

## 4 換気・空調システムの最適設計，最適制御に関する検討

### 4.1 目的と概要

空間内の温湿度，空気質が最適になるような吹出・吸込口位置と吹出空気条件の最適化について検討した．床面近くでの発熱による温度成層の形成を利用すると簡易な対応が可能となる可能性を，吹出・吸込口位置，吹出空気温湿度を変化させた CFD 解析により検討した．

#### (1) 収蔵スペース、展示スペース環境の実態調査

階段スペースを含む展示室・ロビーの気流・温湿度・空気質の分布の実態，空調の吹出空気の風速・風向・温度の実態の詳細については，COVID-19 の影響などがあり，当該博物館では十分な調査ができなかった．

#### (2) 展示スペースの気流，温湿度，空気質の解析

展示スペース内の気流解析：CFD により気流分布を解析した．CFD 計算の入力となる空調吹出・吸込条件には，前年度の測定で得られた気流測定結果を参考にした．

湿度，CO<sub>2</sub>，微生物分布の解析：上で得られる気流分布に，湿度，CO<sub>2</sub>，微生物などのパッシブ物質を入力し，それらの分布を求めた．

#### (3) 換気・空調システムの最適設計，最適制御に関する検討

空調換気システムの最適設計・制御：空間内の温湿度，空気質が適切で省エネルギーとなる吹出・吸込口位置を決め，吹出空気条件を最適化する考え方について検討した．

## 4.2 CFD 解析

### 4.2.1 計算対象

主たる計算対象は，**図 4-1** に示すような 1F から 2F への階段を有する直方体形状の大きな吹抜け空間である．1F と 2F はそれぞれ展示スペースに繋がっており，1F の壁面と 2F の壁面に空調吹出口がある．吸込口は，原設計では 1F 床面に設けられており，改良型として 2F 天井に吸込口を設けた場合を検討する．CFD 計算に用いたモデル詳細を**図 4-2** に示す．

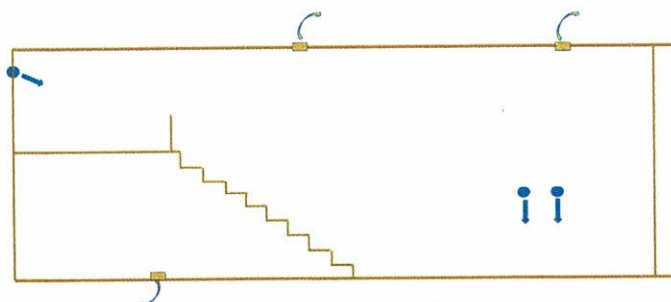


図 4-1 解析対象

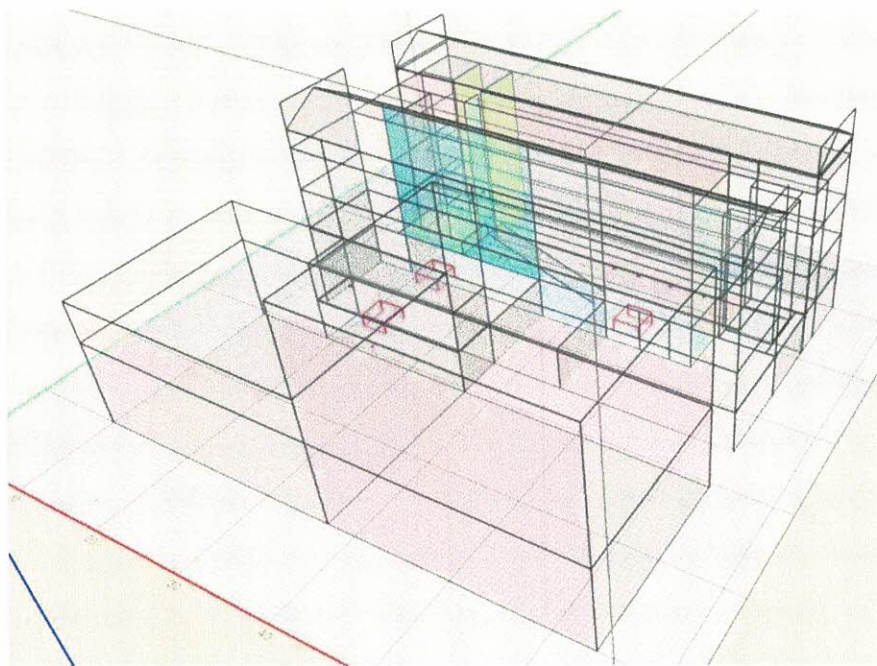


図 4-2 Museum20 のモデル化とメッシュ分割

#### 4.2.2 解析結果

(1)Model1：等温での気流分布（予備的検討）

- ・外気温度 35℃，吹出温度 25
- ・流れ，温度分布については妥当そうな結果が得られた。

(2)Model2：夏季冷房時を想定

- ・外気温を 35℃，空調吹出温度を 15℃とした。手前の建物は設定ミスでほぼ 3 階建てにしている（以降では修正）。
- ・温度分布はそれなりに得られていそうである。
- ・1F 展示スペースの温度は快適域だが，2F の温度は 27℃に近く，上部は 29℃と高い。

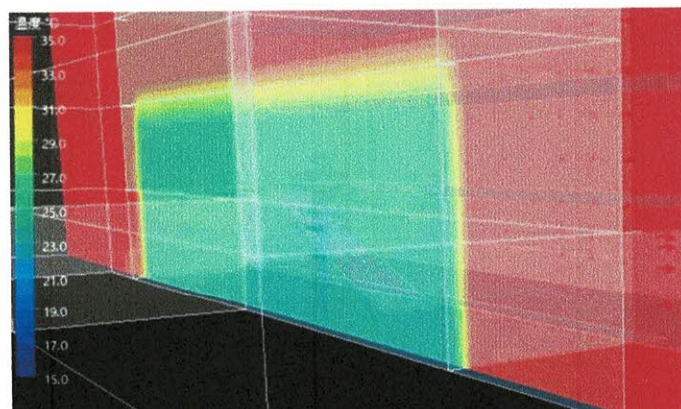


図 4-3 Model2：垂直温度分布



### (3) Model3 : CO2(ウイルス)の発生を想定

- ・室内に CO2 と熱発生物体を 3 個設置 (ロビー手前に 2 個, 1F 吹出前に 1 個). 1000W, および 100g/h (CO2 というより) ウィルス拡散の状況を調べる事が主目的である.
- ・発熱が無い場合には CO2 濃度分布はほぼ一様だが (Model2), 発熱があると温度成層化が生じ, CO2 濃度分布もその影響を受け, 上部 (2F) および CO2 発生物体の下部後方に高濃度の領域が形成される.

ロビー手前 550ppM, 2F540ppM, 階段下 530ppM, 1F 吹出前 520~530ppM

- ・等温系では, ウィルス, カビ, CO2 は 1F~2F に亙りほぼ一様に分布し, 吹き抜け空間のほぼ全領域が一様に危険性に晒されるが (Model1), 発熱による上昇気流が生じると高濃度の空気は上方に向かうため, 上部領域の濃度は上がるが, 下部領域はむしろ危険性が緩和される. これは対策として有効に利用できる可能性がある.
- ・発熱物体により, ロビー手前は 28℃程度, 2F28.7℃, 階段下 26.5℃, 1F 吹出前 26~27℃程度となり, 上昇気流が発生する. 汚染空気の排出に吹抜け空間を利用できる可能性を示している.
- ・水分発生とそれによる結露の危険性, カビの成長危険性の検討を, 吹出し・吸込み口の位置と風量の関係で最適化問題 (室内の濃度が同じという条件下で, 吹出流量×温度差が最小になる吹出・吸込位置) として検討する必要がある.

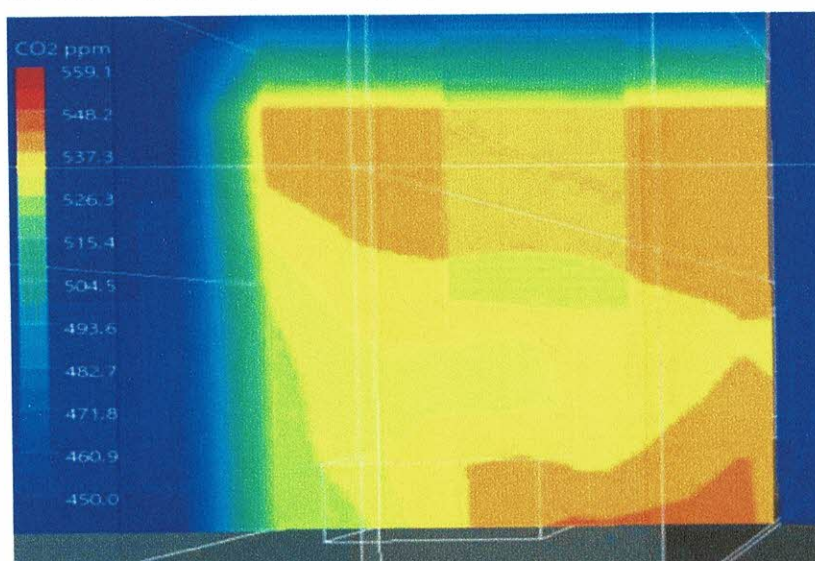


図 4-4 Model3: CO2 の垂直分布

### (4) Model4 : 相対湿度分布

- ・カビ発生や結露の検討をするため, 外気は 35℃・60% (0.0215kg/kg), 吹出空気は 15℃・90% (0.0097kg/kg) とした場合の相対湿度分布を計算した.
- ・ロビー手前はほぼ 42%, 2F は 40.5%, 階段下は 44%, 1F 吹出下は 44~47%
- ・今後冬季の条件で壁面や窓面近傍を調べ, ウィルス (CO2) 濃度との相関を検討する.

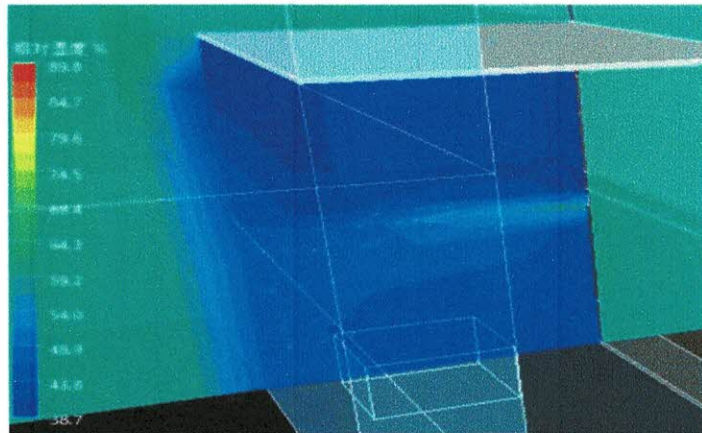


図 4-5 Model14: 相対湿度の垂直分布

(5)Model5 : 天井吸込み追加・自然棟の幾何形状修正

- ・中間棟の 2F 天井に吸込みを設置し，成層化に伴う空間上部の高濃度ウィルスの効率良い排出について検討した。
- ・発熱物体により，ロビー手前は 27℃程度，2F27.9℃，階段下 26.5℃，1F 吹出前 25.4～26.5℃程度となり，天井排気口が無い場合より低温になっている。
- ・ロビー手前 535～550ppM，2F537ppM，階段下 530ppM，1F 吹出前 520～530ppM 程度で，ロビー手前や 2F ではやや低くなっているが，階段下 530ppM，1F 吹出前では大きな変化は無い。
- ・ロビー手前はほぼ 43.5～44.5%，2F は 42%，階段下は 45～46%，1F 吹出下は 46～49% で，排気口が無い場合より高くなっている。

