

I 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

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 収蔵室の温湿度と収蔵環境評価

- 4.1. 環境温湿度が収蔵資料の劣化に与える影響
- 4.2. 温湿度測定の概要
- 4.3. 温湿度測定結果：収蔵室1
- 4.4. 温湿度測定結果：収蔵室2
- 4.5. まとめ

第5章 空気移動を考慮した熱水分移動解析による博物館収蔵室の温湿度・気流の分析

- 5.1. 空気の移動を考慮した熱水分移動の基礎理論
- 5.2. 収蔵室の温湿度解析：解析モデル
- 5.3. 温湿度の再現と気流性状の検討
- 5.4. 解析モデルを用いた外気流入・ダクトによる冷却の寄与の評価
- 5.5. 金属資料を保管する博物館収蔵室の環境改善方法に関する解析的検討
- 5.6. まとめ

第6章 博物館施設の消費エネルギー調査

- 6.1. 調査の背景と目的
- 6.2. 調査概要
- 6.3. 調査結果
- 6.4. まとめと今後の課題

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

第1章 はじめに

第2章 入所者の生活空間における汚染質の発生源の推定

2.1 計算方法

2.2 計算結果

第3章 建物内の温度分布の低減による空気移動経路の改善策

第4章 多様な観点での室内環境の改善策

第5章 まとめ

I 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

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・展示環境と環境調整のためのエネルギー使用の実態を把握し、それに基づいて望ましい収蔵・展示環境とその制御の考え方を確立することを目的とする。

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た。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が示された[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。ここでは、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。次に、資料に問題が生じる可能性がある収蔵室について、壁体材料内の熱・水分の移動と、気流による熱・水分の輸送を考慮した、収蔵室の温湿

度を予測する解析モデルを作成し、現状分析ならびに改善方法の検討を行った。数値解析においては、気密性や壁体の熱・湿気容量、断熱性などの建築自体の性能の改善や空調設備の追加、運用方法の変更を考慮した。また、実際の収蔵室への設備機器の試験的導入や運用方法の変更などを並行して行った。

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その結果を述べる。第5章では、熱水分移動・換気モデルの構築とそれによる測定値の再現と改善方策の提案を行う。第6章では、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量を調査し、省エネルギーの観点からの問題点の洗い出しと改善策の提案を行う。

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。本調査の収蔵室としては、主に収蔵室 1, 2, 3 室に注目した。

3.2. 収蔵室の概要及び換気・空調設備と使用状況

収蔵室 1, 2 の平面、断面を図 3-1～3-4 に示す。



図 3-1 収蔵室 1 平面図

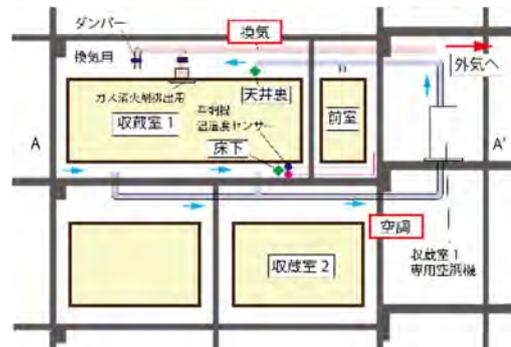


図 3-2 収蔵室 1 断面図

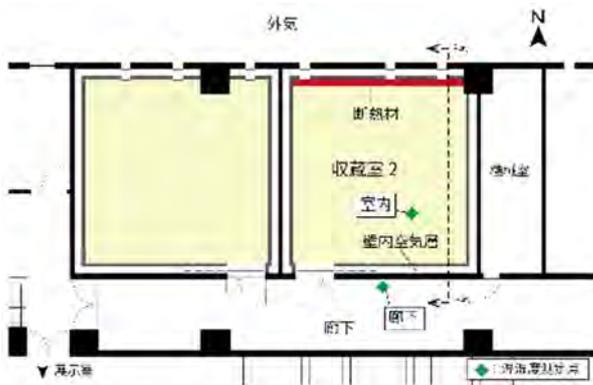


図 3-3 収蔵室 2 平面図

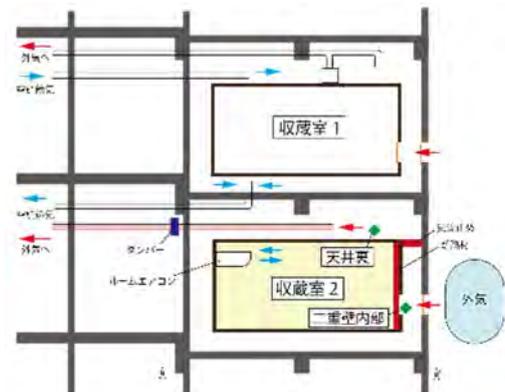


図 3-4 収蔵室 2 断面図

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 造内断熱 (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℃、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]。

4. 収蔵室の温湿度と収蔵環境評価

本章では、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を示し、それをもとに、収蔵室が収蔵資料の保存に適切な環境であるか分析する。

4.1. 環境温湿度が収蔵資料の劣化に与える影響

長期間の高温・高湿は、紙類の加水分解や金属の腐食など収蔵資料の化学的劣化現象を促進することが知られている。また、高湿度環境はカビや文化財害虫の繁殖を促し、生物被害につながる。低湿度は繊維質の文化財資料の強度低下を誘発するため、適切といえない場合がある。また、低温は収蔵資料の移動の際、資料表面において結露が発生し、資料の損傷や汚損につながる危険が考えられる。さらに、環境温湿度の急変動は、資料内の熱・水分状態に分布を生じさせ、力学的な損傷を与える恐れがある。金属資料については、温度より湿度が重要で、低湿度が良いとされている。

これまで保存科学、空調工学の両面から、収蔵環境の環境制御に関する研究が行われ、目安となる基準が示されてきた。例えば ICOM (国際博物館会議) は、資料の材料ごとに、保存に適切な温湿度の範囲を示した[3]。また、ASHRAE (アメリカ暖房冷凍空調学会) は、既往研究の知見から、保存環境の温湿度制御と資料にとっての安全性を段階的に規定する基準を示した。以下の検討では、これらの環境基準を参照する。

4.2. 温湿度測定の概要

(1)収蔵室 1

図 4-1, 2 に示す 6 点に温湿度測定点を設置した。測定の時間刻みは 10 分とした。

(2)収蔵室 2

温湿度ロガーの位置を図 4-3, 4 に示す。測定間隔は 1/29~6/1 は 5 分、6/1~11/5 は 15 分、11/5 以降は 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。

