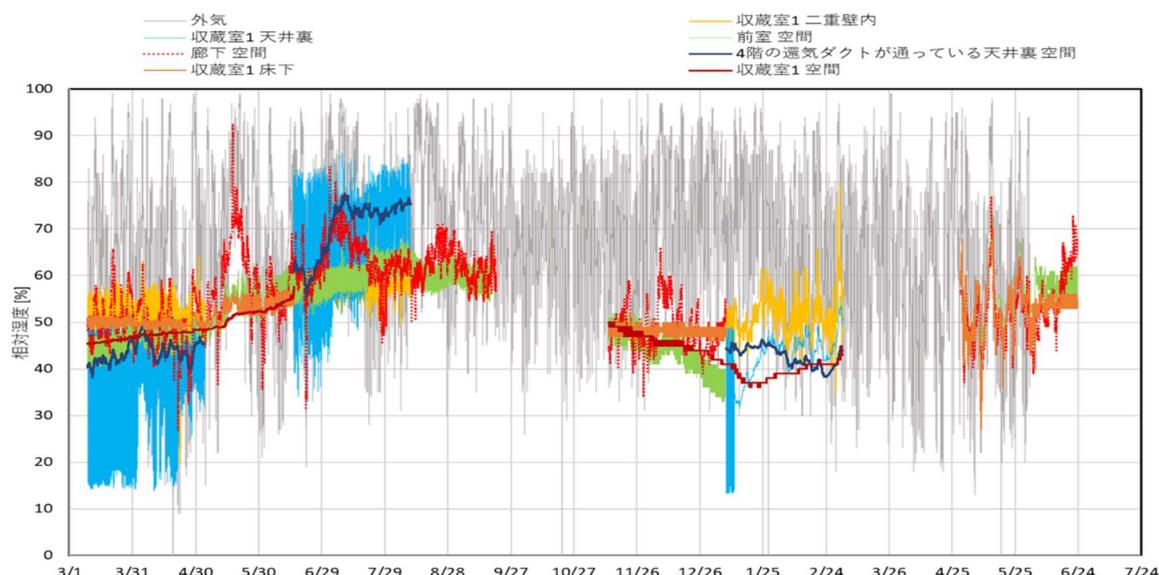


図 4-6 収蔵室 1 の各部の相対湿度

4.4.1 温度

- (1)廊下温度 (9月18日～11月11日, 3月4日～は欠測) は, 外気温度より冬は高く, 夏は低く, 外気温度に追従して緩和されて変化する. 最高 28℃, 最低 7.5℃程度の値となっている.
- (2)床下温度は, 測定された期間が 3月9日～6月15日, 11月12日～1月6日, 4月29日～6月23日で, 夏と冬の値が欠けている. 測定された期間においては 21℃を中心としてほぼ一定に保たれている (4月29日～5月一杯は±4℃程度の変動).
床下温度は二重壁空間からのリターンであり, 収蔵室の平均的な状態に近いと考えられ, 測定された期間については収蔵室 1 空間内は適切に制御されていたと言える.
- (3)前室温度は, 測定された期間が 3月9日～9月18日, 11月12日～1月6日, 4月29日～6月23日で, 冬季後半の値が欠けている. 測定された期間においては, 21℃を中心として, 冬季前半は 5℃程度高温に, 夏は 2℃程度低温に設定されているようである. これは空間内温度を設定値に保つための制御と考えられる.
- (4)二重壁内温度は, 測定された期間が 3月9日～5月3日, 6月15日～8月9日, 1月7日～3月3日である. 夏は設定値 21℃より数度高いが, これは外壁を通して流入する熱を吸収した結果と考えられる. 冬季は, 1月11日に 21℃程度から急速に低下し, 1月19日には 7℃弱になり, 2月28日までは低温のままである. 博物館の都合により暖房を停止したためである.
- (5)天井裏温度は, 測定された期間が 3月9日～5月3日, 6月15日～8月9日, 1月7日～3月3日である. 天井を通して空調された空気より収蔵室空間に熱が供給される. 2021年3～5月は 22～40℃と大きく変動しているが, これは暖房負荷が小さいための変動 (ハンチング?) と考えられる. 6月後半の冷房時もやや大きく (15～25℃) 変化するが, 7