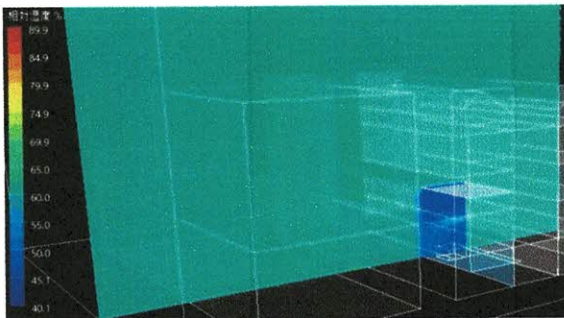


図 4-6 Model15: 相対湿度の垂直分布

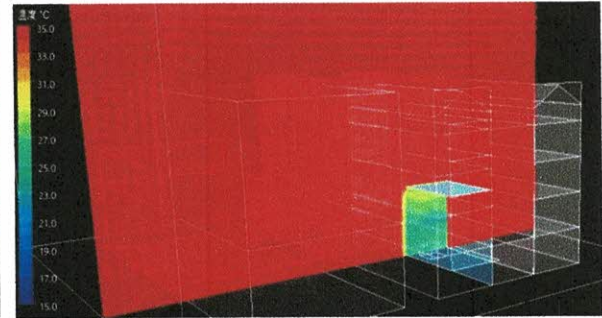


図 4-7 Model15: 温度の垂直分布

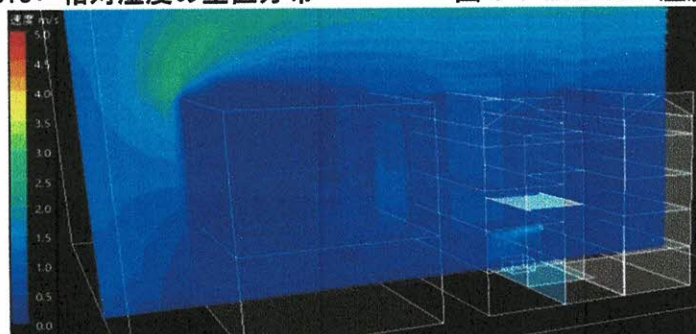


図 4-8 Model15: 風速の垂直分布



(6)Model6：展示室1を合わせて考慮

- ・北壁からの2個の吹出 5m/s・15°C，南から 1m/s（高さ 10m）・35°Cの外部風，2F 東部天井に1個の吸込 2.5m/s
- ・展示室1のドアを設置したが，1F吹出とドアの位置がかなりずれていたため，吹出気流の影響は非常に小であった。
- ・吹出口位置を展示室1ドアに近づけたが，吹出気流の影響はそれ程大きくない？
- ・2F天井東部に吸込み口を設けると，1F床近くは低温で，2F東部天井は高温に成層化。

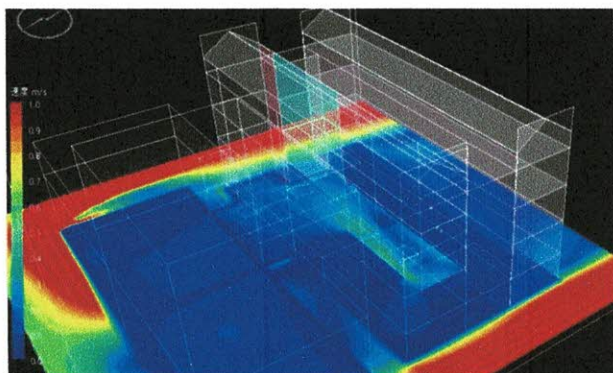


図 4-9 Model6:風速の水平分布

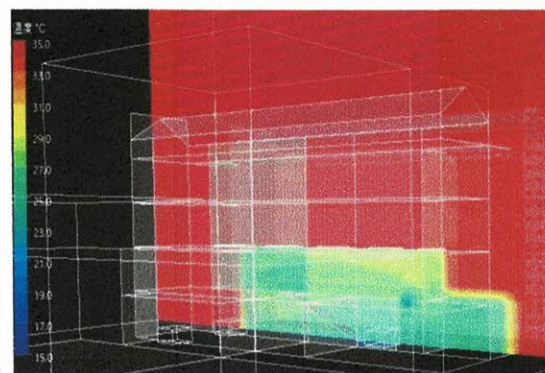


図 4-10 Model6:風速の垂直分布

(7)Model17

- ・北壁から4個の吹出 3m/s・18°C，南から 1m/s（高さ 10m）・35°Cの外部風
- ・2F 階段近くの天井に3個の吹出 1.6m/s・18°C

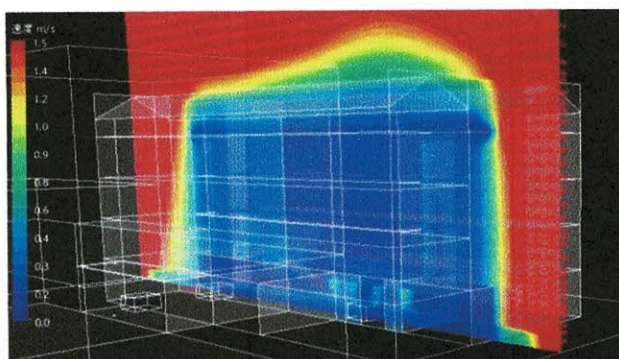


図 4-11 Model17:風速の垂直分布

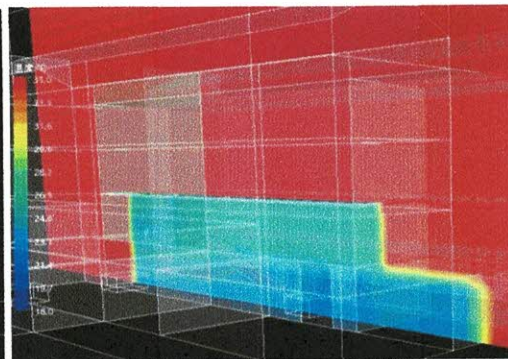


図 4-12 Model17:温度の垂直分布

(9)Model20

- ・北壁から4個の吹出 3m/s・18°C，南から 1m/s（高さ 10m）・35°Cの外部風
- ・2F 階段近くの天井に3個の吹出 1.6m/s・18°C

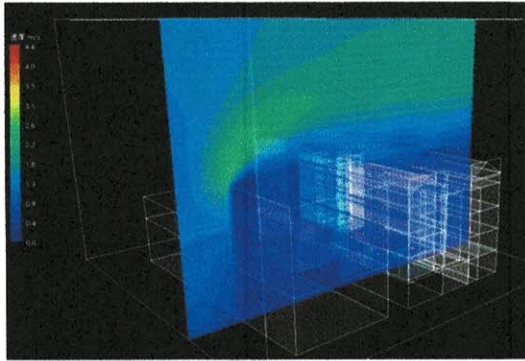


図 4-13 Model20:風速の垂直分布

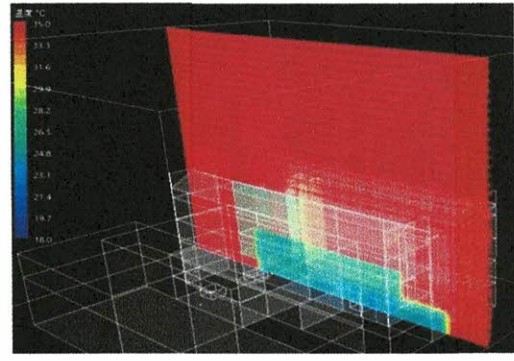


図 4-21 Model20:温度の垂直分布

### 4.3 第4章のまとめと今後の課題

#### (1) ウィルスの拡散制御

- ・階段を有する吹抜け空間では、ウィルスの拡散を抑制する吹出・吸込口の位置決定は比較的容易と考えられる。
- ・人体からの発熱がある場合には、浮力を利用した自然排気が利用できる可能性がある。
- ・南側のロビーでの発生をどうするか⇒階段スペース上部に吸込みを設ける？

#### (2) ダクトからのカビ

- ・ダクトからのカビの吹きだしの影響⇒等温系では空間全体に広がる。  
境界条件としては、吸込み以外はカビの流出は無しとする。
- ・冬季のカビ発生  
カビの空間分布と水蒸気の拡散を合わせて考える。  
水蒸気圧分布を調べる。外壁あるいはガラス面での結露？  
どこでカビが生育し易いか。温度と湿度が絡む。やはり窓面か？
- ・石造展示物へのカビ発生  
コロナによる休館時に空調を停止した。展示物の熱容量のために流入した夏季の高温空気によるものだろう。

#### (3) 第一展示室との関係

- ・1F 吹出口からの給気の一部は、正面の第一展示室のドアの下部を通して展示室に流入し、高温の展示室空気はドアの上部を通して流出する。  
⇒そのような相互関係が生じるが、そのような空気の流出入はできるだけ避けて独立した空間とする方がベターだろう。そのようにできない場合は？

#### (4) 本来の大空間の空調の在り方、吹出・吸込口の位置

- ・必要な 1F 床近傍の冷房は OK  
階段スペース～2F はどうか？劇場の空調に近い。  
2F にも吹出を設け、高温空気は階段室上の天井の吸込口へ
- ・暖房は？⇒これは難しい。

#### (5) 考察・今後の課題

空間内の温湿度, 空気質が最適になるような吹出・吸込口位置と吹出空気条件の最適化に向けて検討した. 温湿度と空気質を最適とする給気量は $\infty$  (過大な気流速度の問題を除く), 搬送系消費エネルギーを最小にする給気量は0となるので, 両者を考慮して最適化する問題を解くことになるが, (3)の床面近くでの発熱による温度成層の形成を利用すると簡易な対応が可能となると推定し, 吹出・吸込口位置、吹出空気温湿度を適当な範囲で変化させたCFD解析を行い, その可能性を確認した.



## 5. 収蔵ケースおよび展示スペース内の温湿度環境の実態調査

### 5.1 測定目的と測定概要

収蔵ケース内の温湿度は、収蔵物を良好な状態に保つための最終段階として適切に制御される必要がある。収蔵室の温湿度は外界条件や室の使用に伴う変化を受けて変化するため、一定の値に維持することは一般的に容易ではない。収蔵ケースはそのような変化が収蔵物に及ぼす影響を緩和し、保存にとって重要な役割を果たすと考えられる。

ただ、収蔵ケースが収蔵室のどのような温湿度変動（周期や変化幅）を、どの程度緩和するのか、収蔵ケースの材料による違いがどうかなどの実態について調査した例は極めて限られている。そこで、調査対象とする博物館の収蔵庫に設置された収蔵ケースに対して実態調査を行い、ケース内と周辺環境の温湿度の関係を調べた。全部で6室の収蔵室において、使用されている木箱、紙ケース、プラスチックケースなど11箱について、その内部の温湿度を計測した。更に、その結果をもとに熱水分移動解析を行い、どのような要因が温湿度変動の緩和に影響するかを調べた。

#### (1) 測定位置

測定した収蔵ケースは、表5-1に示すように全部で12ケースであるが、そのうち1個については測定装置が不調であり、結局全部で11個の測定結果が得られた。

表5-1 温湿度を測定した収蔵室と収蔵ケース

|         | 収蔵室     | 収蔵容器                    | 収蔵物        |
|---------|---------|-------------------------|------------|
| hokoi1  | 3F特別収蔵室 | 勸修寺桐箱(室中央棚)             | 紙で放送された巻物  |
| hokoi2  | 3F特別収蔵室 | 中性紙箱(南壁沿・②上から2つ目)       | 巻物・古文書集    |
| hokoi3  | 3F特別収蔵室 | 文書筆筒・抽斗(室中央・キ8抽斗)       | 巻物         |
| hokoi4  | 4F特別収蔵室 | 木箱(中段・室中央・入口から左)        | 鉄器・鴨稻荷山古墳  |
| hokoi5  | 4F特別収蔵室 | コンテナ(床置・北壁沿・上から3段目)     | 銅器         |
| hokoi6  | ムラージュ   | キャビネット(西壁沿)             | 写真乾板       |
| hokoi7  | ムラージュ   | コンテナ(空コンの下・南壁沿・9-1)     | ムラージュ      |
| hokoi8  | 金属資料室   | コンテナ(2段目・タッパの外・2/10将軍山) | 鉄器         |
| hokoi9  | 考古資料室2F | 木箱(2段目・室中央・7931)        | 瓦経7931     |
| hokoi10 | 考古資料室2F | コンテナ(1段目・室中央)           | 人骨(Abybos) |
| hokoi11 | 考古研究展示室 | 室内(北側エアコン・西端・下)         |            |
| hokoi12 | 考古研究展示室 | 覗き込みケース(中央)             | 青銅器(遼寧省)   |