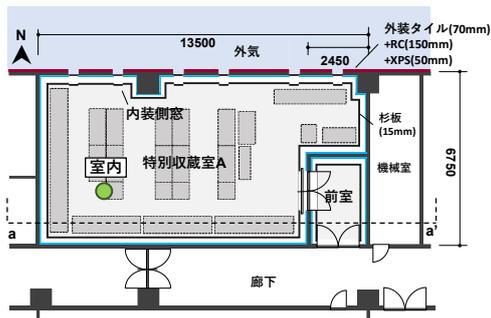


図 4-1. 収蔵室 1 の
温湿度測定点 (平面)

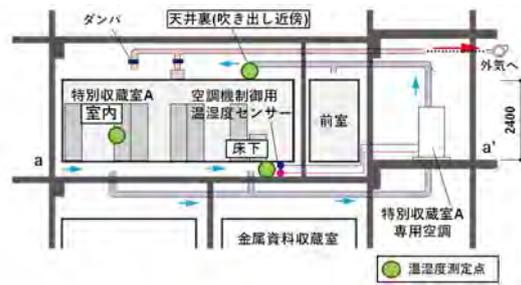


図 4-2. 収蔵室 1 の
温湿度測定点 (断面)

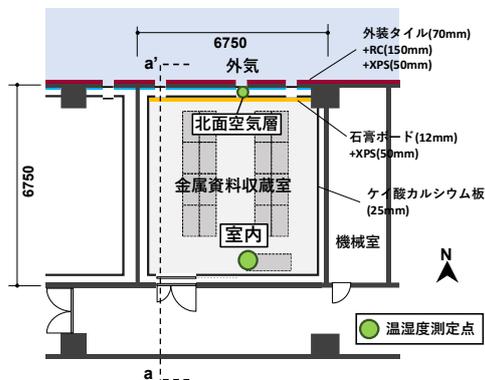


図 4-3. 収蔵室 2 の
温湿度測定点 (平面)



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：収蔵室 1

最初に、年間の温湿度について季節ごとに述べ、次にアクシデントにより空調運転のなかった期間、最後に冬季に暖房を稼働した際の温湿度について述べる。

(1) 季節ごとの温湿度の特徴

図 4-5～4-8 に、冬季・春季・夏季・秋季それぞれについて、収蔵室 1 とその周囲空間の温度、絶対湿度、相対湿度を示す。なお、この収蔵室の空調設定温湿度は年間を通して 21℃・49%である。

(a) 温度

廊下温度は、外気温の変動に対応して冬季 12℃～夏季 30℃の間を変化した。収蔵室室温は、2018/12/21 までは外気温変化に対応して 11℃まで低下した後、暖房により急激に 27℃に上昇した。その後 25℃から緩慢に減少し、5月中旬に 21℃になった。5/20 からは多少の変動はあるものの、ほぼ 20.5℃で一定となっていた。

床下温度は、2018/12/21 までは外気温変化に対応した変化をしたが、それ以降は暖房、冷房により 21°C一定を保っていた。二重壁内温度もほぼ同様の変化をしたが、冬季～春季は床下温度より低目、夏季は 2°C程度高めの値をとっていた。

それに対して、天井裏温度は空調吹出し口の近傍にセンサーを設置したため、空調運転に伴い大きな変動幅（最大 20°C程度）をもって変化した。2018/12/21 までは空調が停止していたため外気温変化に追従して変化し、その後 4 月中旬まで、最高 40°C、最低 20°Cで暖房（3/1 までは暖房のみ（加湿器の故障）、3/1 以降は暖房・加湿）に伴う変動がみられた。

4 月後半から 5 月中旬は外気温の上昇に伴う暖房負荷減少に対応した弱い暖房運転となっていた。最高 40°C、短周期の吹出し口温度の大きな変化は、負荷に比して過大な暖房能力と ON-OFF 制御に起因するものと考えられる。天井裏温度は、5 月下旬～7 月後半は 10～26°Cの間を変化しており、冷房・除湿運転がなされていたことがわかる。

(b)絶対湿度

2018/12/21 までは空調は稼働せず、絶対湿度は全ての個所で外気温変化に追従して低下した。12/21 に加湿無しの暖房が始まると、急速に室内の絶対湿度が上昇した後、ゆっくりと減少した。絶対湿度の急速な上昇は、温度上昇により吸放湿材である内装材や収蔵資料から放湿したためと考えられる。放湿による材料の湿度低下に伴い放湿速度が低下するため、絶対湿度はその後ゆっくりと低下した。

2019/3/1 に床下の絶対湿度は急激に 0.008 [kg/kg³]に増加し、5/20 までほぼその値を保った。5/20～7 月後半は 0.005 [kg/kg³]、7 月後半以降は 0.0085 [kg/kg³]で一定を保っていた。天井裏絶対湿度は、床下絶対湿度と同程度で変動はより小さいが、暖房のみのときはそれより低い値を、暖房加湿時には同程度を、冷房除湿運転時にはそれより低い値をとっていた。

二重壁内絶対湿度も暖房時にはほぼ同様な変化をしたが、冷房除湿時には床下や天井裏の絶対湿度に比して 0.004 [kg/kg³]、0.002 [kg/kg³]程度高い値をとっていた。これは、一定量の外気が侵入していたことによるものと考えられる。この外壁を通して侵入する水蒸気は空調機の水分負荷となる。

(c)相対湿度

収蔵室の相対湿度は、2018/12/21 までの非空調時には 56%前後、12/21～3/1 の暖房時（加湿無し）にはゆっくりと低下し 29%程度になった。3/1-5/20 の暖房・加湿時には緩やかに 50%に向かい、5/20～7/31 の冷房開始とともに 50%から 33%に減少した。8/1 以降は 58%に漸近した。床下の相対湿度は、暖房加湿時、冷房・前半、冷房・後半で、それぞれ 50%、33%、58%程度であった。温湿度設定値は変更されていないことが確認されており、5/20 以降に湿度が 33%に減少したのは、何らかの理由により加湿器が停止したためと考えられる。