～8月にかけては16℃程度の値を中心に数℃の振幅で変化している。

1月7日～1月10日は暖房のため22～40℃の間を大きく変化するが、その後急速に低下し、1月19日には11℃弱になり、3月3日までは低温8℃程度のみである。暖房が何らかの理由で停止したと考えられる。

- (6)収蔵室1空間温度は、測定された期間が3月9日～6月15日、11月12日～3月3日(1月7日1:00～11:00は欠測)のみであり、夏と冬の測定値が無い。収蔵室空間の温度は、上述の各空間からの熱流により決まり、制御すべき最終目的である。3～6月中旬には23から21.5℃まで低下し、11月12日～1月7日には21.5から24℃まで上昇し、その後急速に7.5℃まで低下した後その値を保つ。前述のように、1月7日1:00～11:00の欠測時に暖房を停止したためである。

4.4.2 相対湿度

- (1)廊下相対湿度(9月18日～11月11日、1月7日～4月28日は欠測)は、外気より低湿度の40～70%を、外気相対湿度に追従して変化している。

- (2)床下相対湿度は、測定された期間が2021年3月9日～6月15日、11月12日～1月6日、4月29日～6月23日で、夏と冬の値が欠けている。測定された期間においては52%を中心として±3%以内に保たれている(2022年4月29日～5月一杯は、空調がOFFであり相対湿度は安定になると考えられるが、±10%程度の大きな変動を示している。外気温が±20℃にもなる大きな変動をしたため、二重壁外側の外壁・窓を通して外気の影響を受け、床下測定点にまで伝わったためと推定される。)

床下空気は収蔵室からのリターンであり、収蔵室の平均的な状態を表していると考えられる。測定された期間において収蔵室1空間内は適切に制御されていたと言える。

- (3)前室相対湿度は、測定された期間が3月9日～9月18日、11月12日～1月6日、4月29日～6月23日で、冬の値が欠けている。測定された期間においてはRH50%を中心として、冬は15%程度低湿度に、夏は15%程度高湿度となっている。「前室」の測定位置は前室と二重壁間の穴であり、二重壁を通る空調空気と前室空気との混合空気の状態を測定しているため、天井裏空気に代表される空調空気の状態を反映した結果となっている。)

- (4)二重壁内相対湿度は、測定された期間が3月9日～5月3日、6月15日～8月9日、1月7日～3月3日である。春～夏は50～60%、冬は45～60%となっている。

- (5)天井裏相対湿度は、測定された期間が3月9日～5月3日、6月15日～8月9日、1月7日～3月3日である。3～5月は15～50%と大きく変動しているが、これは暖房負荷が小さいための温度変動に伴うものと考えられる。6月後半もやや大きく40～83%の間を変化するが、7～8月にかけては70%程度の値を中心に十数%の振幅で変化している。

1月7日～1月10日は13～48%の間を大きく変化するが、その後変動は急速に減少し、45%前後の値をとる。1月7日1:00～11:00の欠測時に暖房が何らかの理由で停止し

たとえられるため、45%前後の値は空調の無い自然状態での（短期間の）結果と考えられる。

(6) 収蔵室空間相対湿度は、測定された期間が3月9日～6月15日、11月12日～3月3日（1月7日 1:00～11:00 は欠測）のみであり、夏と冬の測定値が無い。収蔵室空間の相対湿度は、上述の各空間からの熱流・水分流により決まり制御の最終目的である。

3～6月中旬は45%から55%まで徐々に増加し、11月12日からは50%から減少し、1月後半に最低値36%になった後、増加に転じ3月3日の45%まで増加する。適切な空調がなされたとは言い難い。床下空気で空間空気の状態を代表できるか、二重壁を通して間接的に空間を空調することの非省エネルギー性について、今後の検討が必要である。

