

第3章 収蔵庫の空気質環境の実態調査

3.1 調査・測定内容

RC 造建物の地下に位置する文化財収蔵庫で、室内が高湿で文化財へのカビ付着が問題となっている収蔵室を対象とした。設置されたデシカント除湿機は、室内の空気に含まれる湿分をデシカントに吸着させ除湿し室内へ給気している。収蔵室とその周りの温湿度分布、微生物分布を調べ、これまで収蔵庫内の熱水分・空気質の季節変動などの実態を明らかにするとともに、デシカント式除湿機の挙動を調べてきた。

また、除湿機が運転された収蔵室内の空気質を調べるため、エアーサンプラーにより収蔵庫や非居住空間や隣室、外気のカビの菌数の測定と採取した菌を培養後に DNA シーケンスを行うことでカビ菌数の挙動やカビの種類の違いについて調査を行ってきた。

2024 年度は、地下保管庫にある文化財のカビクリーニングを実施するため、11 月から 1 月まで、収蔵物は一旦保管庫から取り出され、部屋についてもカビクリーニングが実施され、新たな棚が設置された後に、収蔵物が戻された。

上記を踏まえて、本研究ではさらに季節を変えたエアーサンプラーによる計測を行い、季節挙動を調べることと、収蔵庫に保管されている文化財のカビクリーニングが実施された前後にエアーサンプラーにおける計測を行い、収蔵物のクリーニングの影響を検討することを目的とする。

具体的には、昨年度は 2023 年 3 月と 8 月に実施したエアーサンプラーによるカビの菌数測定を、2024 年 8 月、11 月 2025 年 2 月に実施し、2023 年 8 月、11 月の採取した菌についても DNA シーケンスを行い、各空間のカビ種の同定を行い、場所ごと、季節ごとの菌数の比較を行った。

3.2 地下収蔵庫の概要

地下収蔵庫は、竣工してからおよそ 20 年経過する鉄筋コンクリート造の建築物の地下に位置し、図 3-1 に示すような南側と西側の壁が地盤に接する文化財収蔵庫である。室内が高湿で文化財へのカビ付着が問題となり除湿対策が必要となったため、2021 年 6 月に改善対策としてデシカント式除湿機を導入した。本デシカント除湿機は、図 3-2 に示すように室内から吸込んだ空気に含まれる湿分をデシカントに吸着させ除湿し室内へ給気する。尚、除湿した空気の一部はデシカントの再生側に使用され、内蔵された電気ヒーターにより加温しデシカントを再生し脱着水分はホースを通じ外気に気体で排湿する仕組みである。これにより対象室内は陰圧になる。現在、常時デシカント式除湿機を運転している。