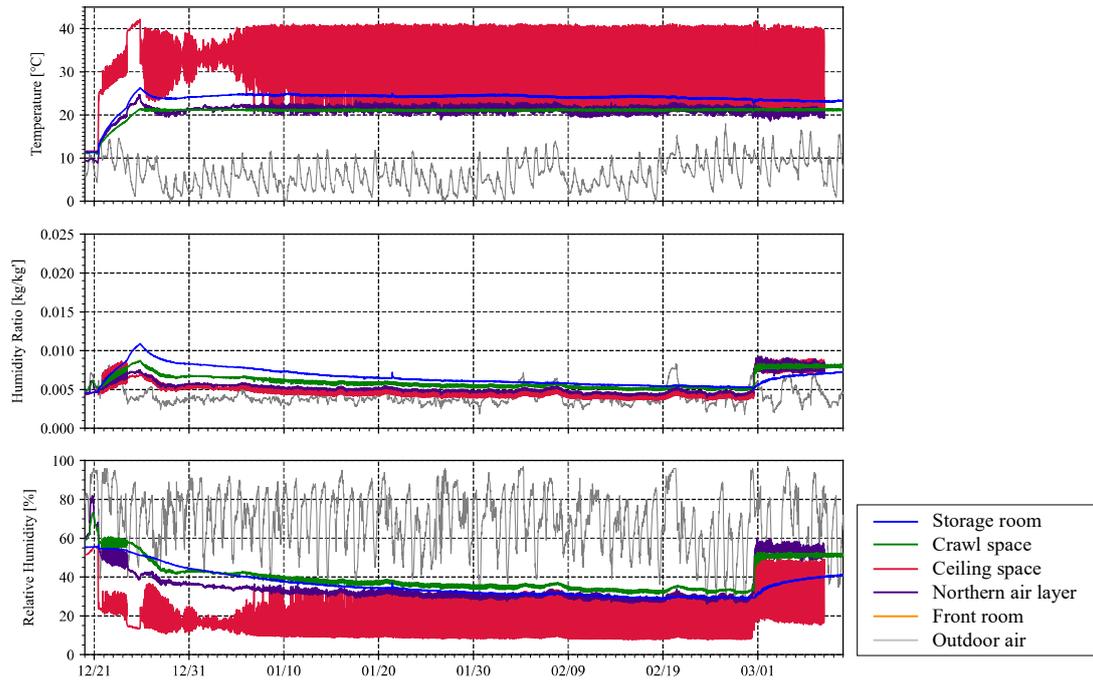


図 4-5. 収蔵室 1 と周囲空間の温度・絶対湿度・相対湿度
冬季 (2018. 12. 20~2019. 3. 10)

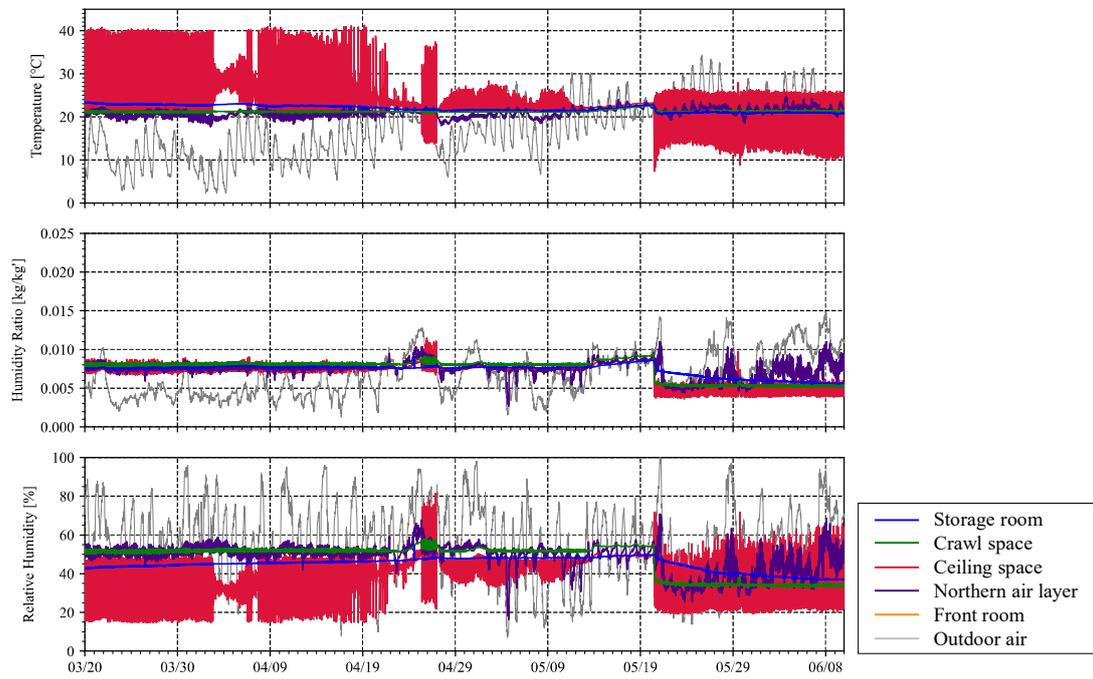


図 4-6. 収蔵室 1 と周囲空間の温度・絶対湿度・相対湿度
春季 (2019. 3. 20-2019. 6. 10)

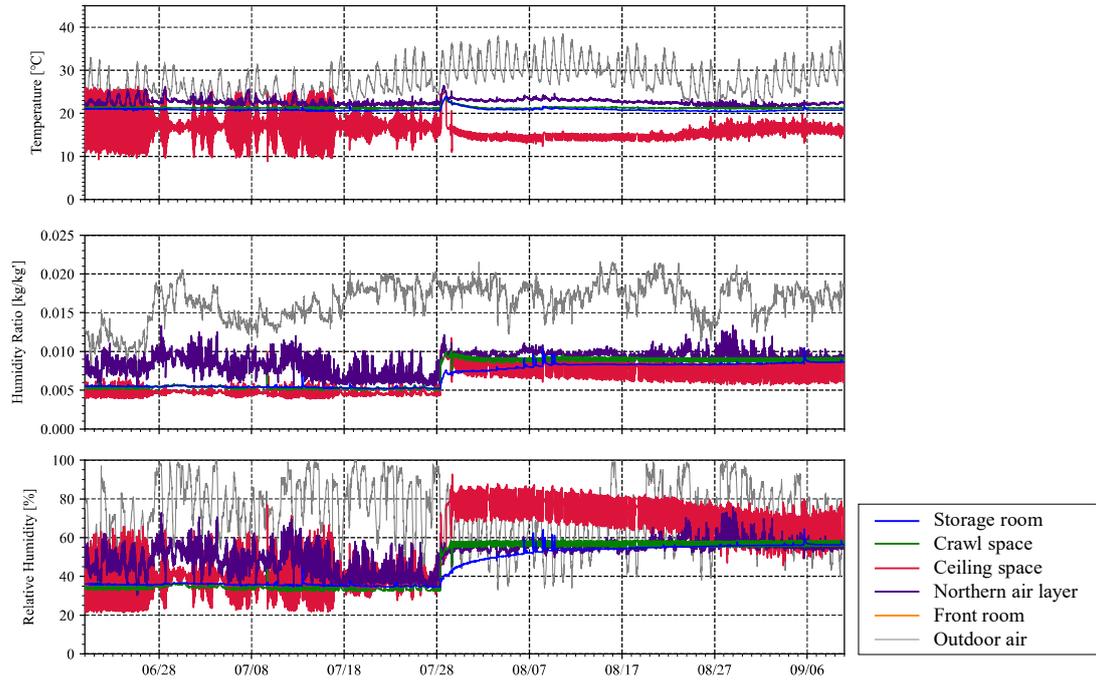


図 4-7. 収蔵室 1 と周囲空間の温度・絶対湿度・相対湿度
夏季 (2019. 6. 1~2019. 9. 30)