4.5. 温湿度測定結果：収蔵室 2, 3, 4（2階収蔵室）

2階収蔵室（収蔵室 2, 3, 4）の温度を **図 4-7** に、相対湿度を **図 4-8** に示す。

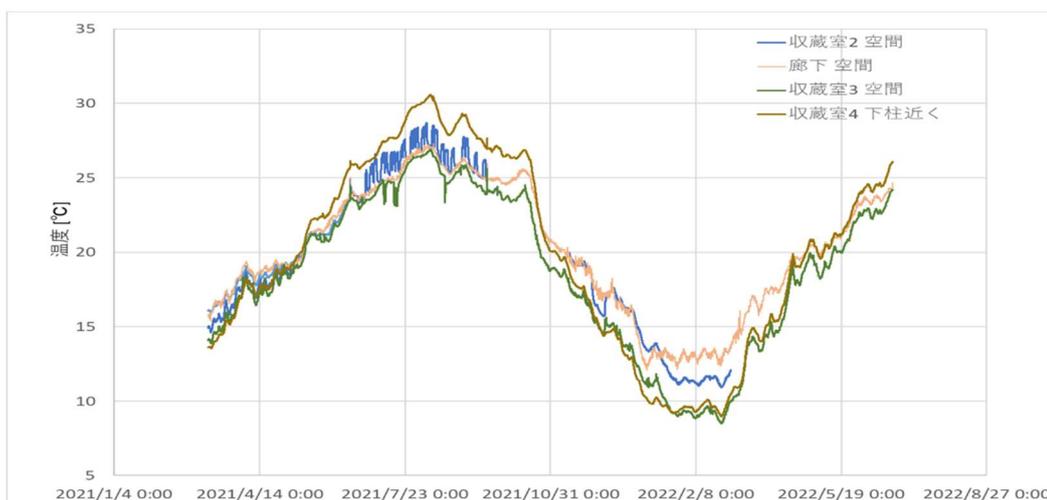


図 4-7 2階各収蔵室の温度

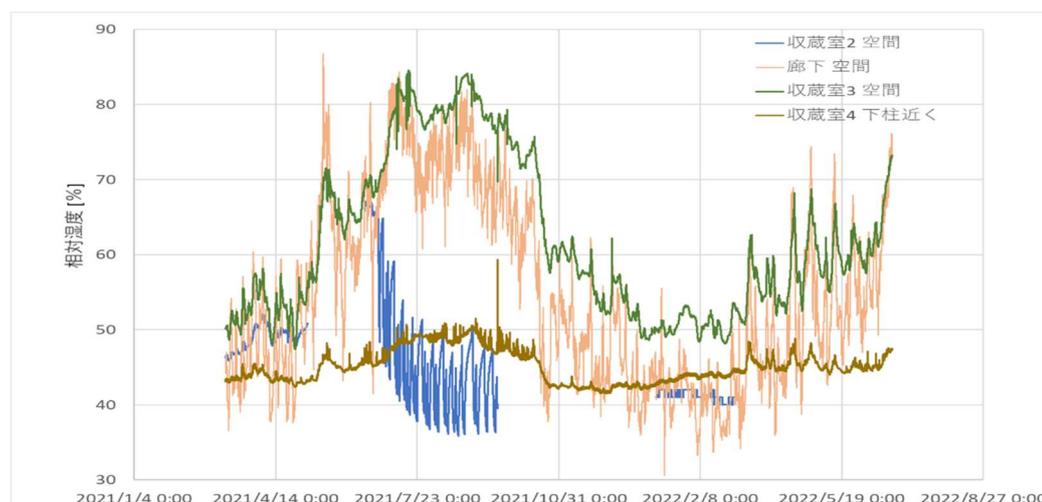


図 4-8 2階各収蔵室の相対湿度

4.5.1 収蔵室3

収蔵室2の西隣の収蔵室である。ムラージュ（蠟でできた医療教育用模型）を中心に収蔵している。

(1)室温

- ・数日の遅れで減衰して外気温に追従している。1月下旬～2月下旬に最低気温約8℃となり、8月中旬に最高温度27℃となる。日レベルの変化は小さく、旬程度毎に数℃の変動が見られる。
- ・廊下とは春から夏は近い値となり、冬季は5℃程度低い値をとる。機械室とも同様な変化をするが、春は1℃程度、夏期は2.5℃程度、冬季は3～4℃程度低い値となっている。夏季は天井を通る冷房ダクトによる冷却のためであり、冬季は外壁（窓）を通しての貫流によるものと考えられる。
- ・収蔵室2とは、春は近い値、夏期はその下限に近い値、冬季は3℃程度低い値となっている。夏季には収蔵室2では除湿機運転がなされそれに伴う発熱があること、冬季は収蔵室2の外壁断熱（二重壁、窓）と気密化がなされていることによる違いと考えられる。
- ・収蔵室4とは、秋～冬～春にかけては近い値となるが、夏期は3～4℃程度低い値となっている。収蔵室4では夏季に除湿があり、それに伴う発熱のためと考えられる。