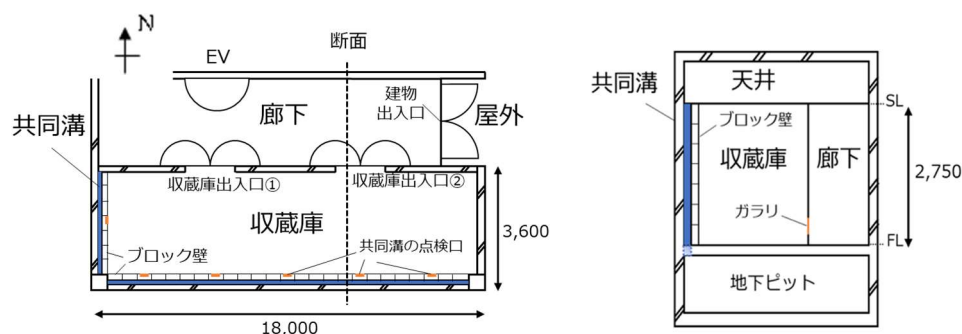


図 3-1 収蔵庫平面図（左）と断面図（右）



図 3-2 デシカント除湿機外観と除湿の仕組み

3.3 収蔵庫の温湿度

3.3.1 測定概要と設置機器

収蔵庫内の環境の変化を検証するために温湿度の計測を以下のとおり実施した。温湿度計測には温湿度センサーSensirion 社製 SHT75 を使用した。温湿度センサーは図 3-3 に示す位置に設置した。図の右端のオレンジの枠がデシカント除湿機であり二つ設置している。これら除湿機に近いほうから設置位置 A1～C3(廊下側), B1～D2(共同溝側)とし、平面に 11 箇所、高さ方向に 6 点 (FL+100mm, FL+600mm, FL+1100mm, FL+1600mm, FL+2100mm, SL-100mm; FL は床面, SL は天井面) と共同溝, 廊下, 天井内の合計 69 点に設置し, 1 分間隔で記録した。なお, 収蔵庫の収蔵物のカビクリーニングのため, 計測システムは 2024 年 10 月 2 日で一旦終了した。収蔵物がカビクリーニング後に収蔵庫に新しい棚の設置と併せて戻ってきた。一旦それらが終了した後の 2025 年 1 月 30 日から収蔵庫内の温湿度計測を測定点を減らして温湿度データロガー (Onset 社 HOBO MX1101) を再設置した (図 3-4)。また, このタイミングで共同溝の排水口下からの湿気の上昇を懸念して, 3 箇所の共同の排水口をパテで埋めた。

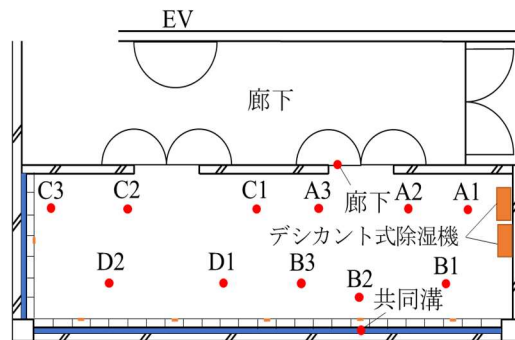


図 3-3 温湿度センサー設置状況 (2024 年 10 月 2 日まで)



図 3-4 温湿度データロガー設置状況 (2025 年 1 月 30 日～)

3.3.2 収蔵庫内の温湿度の測定結果と考察

図 3-5, 3-6, 3-7 にそれぞれ収蔵庫内の温度, 相対湿度, 絶対湿度の変化を示す。

図 3-5 より, 昨年度同様収蔵庫の温度は外気の変動からやや遅れて上昇し, 変化していることが分かる。

図 3-6 より, 昨年度同様収蔵庫の相対湿度は夏期には 60%を少し上回るが, それ以外は 60%を下回っている。収蔵庫内では, C2 の床上 100mm が梅雨期から夏季にかけて最も高い。一方, 共同溝は, 2024 年 4 月から 6 月初旬まで 90%以上あったが, それ以降低下し 80%台まで下がり, 9 月末には 90%以上にもどりやや変動が大きくなっている。

図 3-7 より, 収蔵庫の絶対湿度は夏期に高くなり 9 月からやや低くなっている。一方, 共同溝の絶対湿度は 2024 年 6 月から 9 月にかけて廊下の値に近くなるが, それ以外の時期は廊下より高い値を維持している。