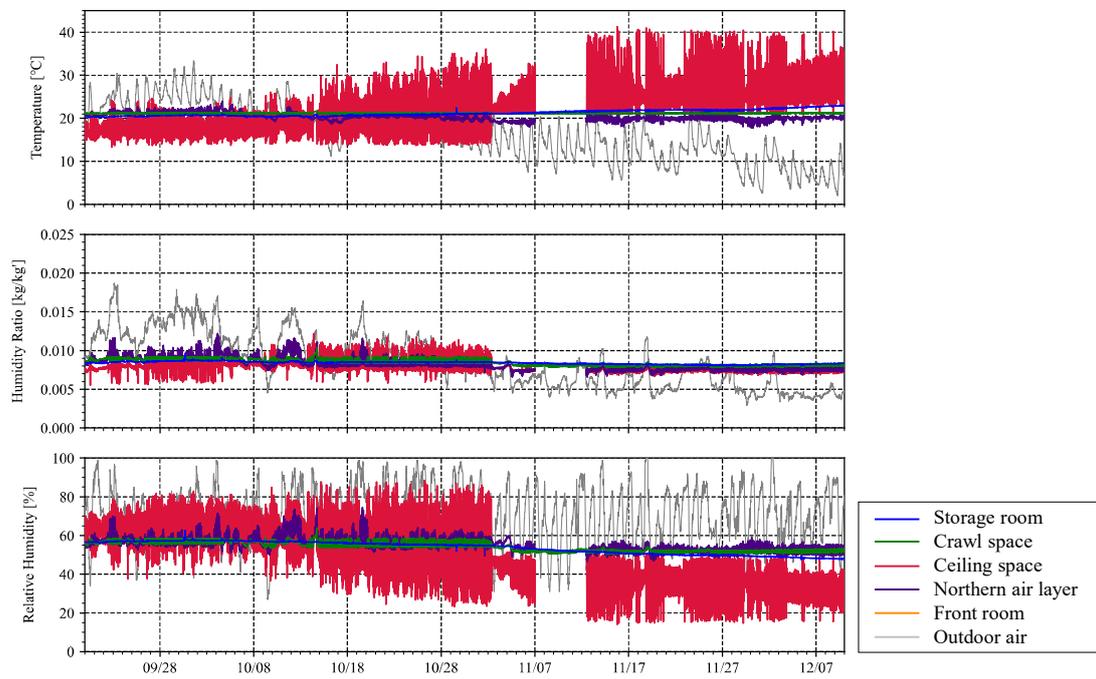


図 4-8. 収蔵室 1 と周囲空間の温度・絶対湿度・相対湿度
秋季 (2019. 9. 20~2019. 12. 10)

(2) 秋季～冬季の非空調時 (2018/10/9～12/21) の温湿度測定結果

図 4-9 に、2018/10/9～12/31 の収蔵室 1 とその周囲空間の温度・絶対湿度・相対湿度を示す。10/8 に設備点検のための停電により空調が停止された後運転が再開されていなかったが、12/21 の調査時までは室の出入りがなく、停止していたことが認識されていなかった。当時、外部から室内の温湿度をモニタリングする設備は設置されていなかった。

(a) 温度：廊下>前室>天井裏>室内>床下>二重壁内という大小関係が保たれ、外気温の低下に伴いその差は大きくなった。空気流動が無い状態で天井裏が床下より高温なのは、温度成層化のためと考えられる。二重壁内は常に室内より低く、外気より若干遅れた位相で変動した。同様の傾向は廊下、床下にもみられるが、振幅はより小さかった。

(b) 絶対湿度：室内絶対湿度は、外気、廊下の低下とともに緩やかに低下した。二重壁内部は外気に近い位相で変動し、床下もより小さい振幅で外気と同位相で変動する傾向がみられた。天井裏絶対湿度は、外気の平均に並行して変動した。前室は天井裏と並行し、やや高い値で変化していた。

(c) 相対湿度：室内の相対湿度は 55～58% で非常に安定した変化をしていた。絶対湿度が外気の変化に応じて減少しているにもかかわらず相対湿度が一定を保っているのは、躯体壁の断熱や内装の気密性によって熱・水分負荷が小さく、杉板内装材の吸放湿が作用したためと考えられる。

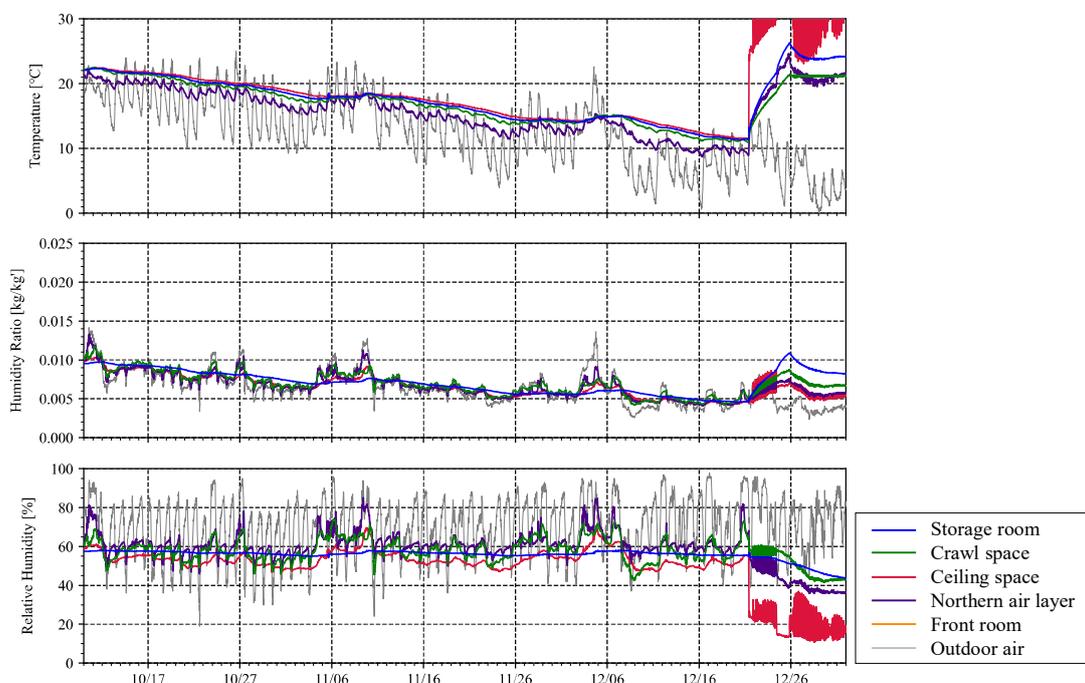


図 4-9. 収蔵室 1 内各所の温度・絶対湿度・相対湿度
(2018. 10. 9 ～2018. 12. 31)