(2)相対湿度

- ・7月中旬と8月末に最高83%程度となり、1～2月および年により3～4月に最低湿度48%程度をとる。夏季の相対湿度はかなり高い。
- ・収蔵室3の相対湿度は年間を通して廊下の相対湿度より高く、その上限をなぞって変化している。年間を通して収蔵室3室温が廊下温度より低いこと（夏季は天井裏ダクトによる冷却、冬季は外壁を通しての熱損失による）が主たる要因と考えられるが、特に冬季に両者の差が大きくなっており、その可能性は高い。この傾向は収蔵室2天井裏（空間中央）についても同様である。
- ・それに対して、収蔵室4のRHは年間を通して42～50%（夏季に高め）と低く安定している。これは1年を通して除湿機を運転しているためと考えられる。

収蔵室2の相対湿度は、除湿機を運転した夏季は45%前後と低く、冬季は室温が高いためRHは低い値となる。データ欠測のため判断は難しいが、3～4月の除湿機運転が無く窓が気密化されていない状況では、収蔵室3と収蔵室2の変化は近いが、除湿機運転開始直後から両者の違いが大きくなっている。冬季にも変化性状が異なるのは窓の気密化が大きく影響しているものと考えられる。さらに、冬季に収蔵室2の室温が収蔵室3より高いことについても、収蔵室2の外壁側の内壁を断熱していることに加え、窓の気密性向上がその原因になっていると考えられる。

4.5.2 収蔵室2

主に金属資料を収蔵している。

(1)室温

- ・収蔵室空間の温度は（5月6日～6月15日，9月17日～11月12日，3月4日～31日は欠測），数日の遅れで減衰して外気温に追従しており，8月前半に最高温度 28℃，2月に最低温度 12℃となる．6月末～9月中旬には，除湿機の ON-OFF に伴い 2℃程度の日変動が生じている．収蔵室 3 の室温より年間を通して高く，9月からその差は大きくなり冬季に 2℃程度となる．夏季は除湿機運転に伴う発熱が，冬季は窓を断熱・気密化していることが主な理由と考えられる．
- ・北側空気層温度は，11月中旬～12月の測定値しか無いが，外気温の上限に近く，室空間温度より 4℃程度低く，収蔵室 3 の室温よりも 2℃前後低い値となっている．これについては，詳細な解析などに基づいて評価する必要がある．

(2)相対湿度

- ・収蔵室空間の相対湿度は（5月6日～6月15日，9月17日～1月7日，3月4日～31日は欠測），加湿器が運転を開始した 6月15日の 67%から減少し，8～9月は 43%±6%でほぼ一定，1月上旬～2月も 42%でほぼ一定，3～4月は 45～50%となっている．夏季に除湿機を運転することにより，金属資料の保存に適切な湿度になっている．また，収蔵室 3 より除湿時は 40%近く，1月上旬～2月も 10%程度低湿度になっている．
- ・天井裏の相対湿度が，1～4月は室空間の相対湿度と同程度であること，1～6月は収蔵室 3 とほぼ同じ値となっていることより，2021年7月2日の窓気密化と7～9月の除湿機運転がなされなければ，収蔵室 3 と同程度の湿度になっていたと推定される．窓の気密化と除湿機運転の効果が読み取れる．

4.5.3 収蔵室 4

機械室を挟んで収蔵室 2 の東側に位置する収蔵室であり，土器，石器などの考古資料を中心に収蔵している．この収蔵室は中二階構造となっており，上下に分けられている．

なお，以下の文章中で「下柱近く」などは，「下柱近く」（下の階の中央外壁近く），「下手前」（下の階で入口を入ってすぐ），「下奥」（下の階で入口を入ってから右に進み，一番奥まで行った辺りで，除湿機のすぐ近く），「上柱近く」（上の階の中央外壁近くで，下柱近くの真上），「上手前」（下手前の真上），「上奥」（下奥の真上）である．

(1)室温

- ・下柱近くの温度は，年平均温度 19.9℃，標準偏差 6.9℃であり，1月下旬～2月下旬に最低温度 9℃程度，8月上旬に最高温度 31℃前後となる．毎日の温度変動は非常に小さい．下柱近くの温度は廊下温度より，夏は 2～3.5℃程度高く，冬は 2～3.5℃程度低い．
- ・下手前，上柱近く，上手前，上下奥については，3～6月中旬の測定値のみであるが，下柱近く温度とほぼ同じ値となっている．ただ，下奥温度は，それらより 1.5℃高い値となっている．それは，近くに設置されている除湿機からの発熱によると考えられる．