昨年度同様に収蔵庫内はデシカント除湿機により高湿が抑制されているが, 共同溝はやや高い値が維持される傾向にある。

収蔵物がカビクリーニングされた後の収蔵庫の温湿度についても, 分析を現在進めている。

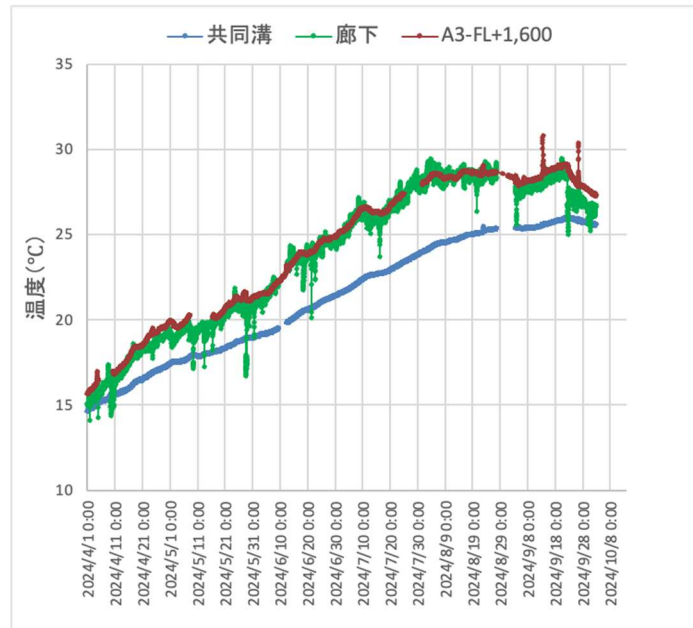


図 3-5 収蔵庫内の温度変動 (2024/4/1-2024/10/25)

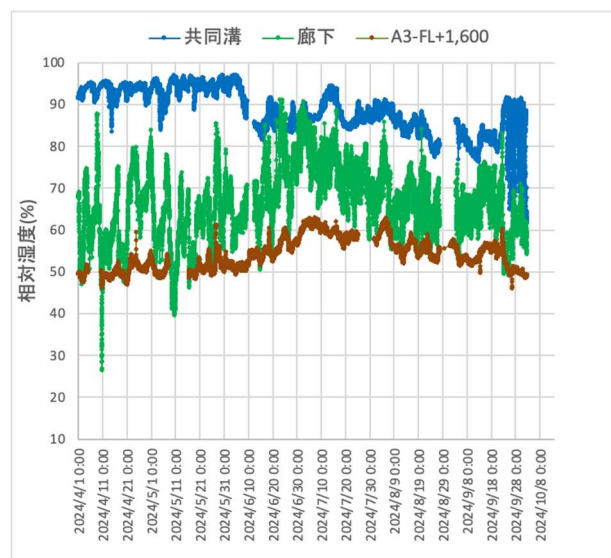


図 3-6 収蔵庫内の相対湿度変動 (2024/4/1-2024/10/2)

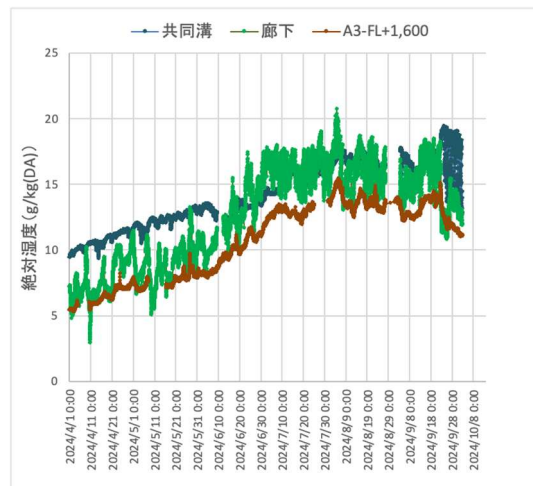


図 3-7 収蔵庫内の絶対湿度変動 (2024/4/1-2024/10/2)

3.4 収蔵庫でのカビサンプリング

3.4.1 カビサンプリングの概要

2024 年 8 月 22 日, 同年 11 月 18 日, 2025 年 2 月 18 日に地下収蔵庫内でカビサンプリングを実施した。収蔵庫内のサンプリング箇所とサンプリング条件を 2023 年度の測定条件と合わせて図 3-7, 表 3-1 に示す。

培地は DG18 培地を使用し, エアーサンプラーの流量は, 表 3-1 に示す通りとした。

サンプリング後の DG18 培地を温度 23°C 一定のインキュベータ内に設置し, 目視での観察を行った。約 1 週間後, 培地表面にコロニーが形成された後, 写真を撮影しコロニー数を計数した。

コロニー数の計数後, それぞれの培地から一部のコロニーを採取し DNA シーケンスを依頼し実施した。採取したコロニーはそれぞれの培地に発生したコロニーの中で, 目視で最も多い種類を中心に採取した。サンプル採取の際は, 安全キャビネットの中で, 滅菌されたピンセットを用いてコロニーの一部を取り, DNA シーケンス用のチューブに入れ, 冷凍状態にて依頼先へ送付した。DNA シーケンスは, イルミナ社の Miseq を用い ITS1 領域の塩基配列を対象としたアンプリコンシーケンス解析を実施し, 種までの同定を行った。