(3)保存環境の分析

2018/12/21 からの急激な室温上昇に伴い収蔵物からの放湿が生じ、短時間に内装材や収蔵物の含水率が大きく減少した可能性がある。また、2019/3/1 までは加湿器の故障により室内湿度が低下していた。空調機が感知するセンサーは床下に設置されているが、床下と室内の温湿度と差が生じており、必ずしも空調機の運転により目標とする室内温湿度が実現するとは言えない。

紙や布といった有機材料においては、加水分解などの化学反応による劣化や、生物被害が環境の高湿度によって促進されることを考慮すると、保存環境は低湿度が望ましい。しかし、これら資料の材料強度は乾燥によって低下するため、経験的に中湿度域で保管されることが多く、ICOMなどは、これらの資料について、相対湿度 55-65%、温度 20℃という保存環境の基準を示している。紙の劣化要因は、加水分解や生物被害のほか、変形が知られており、これは、環境温湿度の経時変化に伴う資料内部の温度・含水率の分布によって生じる。

2018/12/21 からの空調稼働時の室内の急激な温度上昇、および、その後の空調加湿器の故障による乾燥は、いずれも収蔵資料の含水状態に急激な変動を与え、変形による劣化が生じた恐れがある。また、室内の長期的な温湿度に注目すると、除湿機故障時の室内相対湿度は 30%前後となり、保存の基準に対して低湿度となる。暖房運転時の室内温度も、(設定値の 21℃に対し) 25℃近くまで上昇する期間が見られた。

収蔵環境として、現状の大きすぎる空調容量は、運転切り替え時(と故障時)の室内温湿度の急変動を発生させ、資料の機械的劣化を促進する恐れがある。また、空調加湿器の故障による収蔵室の低湿度や、暖房時の設定値から外れた高温が数週間～数か月のスパンで生じており、収蔵環境の温湿度制御システムには問題があったといえる。

4.4. 温湿度測定結果：収蔵室 2

(1)収蔵室 2 とその周囲空間の年間の温湿度の特徴

図 4-10～4-12 に、収蔵室 2 とその周囲空間の 3 年間(2018 年～2020 年)の温度、絶対湿度、相対湿度を示す。また、図 4-13～4-16 に、春季・夏季・秋季・冬季それぞれの温湿度を拡大したものを示す。

2018 年には、収蔵室で 70%を超える高い相対湿度が測定された。2019 年は 6 月から収蔵室で除湿機を稼働させた。このときの温湿度については、室内の資料の保存用途のための改善方法の検討と合わせ、5.5 で詳しく述べる。

(a)温度

廊下・二重壁内部・天井裏・室内においては、外気の日々の変動はほぼ緩和され、5～6 月は外気平均に近い値を、7 月～9 月前半は外気の低温側の値を、10 月以降は外気の高温度側の値を取っていた(エアコンが運転されている期間を除く)。これは、建物による熱的緩和(熱容量、断熱、気密化)によるものと考えられる。収蔵室の北側の外壁二重壁内部の温度が外気変動に最も近く、冬季 6℃～夏季 30℃の間を変化していた。廊下の温度は冬季 12℃～夏

季 29℃の間にあり、建物の熱容量に加えて、廊下が接する展示室の暖冷房の影響が表れていると考えられる。

7月～9月の非冷房時には、天井裏が室内より低温になっていたが、これは3Fの収蔵室1からの低温（設定温度は21℃）のリターンダクトおよび低温の床（梁・柱）による吸熱によるものと考えられる。リターン空気温度が3F収蔵室1の設定室温である21℃近くであり、5、6月や10月は天井裏との温度差が小さいためダクトによる吸熱量は少ないが、7-9月は天井裏温度が25℃以上で吸熱による冷却量が多くなり、天井裏温度は室温より低くなる可能性がある。

(b)絶対湿度

廊下の絶対湿度は、5、6月は外気平均に近い値を、7月～9月前半は外気の低湿側の値を、10月以降は外気の高湿側の値を取っていた。また外気の日々の変動の影響が（緩和されて）見られる。室内・天井裏の絶対湿度も廊下と同様の変化をしていた。外気の時々刻々の変動は廊下に比して緩和されているが、時間遅れを伴った日レベルの変動が見られた（8月の空調運転時は除外）。これらの結果は、湿気についても建物による緩和があることを示しているが、その作用は数時間の短期変動に対しては大きいものの、より長期レベルでは小さく、室内・天井裏の方が廊下より緩和作用が大きかった。後者は、室内・天井裏の方が廊下より漏気量が少なく、吸放湿作用が大きいことによると考えられる。

冬季は、いずれの測定点の絶対湿度も外気のそれよりやや高い値で外気に追従していた。ただし、天井裏は他の部位より0.0005 [kg/kg³]程度高い値となっていた。これには後述するリターンダクトの断熱材からの結露水の蒸発が影響している可能性がある。

2019年の夏季には収蔵室2で除湿運転を行ったため、絶対湿度の変化性状・値は部位により大きく異なっていた。隣接収蔵室と廊下は、やや低い値で外気絶対湿度に追従した変化をしていた。それに対して、収蔵室2では、除湿時に絶対湿度が0.008 [kg/kg³]程度まで低下した。それに伴い天井裏、二重壁内部の絶対湿度も低下した（天井裏の方が0.001 [kg/kg³]弱低い）。除湿機の稼働は8月末で停止したが、除湿の影響は10月末まで及んだ。

(c)相対湿度

収蔵室2の室内の相対湿度は測定開始時点から2019年2月まで45%を超えており、さらに2018年6月末から9月中旬までは70%以上の高湿度となっていた（図4-10）。2018年8月上旬に1週間程度ルームエアコンを除湿モードで稼働したが、顕熱負荷が小さいため除湿効果は小さく、室内は70%以上の高湿度になったと考えられる。2019年冬季～春季は50%前後、その後56%程度までゆっくり増加した。2019年6月から除湿運転が始まったため相対湿度は大きく低下し、8月末には35%に達した。除湿停止後湿度は上昇し、10月末には60%程度になった。