(2)相対湿度

- ・下柱近くの相対湿度は、年間を通して 42~50%と狭い範囲に保たれている。7月上旬~9月が 50%弱で比較的高い。
- ・下手前，上柱近く，上手前，上下奥については，3~6月中旬の測定値のみであるが，下柱近くの相対湿度とはほぼ同じ値となっている。ただ，下奥湿度のみはそれらより 8%程度低い 38%前後の値となっている。除湿機運転の影響と考えられる。

4.6. 温湿度測定結果：収蔵室 5

4 階の収蔵室であり，考古資料を中心に収蔵している。測定された期間が 2021 年 3 月 9 日~6 月 15 日（天井裏は欠測），11 月 12 日~3 月 3 日（1 月 7 日 0:00~12:00 は欠測）で，夏の値が欠けている。

4.6.1 温度

- ・各点の温度変化はほぼ同じで，3 月 9 日~6 月 15 日には平均 20℃程度で大きく $\pm 9^{\circ}\text{C}$ の間を変化し（室内を 20℃にするための制御の結果，天井裏や二重壁内の温度が変動する可能性はあるが，室内の変動も大き過ぎる），11 月 12 日~1 月中旬は 15℃から 8℃まで徐々に低下し，その後 3 月 3 日までほぼその値を保つ（やや増加）。
- ・前者の期間は変化幅が非常に大きく，後者の期間には温度が低すぎ，適切に空調されているとは言えない。今後検討が必要である。

4.6.2 相対湿度

- ・各点の湿度変化はほぼ同じで，3 月 9 日~6 月 15 日には平均 43%程度で $\pm 3\%$ 程度の変動をし，11 月 12 日~3 月 3 日には平均 48%で $\pm 5\%$ 程度の変化をする。相対湿度の平均的な値としては良いが，収蔵室内の相対湿度の変動がやや大き過ぎる。