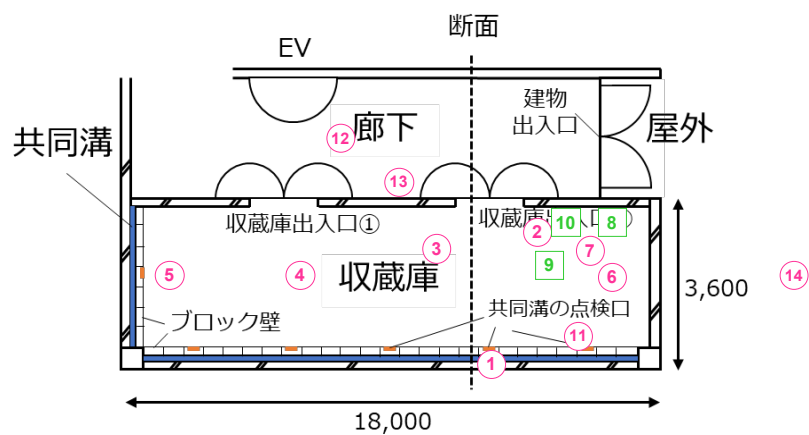


図 3-8 サンプルング箇所

表 3-1 エアーサンプラーでの採取場所とサンプリング条件

採取箇所	総流量 (2023 年 3 月)	総流量 (2023 年 8 月)	総流量 (2024 年 8 月)	総流量 (2024 年 11 月)	総流量 (2025 年 2 月)
1：収蔵庫の共同溝	50L,100L	50L	100L	50L	100L
2：収蔵庫の天井裏	50L,100L	100L, 200L	100L	50L	100L
3：収蔵庫内 b	100L	100L	100L	50L	100L
4：収蔵庫内 c	100L	100L	100L	50L	100L
5：収蔵庫内 d	100L	100L	100L	50L	100L
6：収蔵庫内 e (棚の上)	100L	100L	100L	50L	100L
7：収蔵庫内 木枠の上 (中間くらいの高さ)	100L	100L	100L	50L	100L
8：棚の中 A (一番下の 段) 収蔵物：木の板	100L	100L	100L	50L	100L
9：棚の中 B (一番上の 段) 収蔵物：耐火煉瓦	100L	100L	100L	50L	100L
10：棚の中 C (下から 2 段目) 収蔵物：写真の原 盤 (ガラス)	100L	100L	100L	50L	100L
11：収蔵庫内	100L	100L	100L	50L	100L
12：廊下の天井裏	100L	100L,200L	100L	50L	100L
13：廊下	100L	100L,200L	100L	50L	100L
14：屋外 (地下 1 階)	100L	100L	100L	50L	100L

3.2 収蔵庫でのカビサンプリングの結果と考察

図 3-9 に 2023 年 3 月、8 月、2024 年 8 月、11 月、2025 年 2 月にエアースAMPLER で採取したカビの菌数の比較を示す。

図 3-9(b) より屋外の菌数は 8 月に多く、それ以外の時期に下がり、2 月は最も少なかった。廊下の菌数も同様に傾向にあった。図 3-9(a) より収蔵庫内の菌数は、他の季節に比べ 8 月にやや減る傾向があり、必ずしも屋外廊下の挙動とは一致していない。また、収蔵庫の収蔵物のカビクリーニング後の 2 月も菌数はややバラツキが大きいが少ない訳ではない。収蔵庫全体の平均でみると夏にやや菌数が下がる傾向が確認できる。また、収蔵庫全体の菌数の平均値は、カビクリーニング前の 2024 年 11 月より、カビクリーニング後の 2025 年 2 月の方が菌数は若干下がる程度であった。

図 3-9(c) より収蔵庫の棚内の菌数は夏に下がる傾向が確認できた。また棚内の菌数は、カビクリーニング前の 2024 年 11 月より、カビクリーニング後の 2025 年 2 月の方が大きく減少した。これは棚内や収蔵物のクリーニングによるものの可能性が考えられる。