#### (2) 測定日時

測定は2022年7月27日から開始し、現在も継続中である。以下では、2023年3月2日までの結果の温度、相対湿度、絶対湿度を示す。

#### (3) 測定方法

温湿度の測定にはHOBOの温湿度計を用いた。



## 5.2 測定結果と熱水分移動解析による検討

### 5.2.1 測定結果

以下、収蔵庫毎に温度、相対湿度、絶対湿度の測定結果を、外気温湿度とともに示す。特別収蔵室については、熱水分移動解析を行った結果を合わせて示す。

### 5.2.2 4階特別収蔵室

#### (1)温度 (図5-1~5-3)

- ・収蔵室：10月中旬まで18~20℃→12月中旬11℃まで低下→12月下旬~1月中旬27℃一定→11℃まで急減少した後一定となる(図5-1)。温度変動幅は2~3℃で小さくはない。8月17日~19日には26℃までの急上昇・急低下、9月5日と9月19日には、前後の日に見られる1.5℃程度の温度上昇が見られない(図5-2)。12月下旬~1月中旬の階段状の温度上昇(27℃)は、それまでは不調によりOFFとなっていた空調機がONとなった後、再度停止したことによる変化である(図5-3)。
- ・収蔵容器：収蔵室の温度変動とほぼ等しく、hoko4(木箱), hoko5(コンテナ)内の温度変動は殆ど緩和されていない。

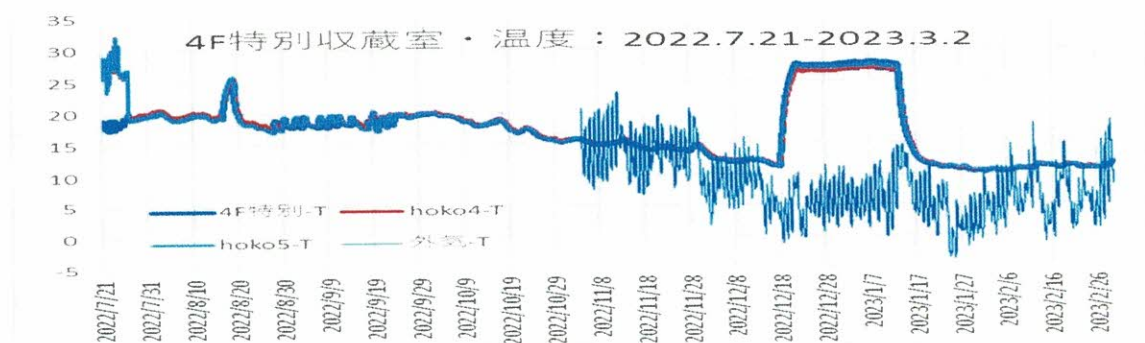


図5-1 4F 特別収蔵室温度 (2022年7月27日~2023年3月2日)

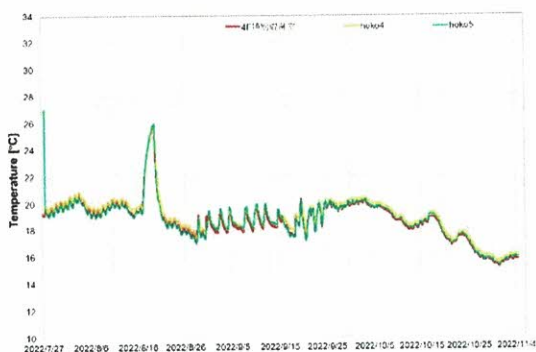


図5-2 4F 特別収蔵室温度 (2022年7月27日~11月14日)

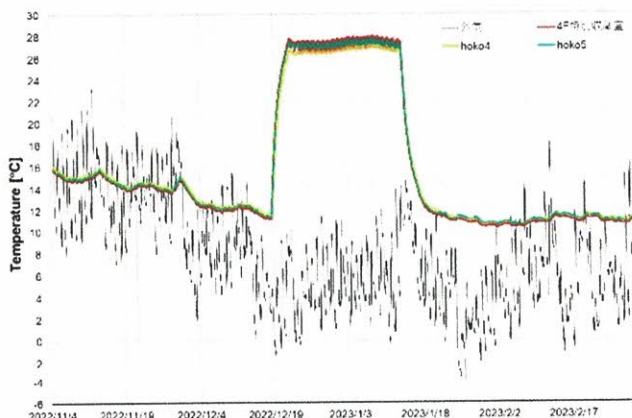


図5-3 4F 特別収蔵室温度 (2022年11月14日~2023年3月2日)

## (2) 相対湿度 (図 5-4~5-6)

### ・ 収蔵室 (図 5-4)

8月の64%から徐々に低下→10月~12月中旬は48%一定→12月19日から低下し23%→1月13日から上昇し3月に45%となる。この上昇は放湿によるものだろう。

### ・ 収蔵容器 (図 5-5、5-6)

全体的には、収蔵室の変化が緩和された形で変化している。

hoko4(木箱): 8月の60%から徐々に低下→10月~12月中旬は48%一定→12月19日から一旦少し上昇した後、26%まで低下→1月18日以降上昇し3月に40%となる。

hoko5(コンテナ): 8月~10月58%ほぼ一定→12月中旬52%まで低下→12月19日から一旦少し上昇した後、34%まで低下→1月18日以降やや上昇し3月に37%となる。

- ・ 「12月19日から一旦少し上昇」は、収蔵ケースの吸放湿による湿度の前進変化によるものと考えられる。「12月19日以降の下降・上昇」のケースによる違いの理由については以下の熱水分移動解析より検討する。

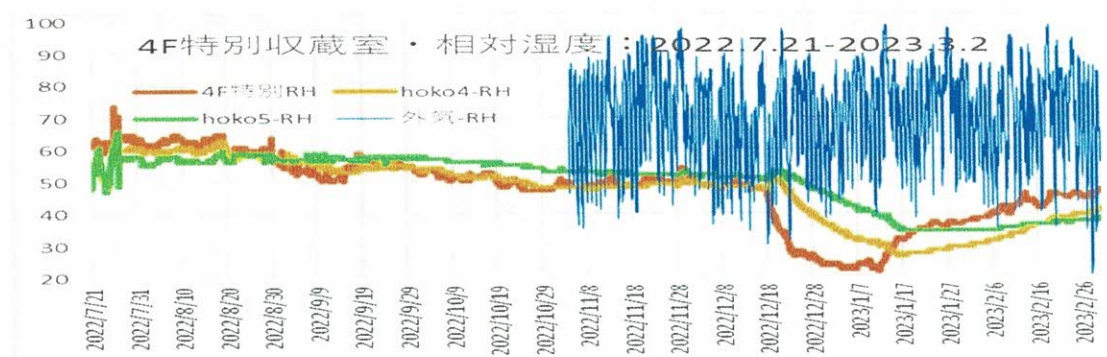


図 5-4 4F 特別収蔵室の相対湿度 (2022 年 7 月 27 日~2023 年 3 月 2 日)

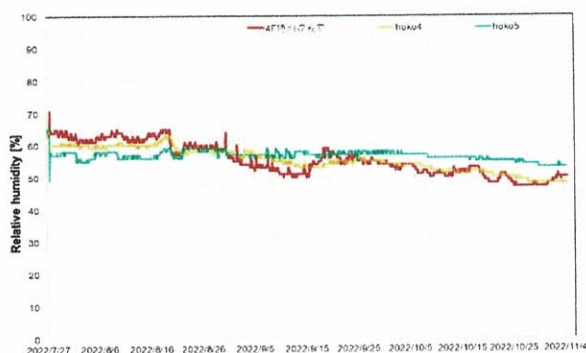


図 5-5 4F 特別収蔵室の相対湿度 (2022 年 7 月 27 日~11 月 14 日)

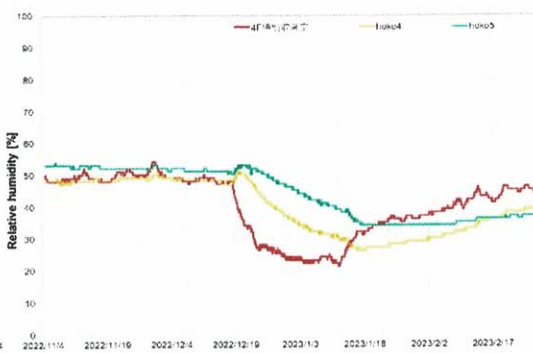


図 5-6 4F 特別収蔵室の相対湿度 (2022 年 11 月 14 日~2023 年 3 月 2 日)

## (3) 絶対湿度 (図 5-7~5-8)

- ・ 収蔵室: 8月 8.5g/kg から低下→12月中旬に 4g/kg→12月19日に 8g/kg まで急上昇→1月16日 3g/kg まで急減少→3月の 3.8g/kg まで上昇



・収蔵容器：

hoko4(木箱)：収蔵室の変化に追従するが、変動は僅かに緩和されている。12月19日～1月18日の変化幅は収蔵室の変動の2倍に達する。

hoko5(コンテナ)：収蔵室の変化に追従するが、変動は少し緩和されている。12月19日～1月18日の変化幅は収蔵室の変化幅の3倍に達する。

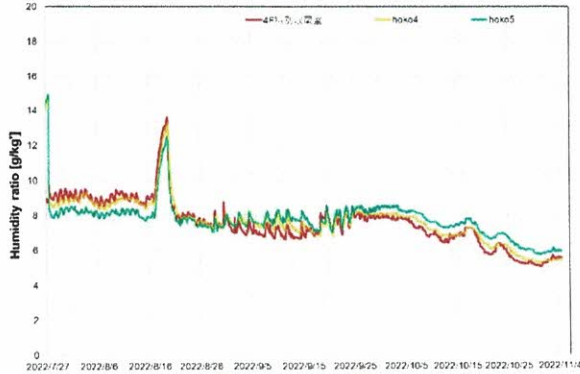


図 5-7 4F 特別収蔵室の絶対湿度 (2022 年 7 月 27 日～11 月 14 日)

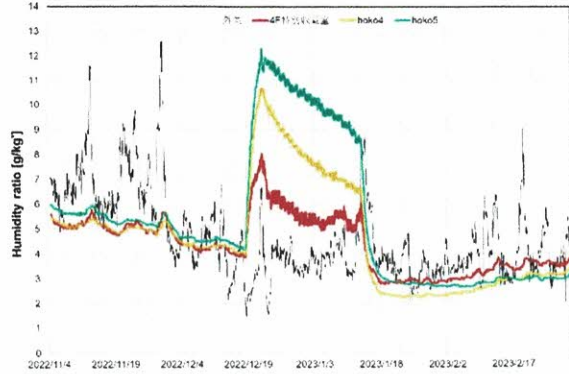


図 5-8 4F 特別収蔵室の絶対湿度 (2022 年 11 月 14 日～2023 年 3 月 2 日)