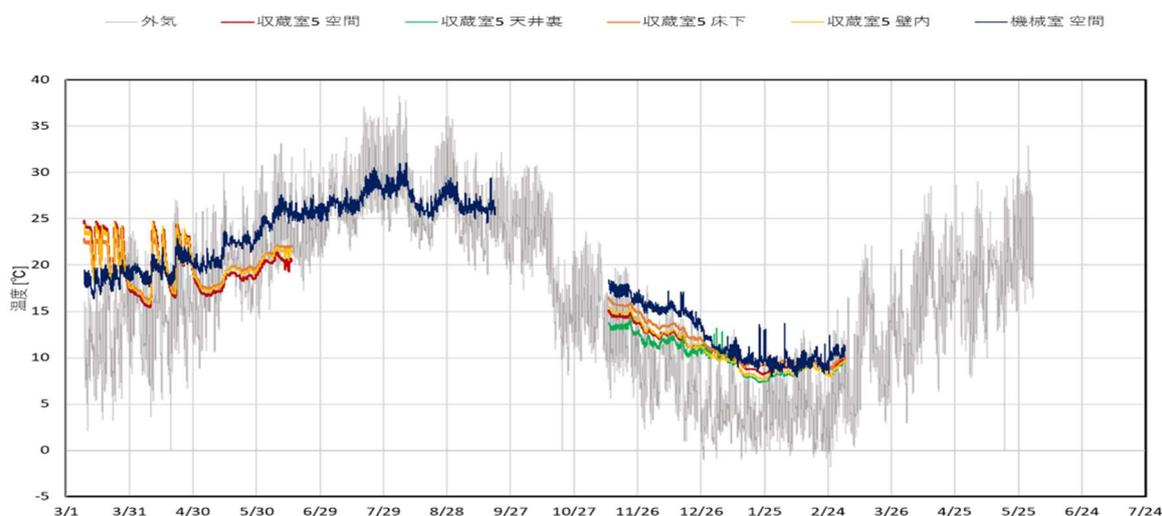


図 4-9 収蔵室 5 の各部の温度

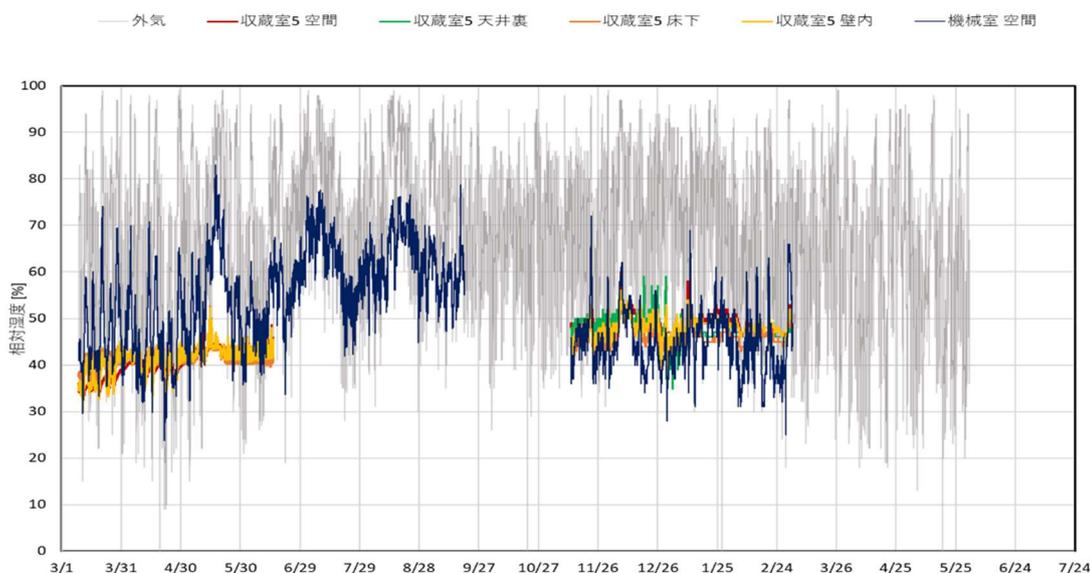


図 4-10 収蔵室 5 の各部の相対湿度

4. 7. 収蔵室の温湿度と建物構造・漏気特性・除湿運転との関係

4. 7. 1 検討内容

- (1) 今回の調査結果とともに、過去に行った調査結果から得られるあるいは推定される結論について述べる。
- (2) 収蔵室により室構造や空調・除湿の有無などに違いがあるため、共通性の高い 2 階に存在する収蔵室 2, 3, 4 室の比較を行う。
 - ・ 3 室とも北側は外気に、南側は共通の廊下に面し、基本的な室構造，外壁構造，窓の数も同じである。基本的には空調は無い（短時間のエアコン運転は有）。
 - ・ ただ，窓の気密性と天井の有無（室の上下方向の分割，天井内の空調用ダクトの有無など），追加間仕切りの有無と収蔵物は異なる。
- (3) 過去 3 年間（2018～2020 年）の測定結果を合わせて検討する。

4. 7. 2 建物構造と収蔵室の温湿度変動との関係

- (1) 室および外壁構造
 - ・ 室の奥行 6,750mm×階高 5,400mm，天井張り（収蔵室 2,3）あるいは中二階（収蔵室 4）
 - ・ 外壁は外装タイル 70mm・RC150mm・断熱材 50mm で，石膏ボード+XPS(50mm)の間仕切板が設置された二重壁構造であり，廊下に面する間仕切り壁，東西の壁も二重壁（ケイ酸カルシウム板）となっている。
 - ・ 外壁には窓があるが，基本的には閉じられている。
- (2) 収蔵室空間の温度変動
 - ・ 外気温が 5～33℃の年変動（図 4-5），廊下が 13～27℃の年変動（図 4-7）をするのに対して，除湿がなされていない収蔵室 3 は 8～27℃の年変動（図 4-7）をする。収蔵室 2

も除湿がなかった（但し、断熱用間仕切りが設置され、窓に軽微な気密性追加がなされた）2018年は、9～30℃の年変動（**図 4-11**）となっている。

- ・従って、原設計の二重壁外壁構造では、収蔵室に共通して9～29℃程度の年変動をされると考えられる。30%程度、外気温変動が緩和されることになる。（廊下も、他室の空調の影響も加わった結果として、外気温変動が50%程度緩和されている。）
- ・従って、この程度の断熱材が添付されたRC構造でも、室構造による外気温変動緩和は30%程度（あまり大きくない）と見なされる。