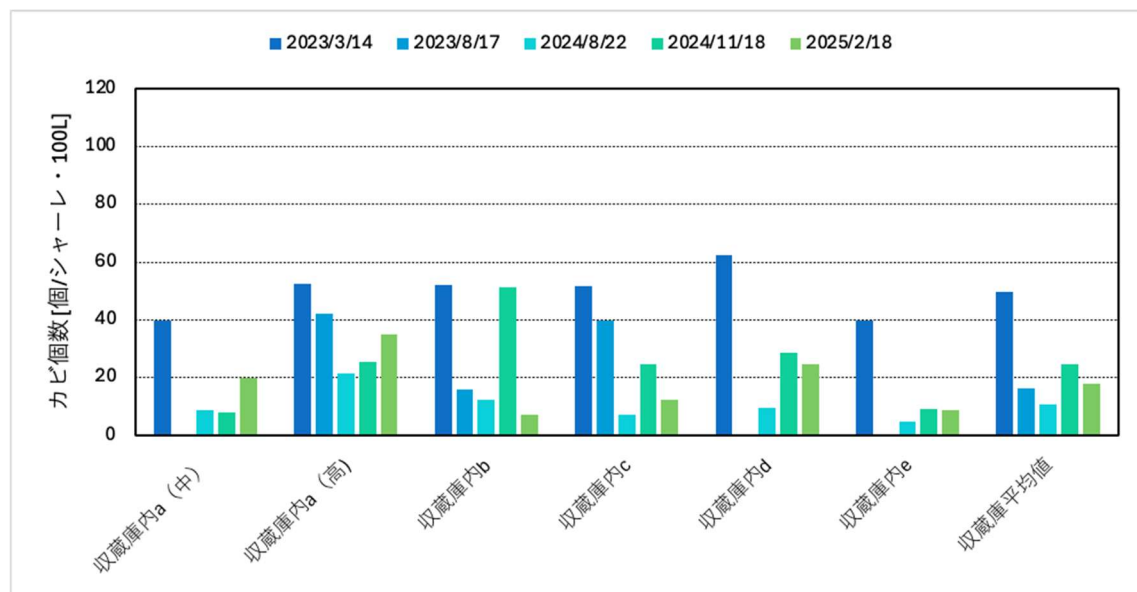


図 3-9(a) 収蔵庫のカビの菌数の比較 (1)