天井裏の相対湿度は、冬季～春季は収蔵室2の値に近く、夏季に除湿が始まると低下するが最低でも50%までであった。二重壁内部は、冬季は70%前後、春季は60%程度、夏季の除湿時の後半から影響が現れ50%まで低下した。

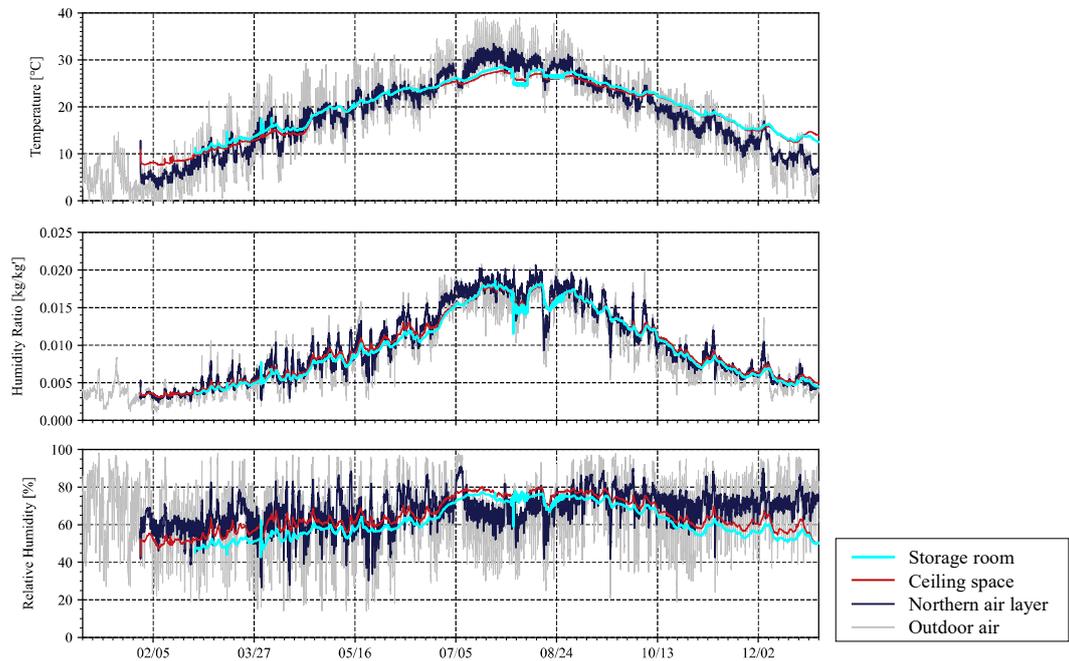


図 4-10. 収蔵室 2 と周囲空間の温度・絶対湿度・相対湿度
(2018. 1. 1～2018. 12. 31)

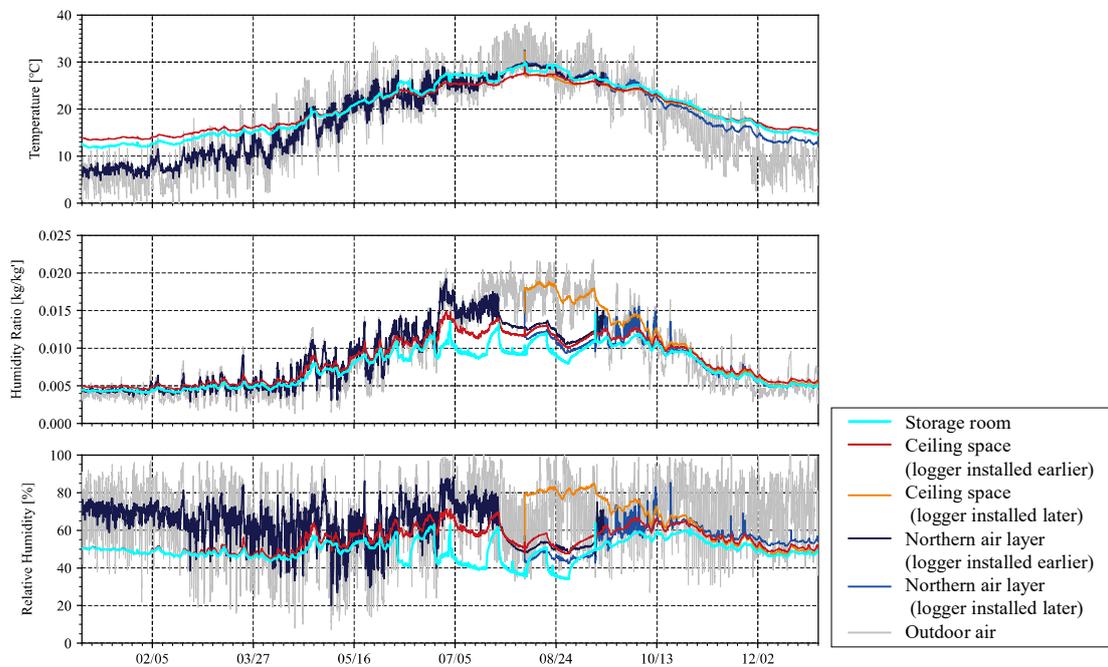


図 4-11. 収蔵室 2 と周囲空間の温度・絶対湿度・相対湿度
(2019. 1. 1～2019. 12. 31)