(3) 収蔵室空間の湿度変動

- ・外気湿度が平均60%程度で大きな日変動（40～95%）をする状況で（**図 4-6**）、廊下湿度が40～75%の年変動（**図 4-8**）をするのに対して、除湿がなされていない収蔵室3は49～83%の年変動（**図 4-11**）をする。収蔵室2も、除湿がなかった（但し、断熱用間仕切板が設置され、窓に軽微な気密性追加がなされた）2018年には、40～68%の年変動（**図 4-11**）となっている。収蔵室3は収蔵室2より室温が年間を通して1.5℃程度低いいため、相対湿度が高い。
- ・従って、原設計の二重壁外壁構造では、収蔵室に共通して40～80%程度の年変動をされると考えられる。外気湿度変動が30%程度緩和されることになる。

4.7.3 除湿運転

(1) 収蔵室4（考古資料）の中湿度の確保

- ・収蔵室4では、相対湿度は年間を通して中湿度域（42～50%）で、高い湿度50%は8～9月に生じている（**図 4-8**）。これは除湿機運転によるものと考えられる。
- ・収蔵室3と比較して、5～10月の温度は高く冬季の温度は同程度となっている。これは除湿運転が夏期に頻繁なのに対して冬期はあまり運転されないことによる。
- ・この収蔵室4では、2018年より窓開閉による外気との換気を取り止めたことも、年間を通して中湿度を維持できていることに寄与していると考えられる。

(2) 収蔵室2（金属資料）の除湿機運転+窓の気密化

- ・収蔵室2の相対湿度は、除湿機が運転を開始した6月15日の67%から急速に減少し、8～9月は43%±6%でほぼ一定となっている（**図 4-8**）。夏季に除湿機を運転することにより、金属資料の保存にはほぼ適切と言える湿度になっている。
- ・室構造が近い収蔵室3と比べて除湿時には40%程度湿度が低く、除湿機の有効性は明確である。
- ・収蔵室4と比較すると、除湿時には平均して7%程度低湿度となっている。これは室容積（および収蔵物品量）に対する除湿機容量の大小、収蔵室4ではRHの値に応じた除湿制御（「適湿」というモードでの運転）をしているのに対して、収蔵室2の除湿機では貯水タンクが満水になるまでフル運転をすること、収蔵室2の窓を気密化していることなどが原因と考えられる。

4.7.4 窓の気密化（漏気特性）の影響

(1) 収蔵室 2 (金属資料) の相対湿度

- ・除湿が9月に終了した後、1月上旬～2月でも42%でほぼ一定となっている(図4-8。残念ながらその後は欠測)。2019年夏季にも同じように除湿を行ったが、RH40%程度まで低下した後10月にはRH60%まで上昇し、その後は廊下とほぼ同じ相対湿度となっている(図4-11)。
- ・2021年と2019年の除湿運転で大きく異なるのは、2021年は除湿運転停止後も窓の気密性をそのままに維持していることである。それにより外部からの高温高湿空気の流入が抑制されていると考えられる。更に、夏季の除湿時に壁体および収蔵物から放湿が起き、それらの湿気容量により除湿停止後も低湿度が保たれている可能性がある。収蔵室2には金属資料が主に収蔵されており、それらの吸放湿容量は小さいので、周辺壁体の吸放湿が中湿度の維持に有効に作用している可能性がある。

(2) 収蔵室 2 (金属資料) と収蔵室 3 (ムラージュ)、収蔵室 4 (考古資料) との比較

- ・収蔵室3の相対湿度は廊下の相対湿度の上限をなぞって変化しているが2月後半より急速に増加しており、収蔵室4のRHは11月より徐々に増加し続けている。それらに対して、収蔵室2は1月上旬～2月もほぼ一定であり、傾向がかなり異なる(欠測が残念!)(図4-8)。これには窓の気密性が大きく影響していると考えられる。特にトイレファンが稼働している場合には収蔵室内は(廊下よりも)二重壁の窓を通して外気の影響を強く受けるため、窓の気密性の高い収蔵室2の湿度は外気の影響を受けづらくなっていると考えられる。