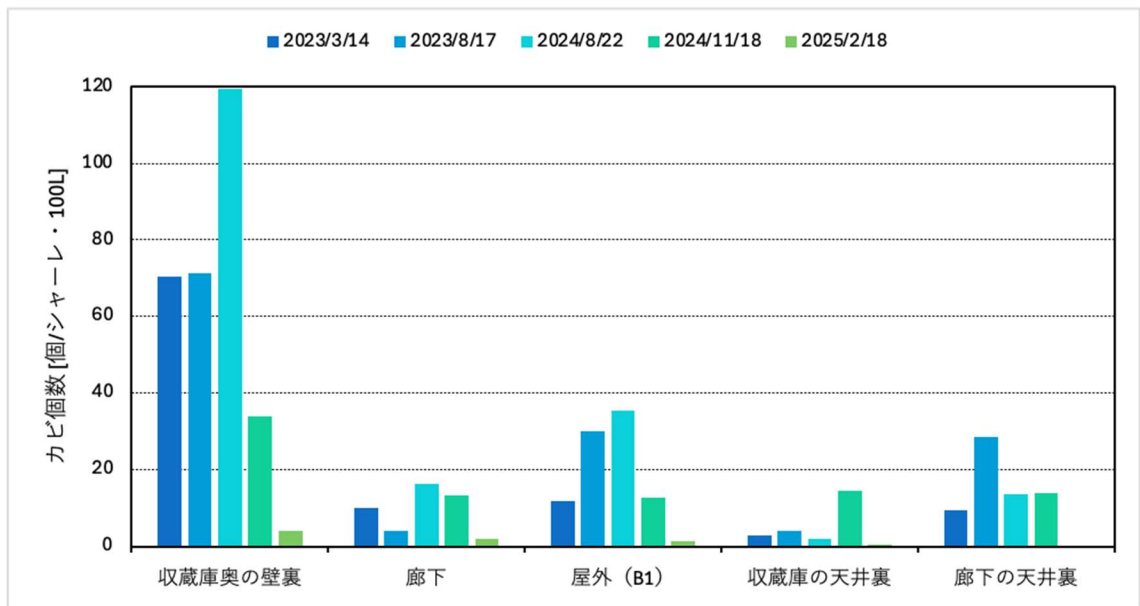


図 3-9(b) 収蔵庫のカビの菌数の比較（2）

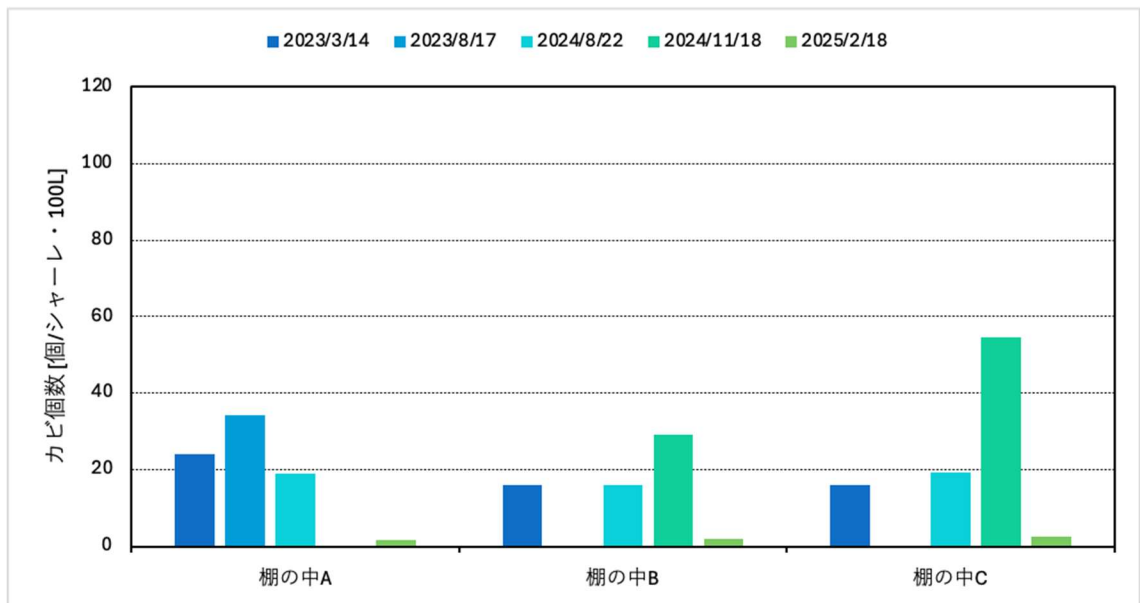


図 3-9(c) 収蔵庫のカビの菌数の比較（3）

表 3-2, 表 3-3 にそれぞれ収蔵庫内, 廊下と外気のカビの同定結果を示す. 表中で界, 科, 属, 種に記載しているものは記載しているものまで同定されたものを表している.

表より, DNA 解析によって *Aspergillus* 属, *Cladosporium* 属, *Penicillium* 属のカビが多く同定された. これらのカビは自然環境中に一般的に存在するカビである. それぞれの特徴を以下に示す¹⁾.

Aspergillus 属; 自然界に普遍的に分布するカビであり, やや乾燥している環境でも長時間生育できる.