(4)解析結果：12月～1月の長期に亙る急激な温湿度変化を解析対象に

・空調機運転 OFF→ON→OFF と切り替わった (と推定される) 12月19日～1月18日には、収蔵室の温度がほぼ階段状に変化し、それ以前はゆっくりと単調減少しているため、収蔵ケースの温湿度特性を調べるのに都合が良い条件となっている。収蔵庫の温湿度を入力として、収蔵ケースの吸放湿を考慮した熱水分移動計算により収蔵ケース内温湿度を求め、測定された収蔵ケース内温湿度と比較する。

・木製収納ケース (Hoko4) に関しては、測定値は解析によりほぼ再現できた (図 5-9)。この結果をベースにして他の場合について検討する。

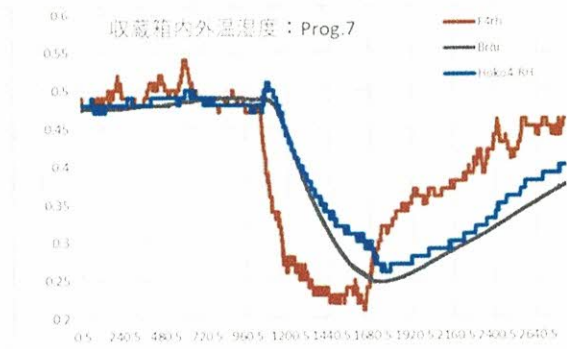
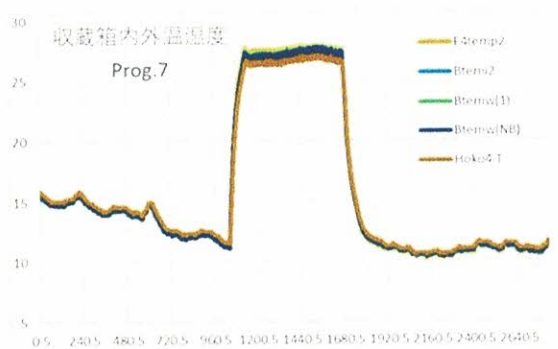


図 5-9 4F 特別収蔵室温度の計算値と測定値の比較(2022 年 12 月 24 日～2023 年 3 月 1 日)

・塩ビ製のコンテナケースについての結果を図 5-10、図 5-11 に示す。

図 5-10 は、コンテナケースには吸放湿性が無く、純粹の熱伝導のみが生じ、またケース

内に収蔵物が無い場合である。温度については、計算値は測定値とよく一致するが、相対湿度についてはケース内の相対湿度は急激な変化をし、収蔵室の相対湿度に近い変化となっており、大きく外れる。

図5-11は、10cm×30cm×2cm程度の木製の収納品が納められているとして計算した結果であり、木製ケースの場合ほどではないが、そこそこの一致が得られる。実際に収納されているのは銅製の資料であり、通常は木製資料のような吸放湿性は無いと考えられる。ただ、金属資料とは言え、錆びて酸化しているであろうことを考えると、酸化銅の吸放湿がそれなりにあると可能性があり、これは今後検討する必要がある。

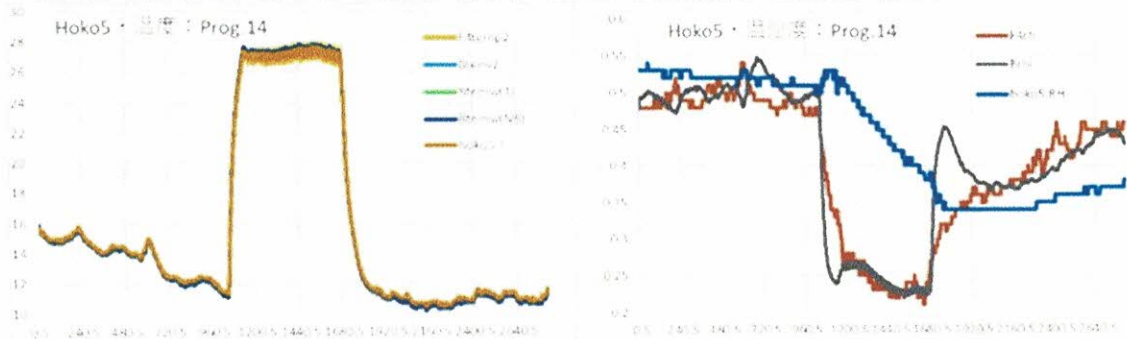


図5-104F 特別収蔵室温度の計算値と測定値の比較(2022年12月24日～2023年3月1日)

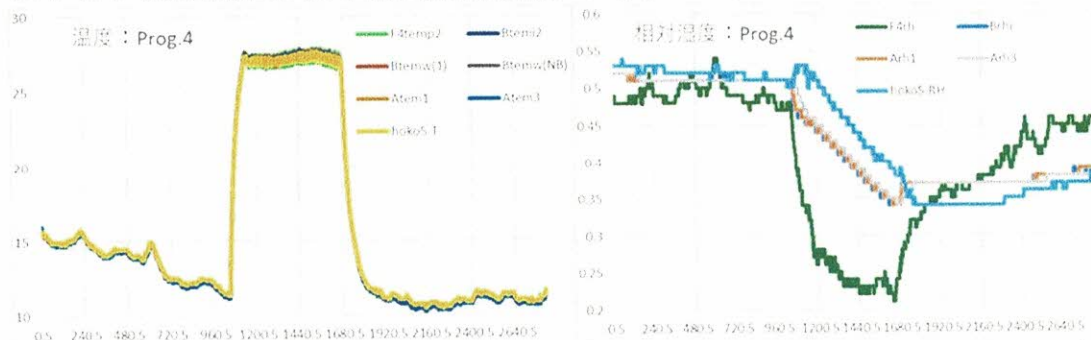


図5-114F 特別収蔵室温度の計算値と測定値の比較(2022年12月24日～2023年3月1日)

#### (5)まとめ・留意点

- ・収蔵ケース内の温度は収蔵室の値とほぼ等しく、相対湿度・絶対湿度は収蔵室の値が緩和されて変化している。
- ・数日レベルの急激な変動（8月17日～19日、9月5日、9月19日）については、3F特別収蔵室と共通なので、そのような観点より検討する必要がある。
- ・12月～1月の長期に亘る急激な温湿度変化は、収蔵室の温度・絶対湿度がほぼ階段状の変化をしていることから、空調機の不備によるOFF・ON・OFF変化と考えられる。
- ・この期間の収蔵室温湿度を入力とした収蔵容器内の温湿度シミュレーションにより、木製ケースでは良い一致を得ることができた。これより、計算に用いた収蔵ケース自身の吸放湿特性およびケースの気密性がある程度実態に近いと考えられる。
- ・それに対して、塩ビ製のコンテナケースの場合には、銅製資料が収納されていないとした



計算値は測定値から大きく外れた。銅製資料が収納されていることの影響を、少量の木製資料で近似し吸放湿性考慮すると、ある程度の一致を得ることができた。金属製資料の場合でも、錆（酸化）による吸放湿性の付加の可能性が考えられる。

### 5.2.3 3階特別収蔵室

#### (1)温度（図 5-12～5-14）

- ・収蔵室（図 5-12）：

平均的には、8月上旬 21.3℃→10月 20.5℃に減少→1月 24.5℃に上昇→2月から減少  
夏季と冬期の冷暖房が大きい時期に変動が大きく、8月 17日～19日に 25.3℃まで急上昇→21日 21℃に低下、9月 5日と 9月 19日にも 1.5℃程度の短時間の温度上昇

- ・収蔵容器（図 5-13, 5-14）：

収蔵室とほぼ同様の変化をし、温度変動は殆ど緩和されてはいない。

夏季は収蔵室より高く（hoko3(文書筆筒)は 0.7℃，hoko1(桐箱)と hoko2(中性紙箱)は 0.1～0.2℃），10月にほぼ等しくなった後，冬季は逆転し収蔵室より低くなる（hoko1(桐箱)と hoko3(文書筆筒)は 1.5℃，hoko2(中性紙箱)は 1℃）。

夏季，冬季とも，hoko3=>hoko1>hoko2 の順で（収蔵室室温より）外気温に近い。収蔵容器の熱容量による差ではないので，外壁からの距離による（吹出空気温度差）ものと推定される。



図 5-12 3F 特別収蔵室の温度（2022 年 7 月 27 日～2023 年 3 月 2 日）

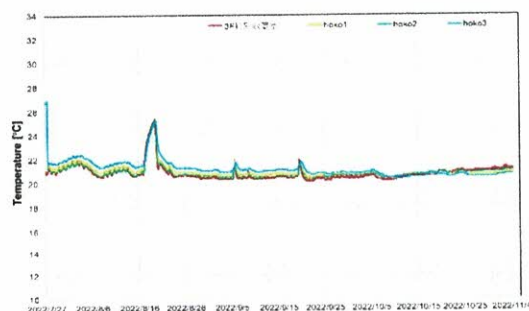


図 5-13 3F 特別収蔵室の温度（2022 年 7 月 27 日～11 月 14 日）

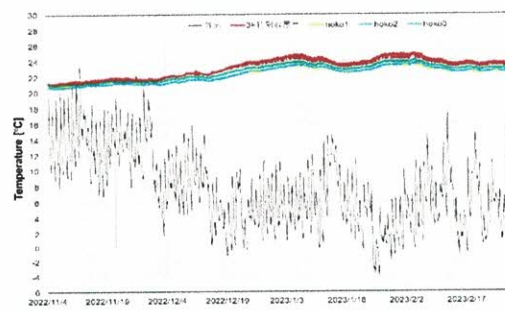


図 5-14 3F 特別収蔵室の温度（2022 年 11 月 14 日～2023 年 3 月 2 日）

(2)相対湿度 (図 5-15~5-17) :

- ・ 収蔵室 : 10 月後半まで 55%前後で一定→1 月中旬に 40%まで低下→以降ほぼ一定  
8 月 17 日~19 日に 5%, 9 月 5 日に 8%の湿度上昇が見られる (図 5-15).
- ・ 収蔵容器 : 収蔵室の短期の相対湿度変動も殆ど緩和されていない (図 5-16, 5-17).  
夏季は収蔵室 RH に近く (hoko3、hoko1 はやや低く, hoko2 はやや高い), 10 月以降は  
収蔵室 RH より高い (hoko3=>hoko1>hoko2). 温度とは逆の傾向となっている.



図 5-15 3F 特別収蔵室の相対湿度 (2022 年 7 月 27 日~2023 年 3 月 2 日)

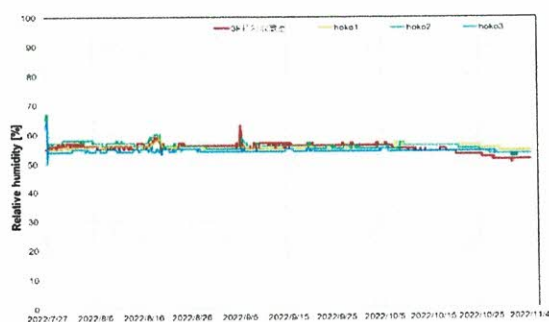


図 5-16 3F 特別収蔵室の相対湿度 (2022 年 7 月 27 日~11 月 14 日)

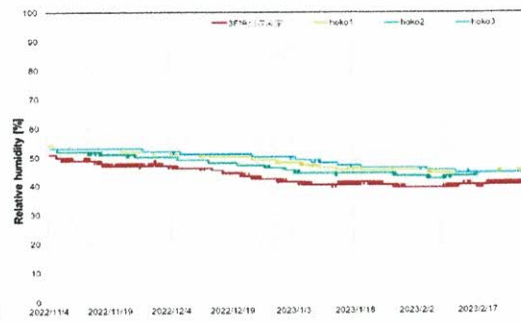


図 5-17 3F 特別収蔵室の相対湿度 (2022 年 11 月 14 日~2023 年 3 月 2 日)

(3)絶対湿度 (図 5-18, 5-19) :

- ・ 収蔵室 : 8 月 8.3g/kg→3 月 7.4g/kg まで非常にゆつくりと低下 (ほぼ一定).  
8 月 17 日~19 日, 9 月 5 日, 9 月 19 日には, 3.5, 1.5, 1.0g/kg の短期間の増加
- ・ 収蔵容器 :  
11 月までは収蔵室の絶対湿度とほぼ同じだが, 11 月以降は収蔵室より高い値となる  
(hoko3>hoko1>hoko2).