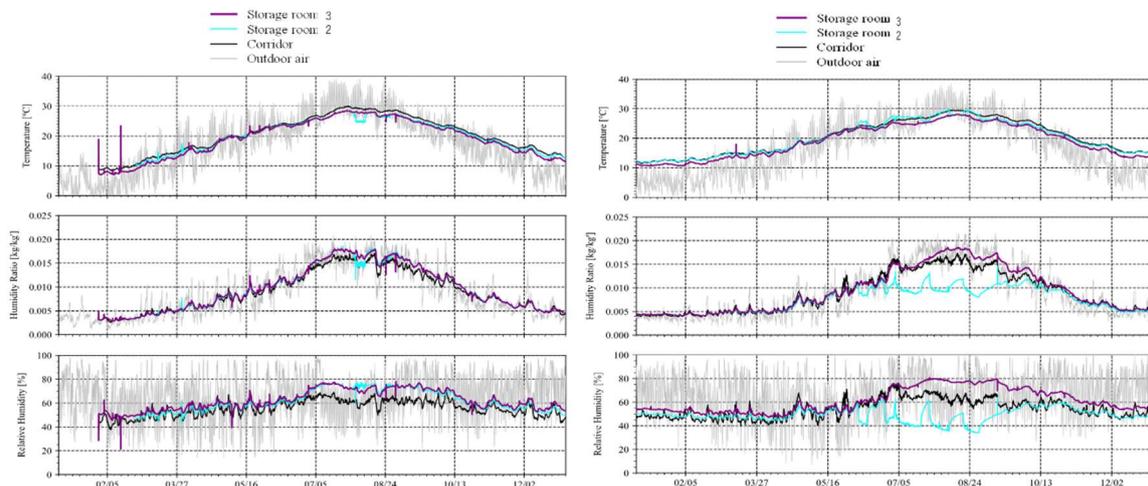


図 4-11 各室の温度(2018. 1. 1～2018. 12. 31) 図 4-11 各室の温度(2019.1.1～2019.12.31)

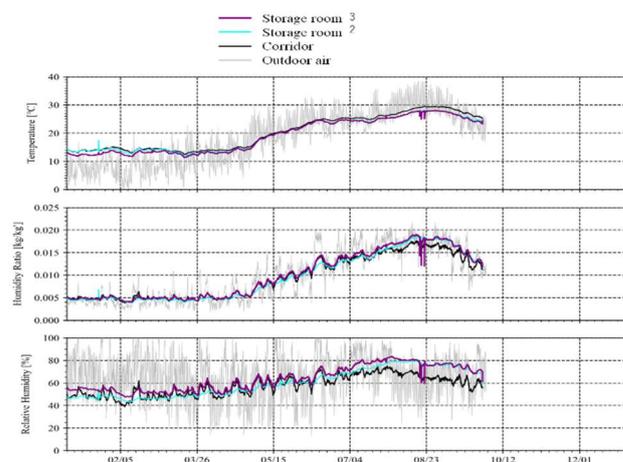


図 4-11 各室の温度(2020. 1. 1~2020. 12. 31)

4. 8. 第 4 章のまとめ

収蔵室周りの温湿度調査により，各収蔵室の温湿度変化性状が明確になった．その結果，以下の結論が得られた．

- (1) 建築仕様や空調設備及び運用が必ずしも収蔵物の保存に望ましい状況になっていないことがわかった．資料保存に関する温湿度基準のあいまいさや設備運用のわかりにくさが不適切な設備の選択や，不用意な運用につながっている可能性がある．二重壁の見直しや，設備システムの見える化，簡易なマニュアル作成が必要であると考えられる．
- (2) 本博物館で採用されている中央空調システムでは，空調された空気は二重壁内部に送られ，内壁との間での熱水分交換を行った後（収蔵空間に入らずに），空調機に戻る．従って，このシステムでは（二重壁の）外壁との間の熱交換が増加し，非省エネルギーな運転となる．二重壁を通して室に供給されるシステムでも，基本的には同じ不必要な熱湿気交換を行うため非省エネ運転となる．二重壁システムのメリットを明確にした上で採用を決めるべきである．
- (3) 除湿運転が収蔵室内の湿度（および温度）に与える影響の大きいこと，適切な除湿機の導入と制御により金属資料など低湿度が必要な収蔵物に対する環境を形成することが可能であること，それには窓など開口部の気密性が非常に重要な役割を果たすことを明らかにした．
- (4) (3) より，金属資料など低湿度の収蔵環境を形成するための実用的に簡易なシステム設計法として，断熱・気密化された二重壁を有しない熱湿気容量の大きな室に，（排水機能付き）除湿機と冷房用エアコンを設置する，という考え方を提案したい．これは，第 6 章の検討内容に結びつく考え方である．