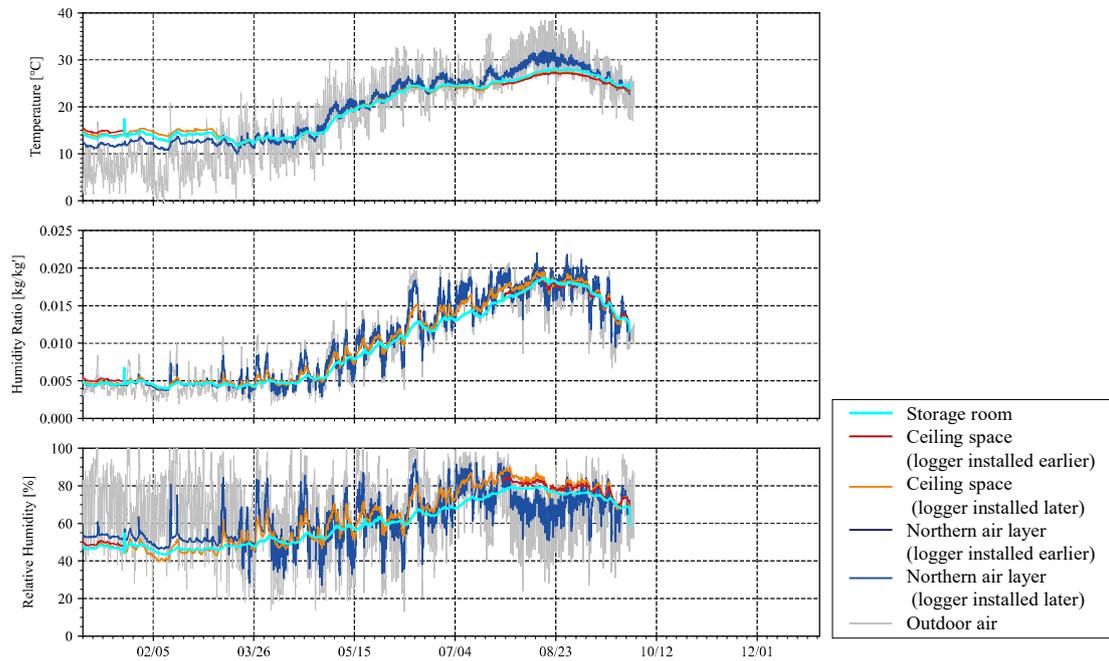


図 4-12. 収蔵室 2 と周囲空間の温度・絶対湿度・相対湿度
(2020. 1. 1～2020. 12. 31)

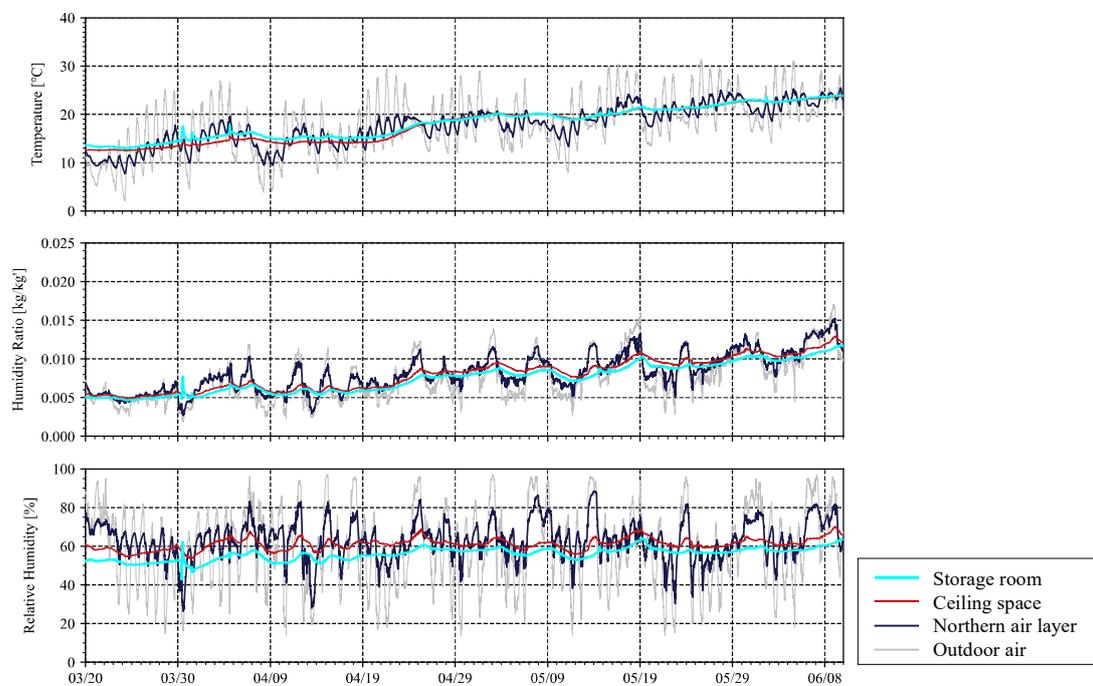


図 4-13. 収蔵室 2 と周囲空間の温度・絶対湿度・相対湿度 春季拡大図
(2018/3/20～2018/6/10)

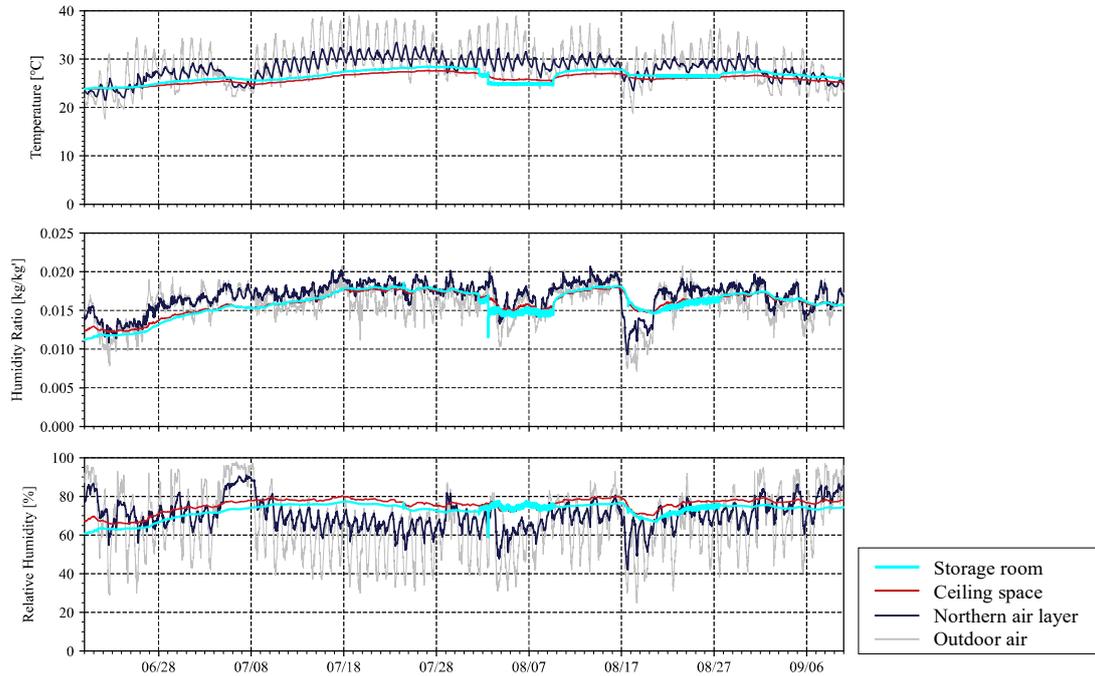


図 4-14. 収蔵室 2 と周囲空間の温度・絶対湿度・相対湿度 夏季拡大図
(2018/6/20~2018/9/10)