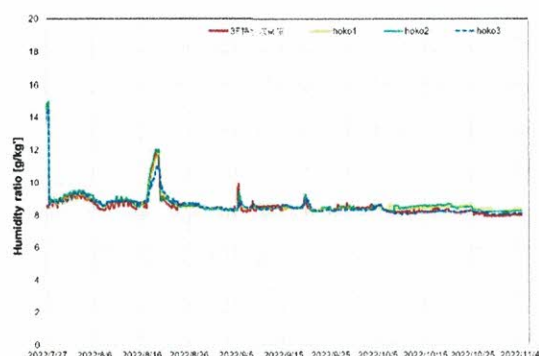


図 5-18 3F 特別収蔵室の絶対湿度 (2022 年 7 月 27 日～11 月 14 日)

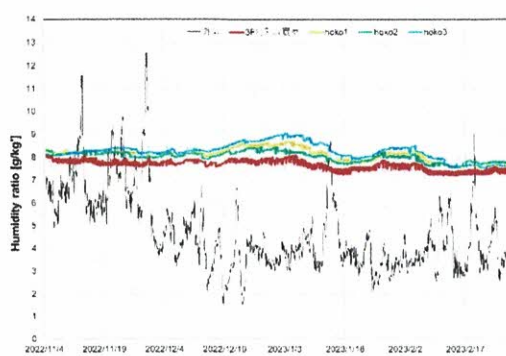


図 5-19 3F 特別収蔵室の絶対湿度 (2022 年 11 月 14 日～2023 年 3 月 2 日)

(4)解析結果 (図 5-20, 5-21)

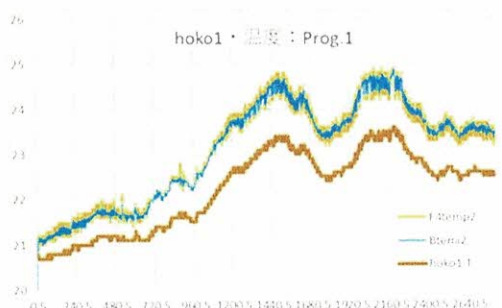


図 5-20 3F 特別収蔵室の温度 (2022 年 7 月 27 日～2023 年 3 月 2 日)

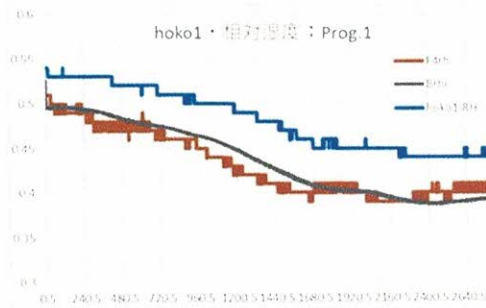


図 5-21 3F 特別収蔵室の相対湿度 (2022 年 7 月 27 日～2023 年 3 月 2 日)

- ・ 収蔵容器内の温度計算値 (Btemp2) は収蔵室温度 (F4temp2) とほぼ等しくなり、測定結果 (hoko1-T) を再現できない (図 5-20)。相対湿度についても、収蔵容器内 RH の計算値 (Brhi) は収蔵室 RH (F4rh) に近い値となり、測定結果 (hoko1-RH) とは大きく異なる (図 5-21)。
- ・ 収蔵容器内の空気の熱容量を 10000 倍にして収蔵資料を模擬したり、換気 (漏気) 回数を 0.0001 まで小さくしても、これらの結果は大きくは変化しない。
- ・ 従って、計算値が測定値と異なるのは、収蔵ケースの熱物性値や収蔵物の有無、換気回数 of 不適切な設定によるものではなく、与えた収蔵室の温湿度が解析目的にそぐわなかった、すなわち収蔵ケース周りの温湿度は収蔵室温湿度測定値と異なると推定される。この推定は、収蔵庫内の温度分布測定結果よりほぼ正しいと考えられる (注参照)。

(5)まとめ、留意点：

- ・ 8 月 17 日～19 日の収蔵室温湿度の変動⇒停電などによる空調停止によるものと考えられる。これについては、同じ時間に 4 階特別収蔵室でも制御が正しく行われていないので、共通する原因と考えられる (ただ、他の収蔵室ではこれらの変動は見られない)。
- ・ 9 月 5 日, 9 月 19 日の変動⇒空調機の調整時の変動か、収蔵室内での活動に起因するも

のと考えられる。4階特別収蔵室でも同様に制御が前後の日と違うため、空調機の点検・整備などが原因と推定される。

## 5.2.4 金属資料室

### (1)温度 (図 5-22～5-24)

#### ・収蔵室 (図 5-22) :

8月  $29 \pm 1^\circ\text{C}$  → 9月  $27.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$  → 1月上旬に  $12^\circ\text{C}$  まで低下 → 3月  $14^\circ\text{C}$  まで上昇  
8, 9, 11, 12月の変動は除湿機運転の ON-OFF によるものである。

#### ・収蔵容器 : hoko8(コンテナ)内温度は除湿機 off の時は収蔵室室温にほぼ等しく, on 時は $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 低い。

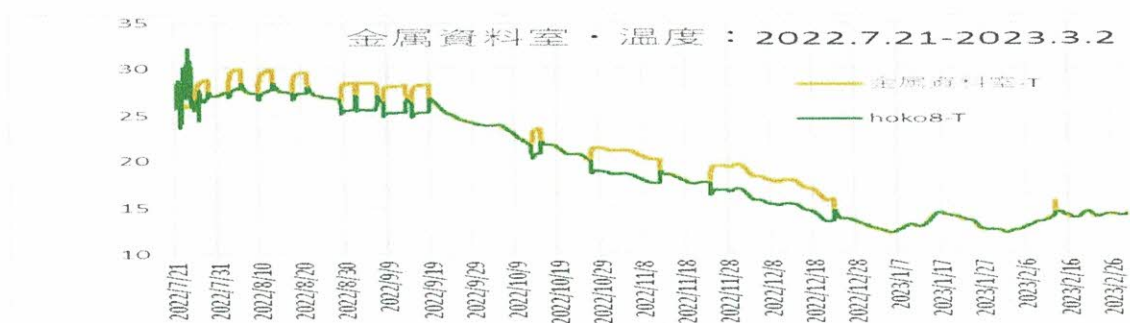


図 5-22 金属資料室の温度 (2022年7月27日～2023年3月2日)

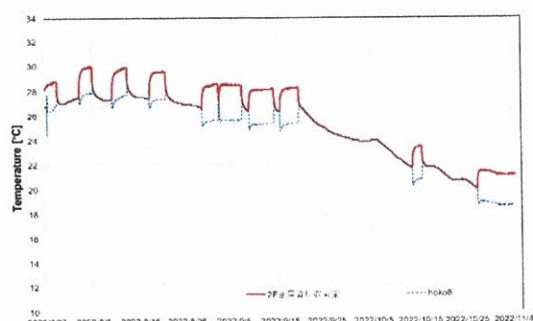


図 5-23 金属資料室の温度 (2022年7月27日～11月14日)

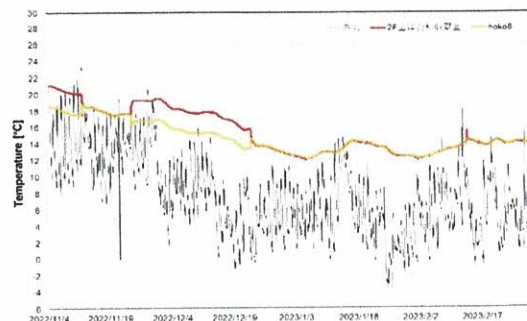


図 5-24 金属資料室の温度 (2022年11月14日～2023年3月2日)

### (2)相対湿度 (図 5-25～5-27) :

・収蔵室(図 5-25) : 7月から3月にかけて  $45 \pm 5\%$  の変化をする。除湿機が on の時は  $40\%$ , off 時は  $50\%$  となる。

・収蔵容器 : hoko8(コンテナ)内の相対湿度は  $47.5 \pm 3\%$  を変化する。除湿機が on の時は低く  $45\%$  程度, off 時は高く  $50\%$  程度の値となり収蔵室の RH にほぼ等しい。

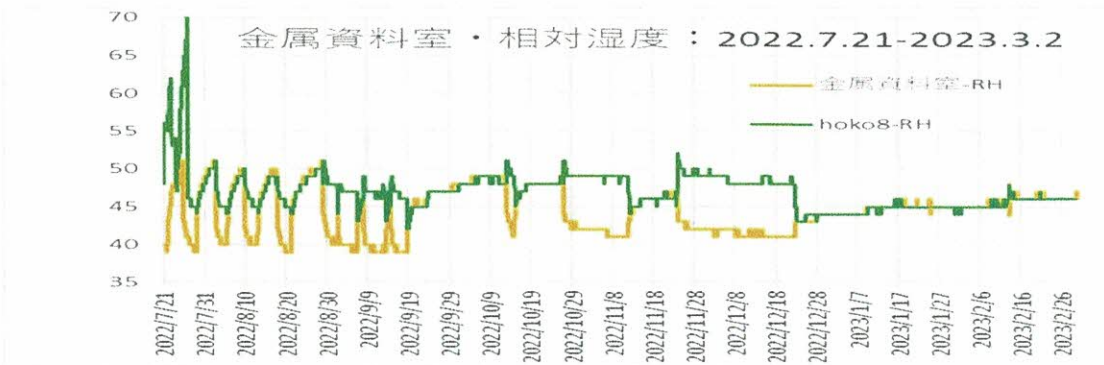


図 5-25 金属資料室の相対湿度 (2022 年 7 月 27 日~2023 年 3 月 2 日)

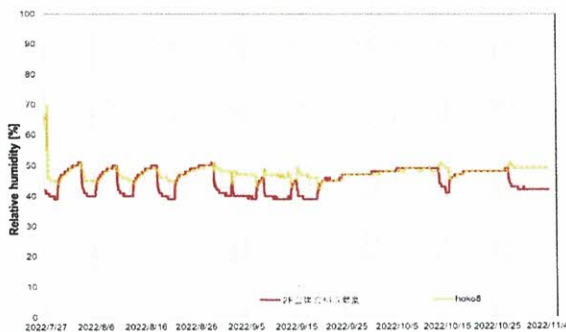


図 5-26 金属資料室の相対湿度 (2022 年 7 月 27 日~11 月 14 日)

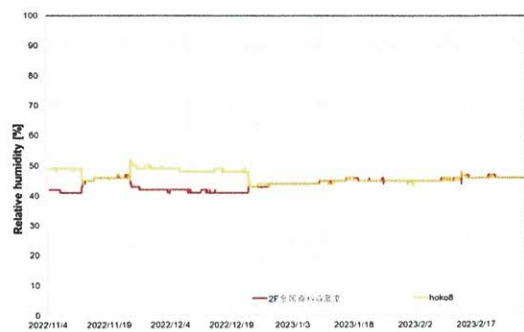


図 5-27 金属資料室の相対湿度 (2022 年 11 月 14 日~2023 年 3 月 2 日)

(3)絶対湿度 (図 5-28~5-29) :

- ・ 收藏室 : 7 月~8 月  $11 \pm 0.5 \text{g/kg}$  → 9 月  $10 \text{g/kg}$  から 1 月  $4 \text{g/kg}$  まで低下 → 3 月に  $4.5 \pm 0.3 \text{g/kg}$  まで増加. これは外気絶対湿度を平滑化した変化となっている.
- ・ 收藏容器 : hoko8 (コンテナ) の絶対湿度は資料室のそれとほぼ等しく, 緩和されていない.

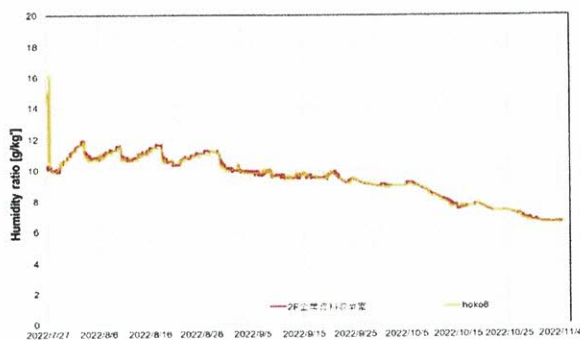


図 5-28 金属資料室の絶対湿度 (2022 年 7 月 27 日~11 月 14 日)

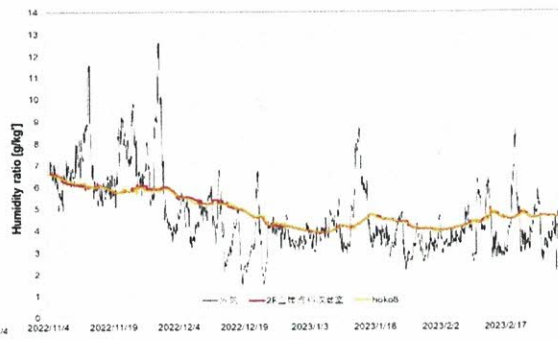


図 5-29 金属資料室の絶対湿度 (2022 年 11 月 14 日~2023 年 3 月 2 日)

(4)解析

- ・ 除湿機による收藏室の平均的 (全体的) な加熱・除湿と低温排気 (吹き流しによる確認済



み) による収蔵ケースの局所冷房を考慮した解析とする必要がある。

- ・3F 特別収蔵庫における収蔵ケース内温湿度の外壁からの距離による違い、(後述する) 考古展示室の窓近くと室奥展示ケース内の温湿度の違いなども、程度の違いはあれ空間内温湿度分布の非一様性によるものと推定される。

(5)まとめ・留意点

- ・7月末～8月, 11～12月の大きな温湿度変動は除湿機運転の on-offによるものだろう。
- ・塩ビ製の収蔵ケースは木製収蔵ケースと比べて温湿度調整能力は低いと言えるが, hoko8(コンテナ)は温湿度を調整する能力が殆ど無い。他のコンテナと比較して緩和作用が小さいのは, 気密性が低いため(側面に開口)であろう。

5.2.5 考古資料室

(1)温度 (図 5-30～5-32) :

- ・収蔵室 (図 5-30) :

8月  $30 \pm 3^{\circ}\text{C}$  → 9月  $29 \pm 1^{\circ}\text{C}$  の後低下 → 1月  $10^{\circ}\text{C}$  → 3月まで  $10.5 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$   
 激しい変動は見られず, ほぼ外気温変動に追随している。

- ・収蔵容器 (図 5-31, 5-32) : hoko9(木箱), hoko10(コンテナ)の温度は収蔵室温度とほぼ等しい ( $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ )。

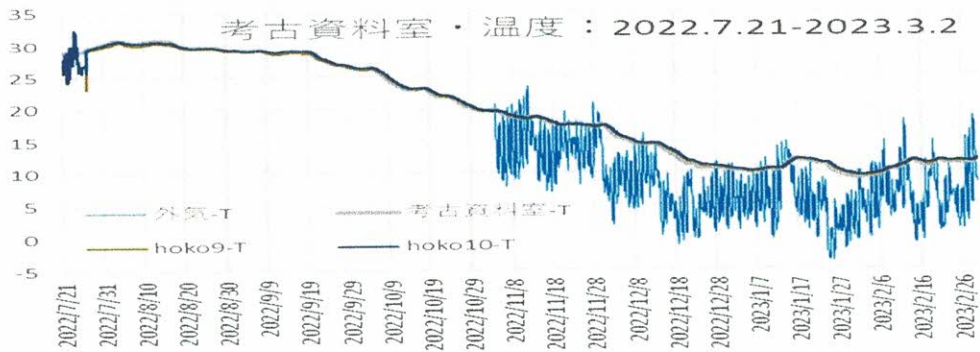


図 5-30 考古資料室の温度 (2022 年 7 月 27 日～2023 年 3 月 2 日)

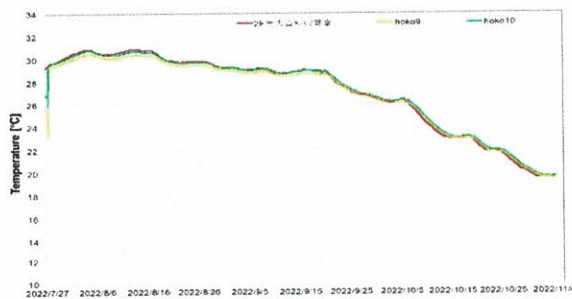


図 5-31 考古資料室の温度 (2022 年 7 月 27 日～11 月 14 日)

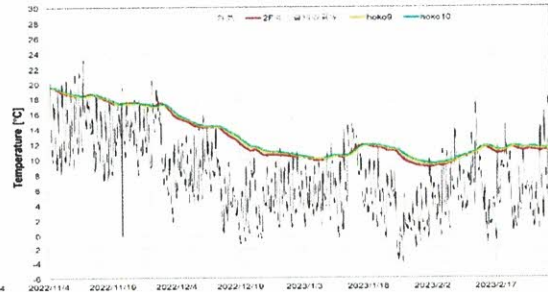


図 5-32 考古資料室の温度 (2022 年 11 月 14 日～2023 年 3 月 2 日)

(2)相対湿度 (図 5-33~5-35) :

・ 収蔵室 (図 5-33) :

8月  $47 \pm 2\%$  から徐々に低下→11月  $40 \pm 1\%$  →3月まで  $39 \pm 3\%$  一定

- ・ 収蔵容器 (図 5-34, 5-35) : hoko9(木箱)は収蔵室とほぼ等しい~1%低く, hoko10(コンテナ)は収蔵室より 2%程度高い値で並行して変化している.

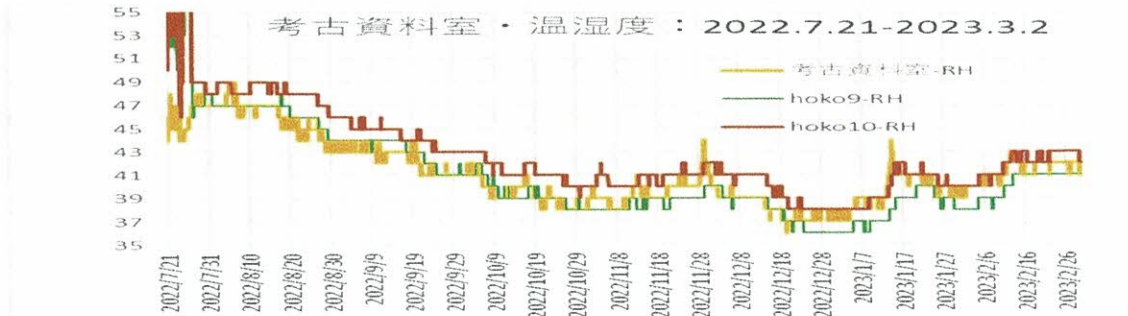


図 5-33 考古資料室の相対湿度 (2022年7月27日~2023年3月2日)

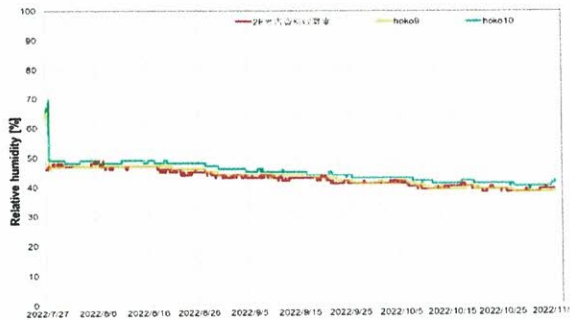


図 5-34 考古資料室の相対湿度 (2022年7月27日~11月14日)

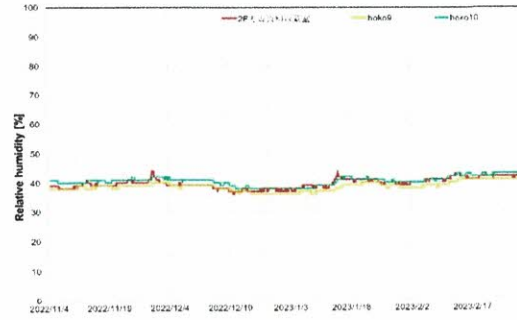


図 5-35 考古資料室の相対湿度 (2022年11月14日~2023年3月2日)

(3)絶対湿度 (図 5-36, 5-37) :

- ・ 収蔵室 : 8月  $13.5 \pm 0.3 \text{g/kg}$  から低下→1月  $3 \text{g/kg}$  →1月以降は  $3.3 \pm 0.4 \text{g/kg}$ . 外気に追従除湿機を運転しているため, 外気の絶対湿度よりかなり低い値となっている.

- ・ 収蔵容器 : hoko9(木箱)の絶対湿度は収蔵室とほぼ等しい ( $\pm 0.2 \text{g/kg}$ ). hoko10(コンテナ)の絶対湿度は収蔵室のそれより  $0.6 \text{g/kg}$  程度高く, 並行して変化する.

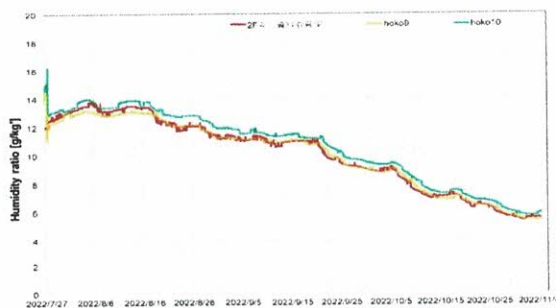


図 5-36 考古資料室の絶対湿度 (2022年7月27日~11月14日)

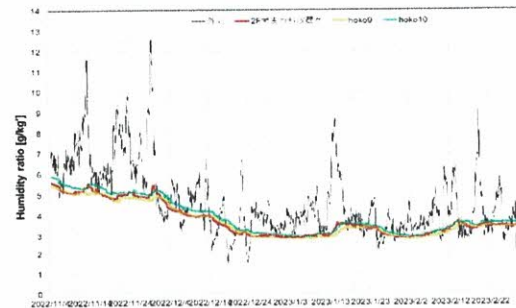


図 5-37 考古資料室の絶対湿度 (2022年11月14日~2023年3月2日)

#### (4)解析

- ・特に解析する必要は無いか？

#### (5)まとめ・留意点

- ・考古資料室の短周期の変動が小さいためか、収蔵容器の緩和効果は見られない。

### 5.2.6 考古研究展示室

#### (1)温度 (図 5-38～5-40) :

- ・収蔵室(hoko11) (図 5-38) :

7～9月中旬は  $28 \pm 1^\circ\text{C}$  で一定→1月  $10^\circ\text{C}$  に低下→1月以降  $10 \pm 2^\circ\text{C}$

- ・収蔵容器 : hoko12(視込みケース)内温度は、7月末～9月は収蔵室より  $0.6^\circ\text{C}$  程度低く、それ以降は  $0.5^\circ\text{C}$  程度高く並行して変化. 変動幅は室の半分程度



図 5-38 考古研究展示室の温度 (2022年7月27日～2023年3月2日)