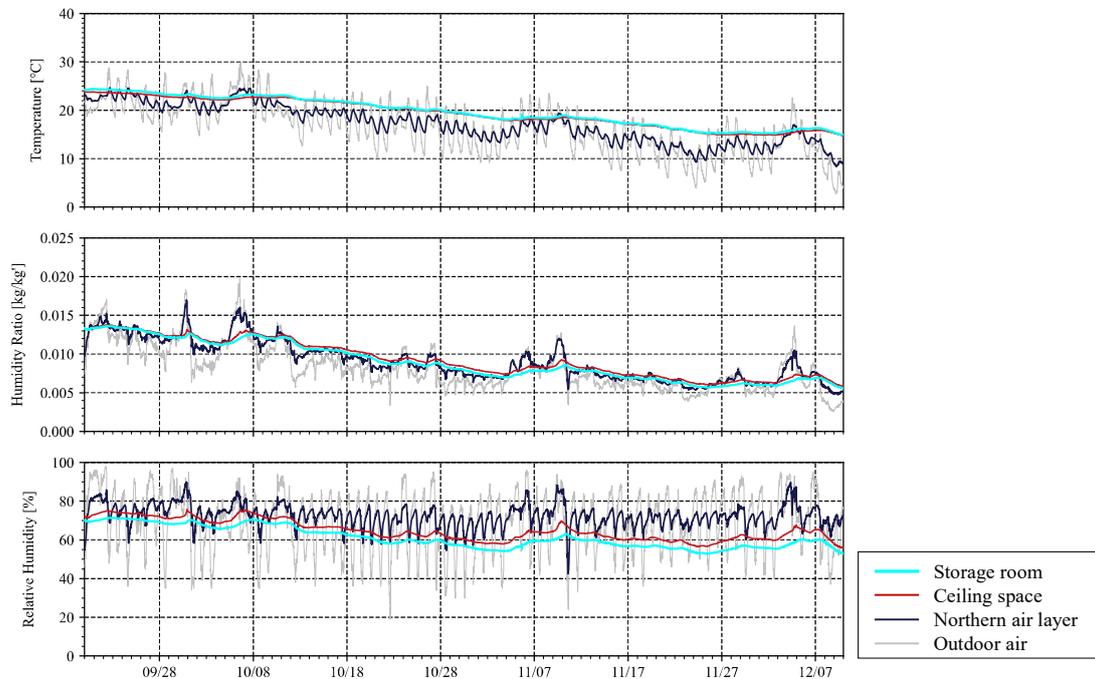


図 4-15. 収蔵室 2 と周囲空間の温度・絶対湿度・相対湿度 秋季拡大図
(2018/9/20~2018/12/10)

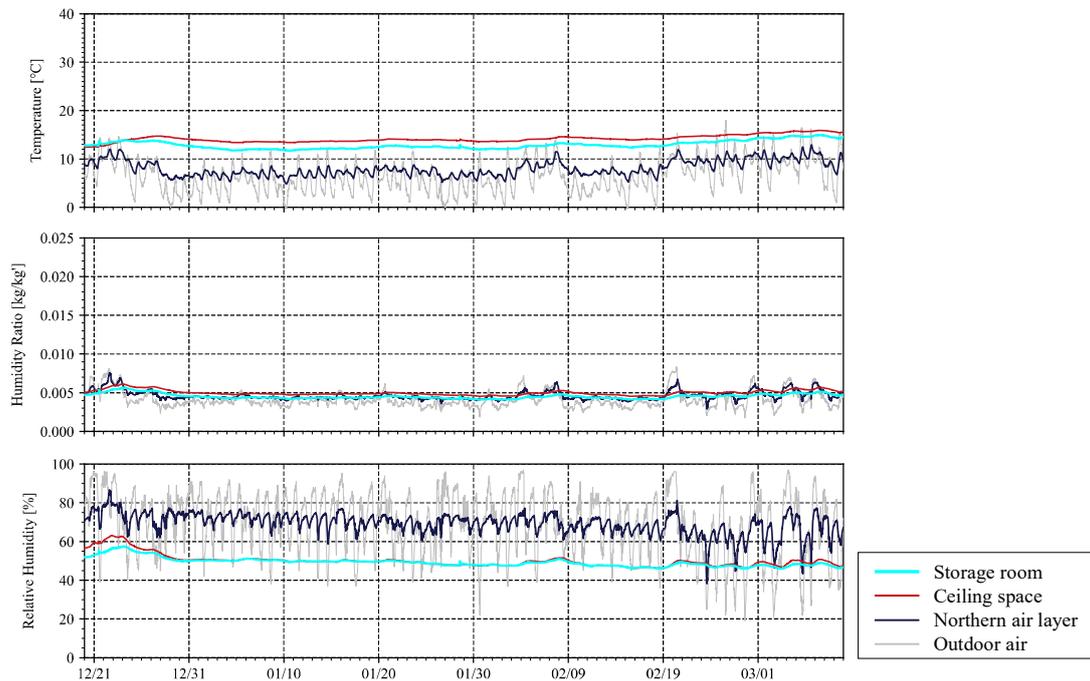


図 4-16. 収蔵室 2 と周囲空間の温度・絶対湿度・相対湿度 冬季拡大図 (2018/12/20～2019/3/10)

(2)保存環境の分析

2018 年夏季の収蔵室 2 の温湿度に着目すると、8/2～8/8 は 25°C 設定、8/21～8/27 の一週間は 27°C 設定でルームエアコンを除湿モードで運転したが、室内の相対湿度は 70% を超えていた。両期間において室温および天井裏温度が廊下温度より低くなっていたこと、室の顕熱負荷が小さくエアコンの弱冷房除湿では効果が小さかったことにより、相対湿度が低下しなかったと考えられる。年間を通して、収蔵室内の相対湿度は金属資料の保存基準といわれる 45% を超えており、さらに 6 月末から 9 月中旬過ぎまでは 75% 以上の高湿度となっていた。2019 年夏に除湿機を導入したことで、室内相対湿度は 59% 程度まで低下した。同時期に除湿機運転の無い隣接収蔵室の相対湿度が 80% 近くに達していたことから（図省略）、除湿機運転の効果は大きいと言える。

前述したように、金属資料に生じる金属腐食を防止するため、IICROM, ICOM などの機関は、相対湿度 45% 以下、20°C という保存の基準[3]を示している。温度の基準は資料の持ち出し時の表面結露の防止が主旨であり、保存環境では、低い環境相対湿度がより優先されるべきである。しかし、除湿機運転時を除き、金属資料収蔵室の相対湿度は 45% を上回り、特に夏季の 70% を超える高湿度は、金属資料の劣化に適さない。除湿機の運転により、夏季に保存の基準を満たす湿度が実現できる可能性はあるが、湿度の急変動が金属の劣化に与える影響について考慮する必要がある。

4.5. まとめ

収蔵室周りの温湿度調査により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。