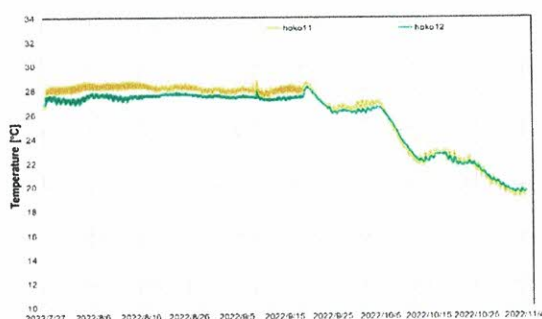


図 5-39 考古研究展示室の温度 (2022年7月27日～11月14日)

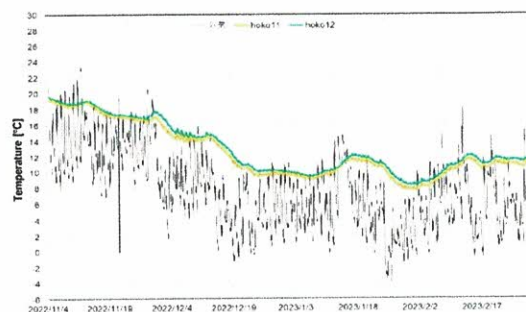


図 5-40 考古研究展示室の温度 (2022年11月14日～2023年3月2日)

#### (2)相対湿度 (図 5-41～5-43) :

- ・収蔵室 (図 5-41) : 7月末～8月中旬  $45 \pm 5\%$  → 8月中旬～10月中旬  $50 \pm 7\%$  → 以降は変動幅  $45 \pm 10\%$  に増加
- ・収蔵容器 : hoko12(視込みケース)内 RH は収蔵室 RH より変動幅は小さく、8～11月は  $50 \pm 2\%$ , 12～3月は  $43 \pm 3\%$



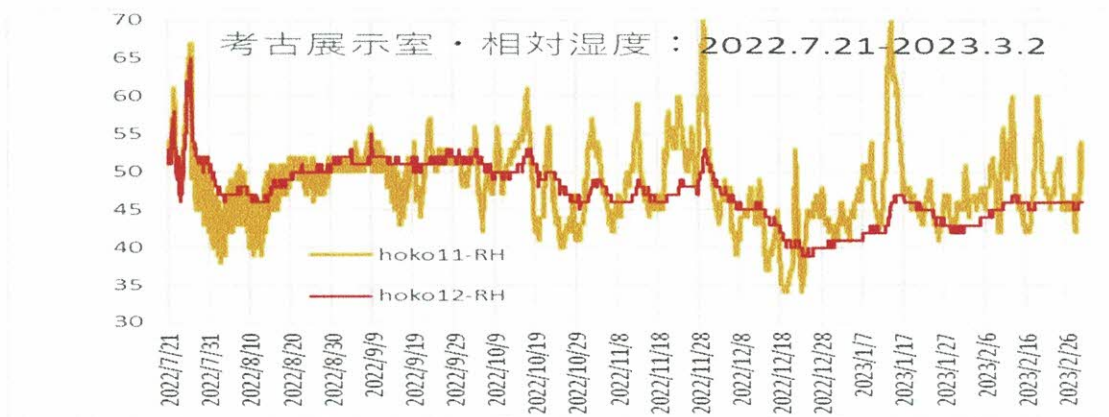


図 5-41 考古研究展示室の相対湿度 (2022 年 7 月 27 日～2023 年 3 月 2 日)

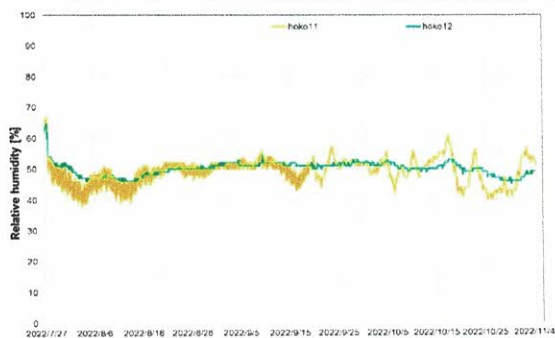


図 5-42 考古研究展示室の相対湿度 (2022 年 7 月 27 日～11 月 14 日)

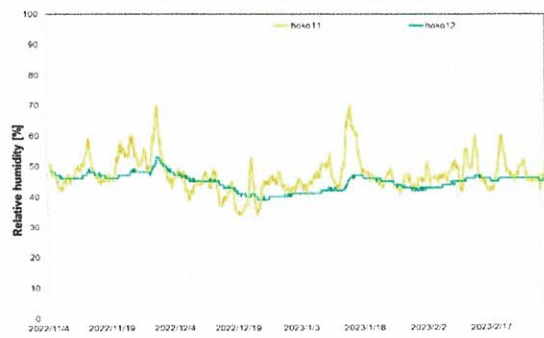


図 5-43 考古研究展示室の相対湿度 (2022 年 11 月 14 日～2023 年 3 月 2 日)

(3)絶対湿度 (図 5-44, 5-45) :

- ・ 収蔵室：8 月中旬まで  $11 \pm 1.2\text{g/kg}$ , 8 月中旬～9 月中旬  $12.3 \pm 0.4\text{g/kg}$ , それ以降低下し 12 月に  $3\text{g/kg}$  となる。1 月～3 月は  $4 \pm 1.0\text{g/kg}$  となる。
- ・ 収蔵容器：hoko12 (覗き込みケース) 絶対湿度は, 7 月末～8 月中旬  $11 \pm 0.3\text{g/kg}$ , 8～9 月  $12 \pm 0.1\text{g/kg}$ , それ以降低下し 12 月に  $3\text{g/kg}$ , 1 月～3 月は  $3.5 \pm 0.5\text{g/kg}$  となる。変動幅は収蔵室のそれよりかなり小さい。収蔵室, 覗き込みケース内とも外気絶対湿度を平滑化した変化となっている。

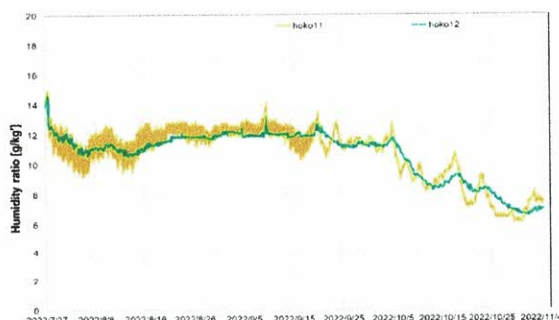


図 5-44 考古研究展示室の絶対湿度 (2022 年 7 月 27 日～11 月 14 日)

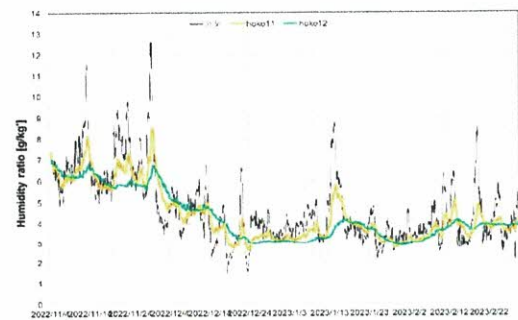


図 5-45 考古研究展示室の絶対湿度 (2022 年 11 月 14 日～2023 年 3 月 2 日)

#### (4)解析

- ・ガラスケースが湿度をそれなりに緩和しているのか、収蔵室湿度（窓際の湿度）の変動が収蔵室の調湿作用で緩和されているのか、先ずケース近傍の温湿度を測定し確認したうえで解析モデルを作成する必要がある。
- ・窓際の温湿度は、外気温湿度がそれなりに緩和された結果となっている。外壁を中心とする室全体としての熱容量、湿気容量が効いているのだろう。

#### (5)まとめ・留意点

- ・収蔵容器内の湿度は、収蔵室（考古研究展示室）の湿度変動がかなり抑制された結果となっている。ただ、温度変動抑制効果は殆ど無い。

### 5.2.7 ムラージュ室

#### (1)温度（図 5-46～5-48）：

- ・収蔵室：  
8月上旬 28℃から徐々に減少→1月中旬 12℃→3月まで 12℃前後で一定  
8月の±2℃程度の大きな変動はエアコンの on/off による。
- ・収蔵容器：hoko7(コンテナ)温度はムラージュ室とほぼ等しい。（むしろ振幅は大きい？）

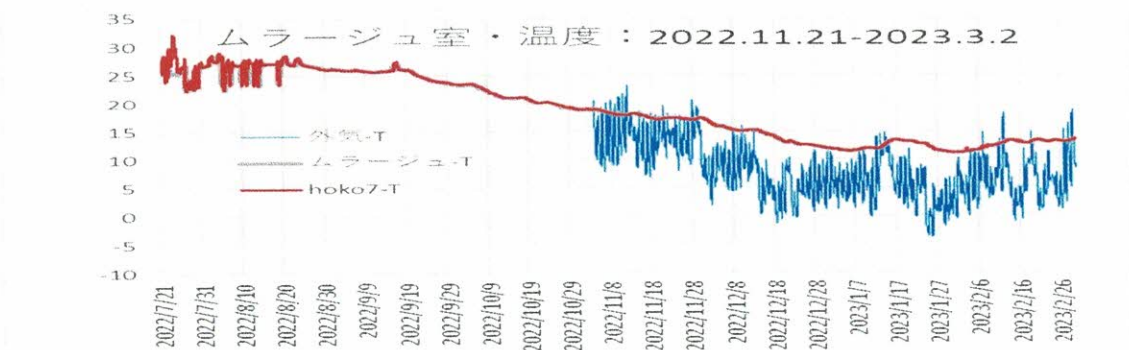


図 5-46 ムラージュ室の温度（2022年7月27日～2023年3月2日）

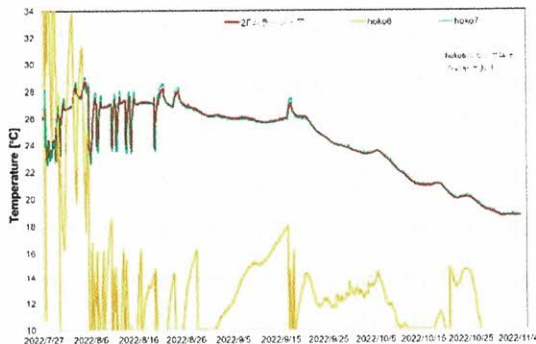


図 5-47 ムラージュ室の温度（2022年7月27日～11月14日）

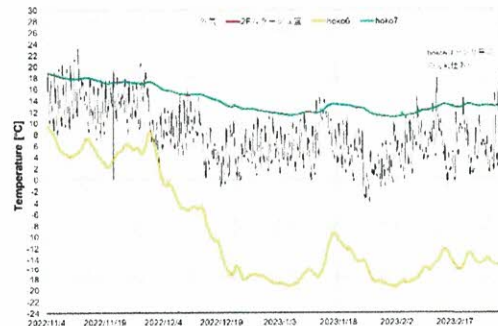


図 5-48 ムラージュ室の温度（2022年11月14日～2023年3月2日）

(2)相対湿度 (図 5-49~5-51) :

- ・ 収蔵室 : 7 月末 75%から徐々に低下→8 月末 55%→11 月まで 58%前後一定→12 月に 52%に低下→3 月まで 52%ほぼ一定. 7~8 月は±5%程度で大きく変動している. 7 月 26 日に窓の気密化を行ったため, その後エアコン運転による温湿度の変化が大きくなったと考えられる. また, 7 月末から湿度が徐々に低下したことも, エアコンによる除湿の影響が窓気密化により大きくなったためと推定される (2 章参照).
- ・ 収蔵容器 : hoko7(コンテナ)内 RH は収蔵室の RH が緩和された形で相似的に変化. 9~11 月 55%で一定→12 月に 47%に低下→3 月まで 47%一定



図 5-49 ムラージュ室の相対湿度 (2022 年 7 月 27 日~2023 年 3 月 2 日)

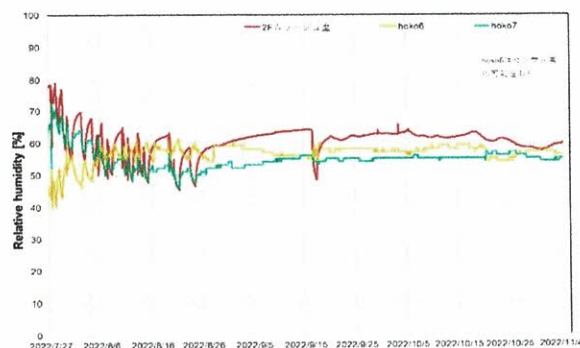


図 5-50 ムラージュ室の相対湿度 (2022 年 7 月 27 日~11 月 14 日)

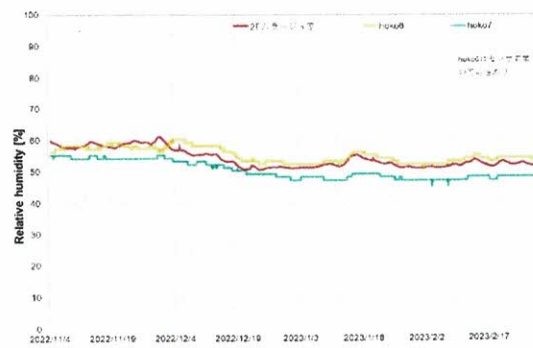


図 5-51 ムラージュ室の相対湿度 (2022 年 11 月 14 日~2023 年 3 月 2 日)

(3)絶対湿度 (図 5-52, 5-53) :

- ・ 収蔵室 : 7 月末 15g/kg から低下→8 月平均 12.5g/kg±4g/kg→9 月 13g/kg 一定→9 月末~12 月に 4.5g/kg まで減少→3 月まで 4.7g/kg で一定. ほぼ外気絶対湿度変動に追随
- ・ 収蔵容器 : hoko7(コンテナ)内の絶対湿度は, 緩和されて収蔵室の絶対湿度に追随する. ただ, 収蔵室絶対湿度より夏季は 2g/kg 程度, 冬季は 0.5g/kg 程度低い. 収蔵室の絶対湿度に分布があるためと考えられるが, 検討が必要である (コンテナ近くでの湿度測定).



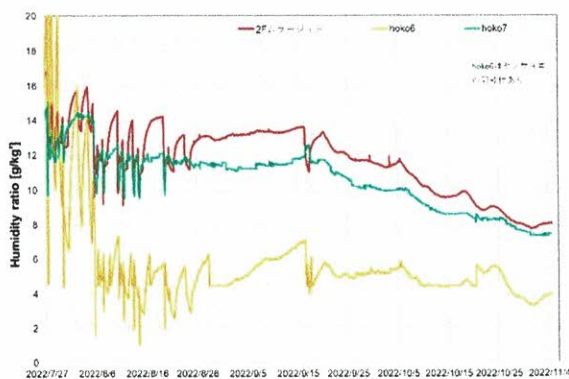


図 5-52 ムラージュ室の絶対湿度(2022年 7月27日~11月14日)

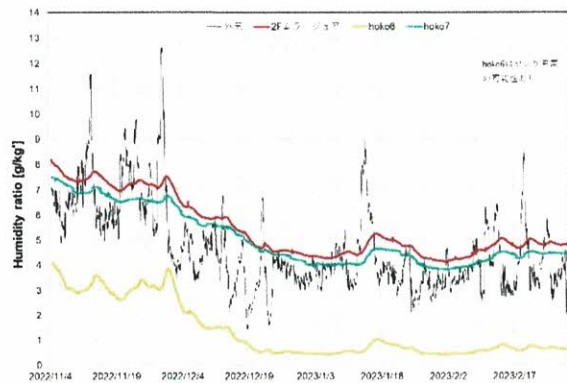


図 5-53 ムラージュ室の絶対湿度(2022年 11月14日~2023年3月2日)

(4)解析

- ・2章で検討したように、窓の気密化とエアコン運転が温湿度変化に及ぼす影響は大きいいため、それを考慮した解析が必要である。窓気密化後(2022年8月5日~14日)の収蔵容器の温湿度変化(エアコン運転時)を注に示す。
- ・建物周辺気流と窓の気密化、廊下トイレ両側階段室の気流の影響については、CFD解析が必要である。

(5)まとめ・留意点

- ・7月末~8月の(前年度には見られなかった)大きな温湿度変動は、エアコン運転の on-offの影響が窓の気密化により増加したためである。
- ・hoko7(コンテナ)内の湿度は収蔵室の値が緩和された値となるが、収蔵室の値より低い。これは、収蔵室内に温湿度の分布があるためと考えられるが、ムラージュ(の包装紙?)の吸湿による可能性についても検討する。

注) 窓気密化後(2022年8月5日~14日)の収蔵容器の温湿度変化(エアコン運転時)

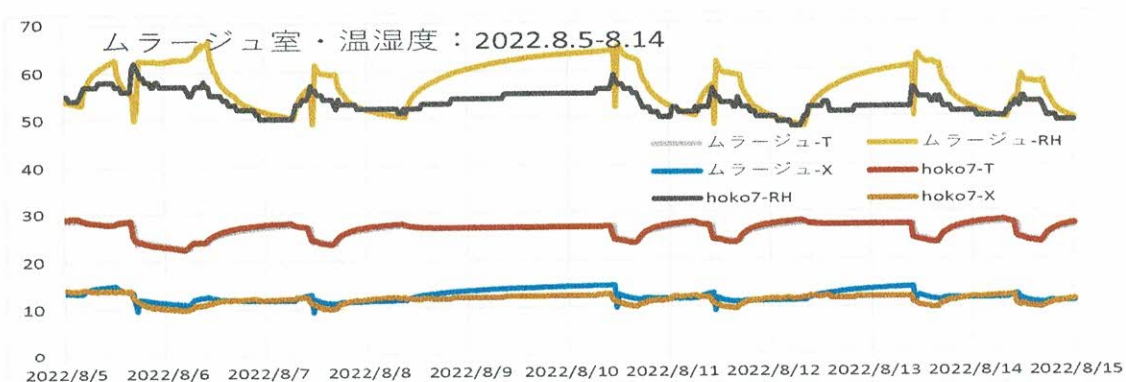


図 A-5-1 窓気密化後の収蔵容器内の温湿度変化(2022年8月5日~8月14日)

- ・hoko7の相対湿度変化については、そのhoko7の温度変化との対応を見ると妥当と考えられる。

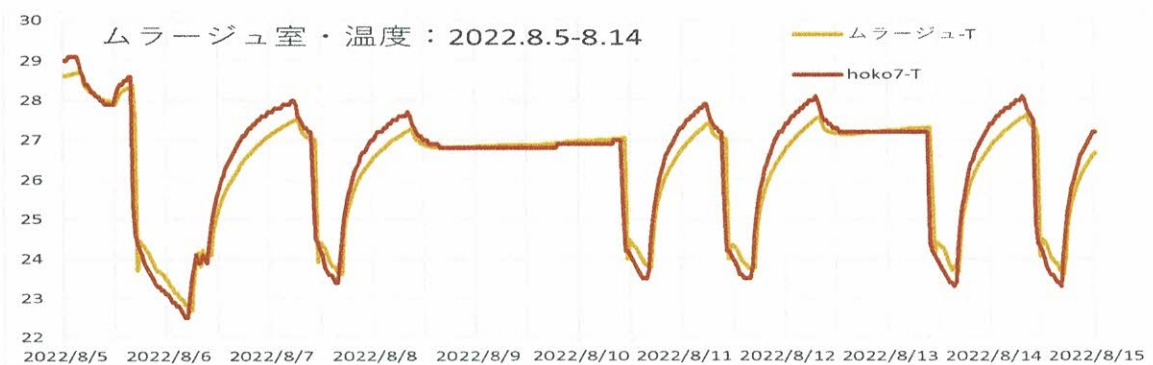


図 A-5-2 窓気密化後の収蔵室・収蔵容器内の温度変化（2022年8月5日～8月14日）



図 A-5-3 窓気密化後の収蔵室・収蔵容器内の相対湿度変化（2022年8月5日～8月14日）



図 A-5-4 窓気密化後の収蔵室・収蔵容器内の絶対湿度変化（2022年8月5日～8月14日）

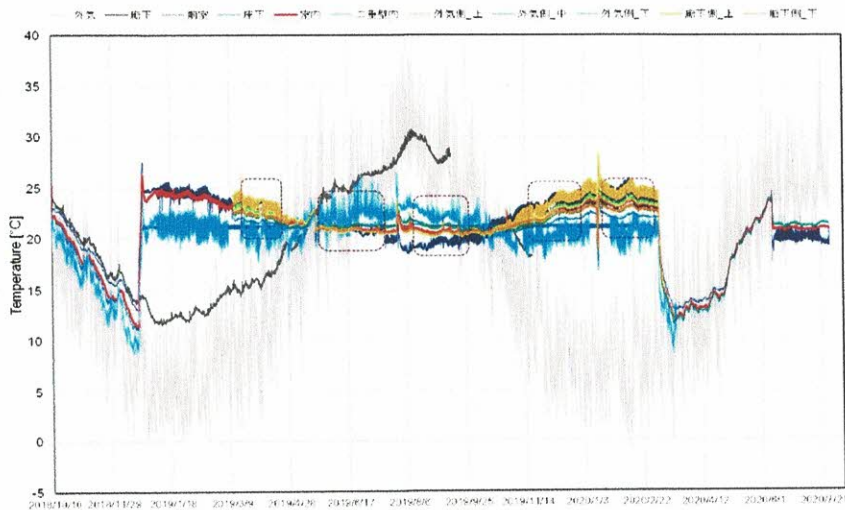
### 5.3 第5章のまとめ

- (1) 2022年7月27日～2023年3月2日の温湿度を測定した。
- (2) 収納箱の温度変化幅は収蔵室のそれとほぼ等しいこと、収蔵ケースの湿度変動緩和能力は長周期については小さいが、短周期変動についてはかなり大きいこと、エアコンや除湿機からの冷温風が収納箱に直接当たる場合には、その影響が無視できない場合があることなどが明らかにされた。
- (3) 熱水分移動解析を行い、これらの測定結果の再現を行うことにより収納ケースの調湿・

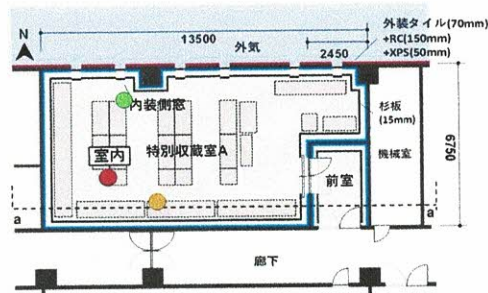
調温効果を明らかにした。木製の収納箱の湿度変動緩和能力は大きいですが、プラスチックケースでは小さいこと、従って、プラスチックケースではケース内収納物の吸放湿性が収納箱内の湿度変動に大きく影響すること、収納物としての金属遺物も収納箱内湿度にそれなりに影響すること、などを明らかにした。

**注) 3F 特別収蔵室内の温度**

3階特別収蔵室まわりの温度（2018年秋～2020年夏、室内の分布は2019年3月～2020年2月まで計測）を、測定点の平面位置とともに下図に示す。冬季は外気側の温度が代表点よりも低くなり、夏季は高くなる傾向がある。



**A-1 3F 特別収蔵室内の温度 (2018年秋～2020年夏)**



**A-2 3F 特別収蔵室内の温度測定位置**