Cladosporium 属；空中に多く，湿度の高い場所を好む．

Penicillium 属；Aspergillus 属と同様に自然界に普遍的に分布するカビであり，中程度の湿度を好む．

表より，収蔵庫内は棚内を含めて Aspergillus 属，Cladosporium 属，Penicillium 属が同定されており，廊下では Aspergillus 属，Cladosporium 属，Penicillium が同定されている．収蔵庫内の壁裏空気層でも，同様に Aspergillus 属，Cladosporium 属が同定されている．昨年度は，共同溝では，Sistotrema brinkmannii，Trametes versicolor という腐朽菌が 2 種類も同定されていたが，それ以降では，特に発見されていない．

特に Aspergillus 属は共通の種が屋外、廊下、収蔵庫、壁裏空間で同定されており、空気等が繋がっていることを考えると空気が流通して影響を及ぼしていると考えられる。Penicillium 属は室内と廊下、屋外で共通して発見され，壁裏空気層で発見されなかったことから，この属のカビの由来は屋外と廊下である可能性が考えられる。Cladosporium 属は共通の種が屋外、廊下収蔵庫で同定されているが，壁裏空気層で発見されなかったことから，この属のカビの由来も主に屋外と廊下である可能性が考えられる。

表 3-2 収蔵庫内のカビの同定結果（水色：Aspergillus，緑：Cladosporium，ピンク：Penicillium）

	壁裏空気層			収蔵庫内			廊下			屋外(B1)			天井裏	廊下の天井裏
	2023/3/14	2024/8/22	2024/11/18	2023/3/14	2024/8/22	2024/11/18	2023/3/14	2024/8/22	2024/11/18	2023/3/14	2024/8/22	2024/11/18	2023/3/14	2023/3/14
Apiospora hydei	1													
Bjerkandera adusta										1				
Acremonium persicinum					1									
Aspergillus alabamensis														1
Aspergillus welwitschiae								1						1
Aspergillus flavus									1					
Aspergillus ochraceus									1	1				1
Aspergillus penicillioides	1			1										
Aspergillus piperis		1		1	1			1		1				
Aspergillus protuberus	1	1	1	1	1	1	1		1	1			1	1
Aspergillus ruber				1										
Aspergillus sclerotiorum	1													
Aspergillus tamarii	1			1			1						1	1
Aspergillus westerdijkiae	1													
Aureobasidium thailandense														1
Chrysosporium sp	1		1			1	1							
Chuppomyces handelii									1					
Cladosporium cladosporioides					1	1		1	1			1		
Cladosporium sphaerospermum	1						1							1
Curviclavula sp									1					
Curvularia tsudae										1				
Dasyscyphella nivea													1	
Elongaticollum hedychii						1								
Hansfordia pruni						1								
Hypholoma sp						1								
Neostagonospora elegiae										1				
Paecilomyces maximus						1								
Penicillium sp														
Penicillium chermesinum					1			1				1		
Penicillium cainii									1			1		
Penicillium citrinum				1	1	1	1							
Penicillium decumbens					1	1								
Penicillium italicum						1								
Penicillium raperi						1								
Penicillium steckii						1								
Sistotrema brinkmannii	1													
Thysanophora sp									1					
Torula fici						1								
Trametes hirsuta								1						
Trametes ochracea									1				1	
Trametes versicolor	1													
Trichoderma pseudokoningii														
Schizophyllum sp														1
Strobilurus sp														

枠囲み
 水 壁裏—収蔵庫内
 青 壁裏—収蔵庫内—廊下
 赤 壁裏—収蔵庫内—廊下—屋外
 オレンジ 収蔵庫—廊下—屋外
 黄色 収蔵庫—廊下
 黄色 収蔵庫—屋外

3.5 第3章のまとめ

除湿機稼働により、昨年度同様に収蔵室の相対湿度は一部を除き 60%以下で維持できていることが確認された。なお、収蔵室の壁裏の共同溝に接する空間の相対湿度は 90%以上を維持する期間が長く年間を通じて高湿であった。ただし、共同溝の排水口を閉じることで、閉じて一ヶ月以内に相対湿度が 70%台まで下がった。引き続き相対湿度測定を継続し通年の挙動を把握しておく必要がある。

カビサンプラーによるカビの菌数は、収蔵庫室内では夏期に他の季節より概ね少なくなっていることが確認された。また、壁裏の共同溝に接する空間ではカビの菌数は、共同溝の排水口閉鎖後に低下した。

DNA シーケンサーにより、各部のカビの種の同定を行った結果、以下が明らかとなった。

収蔵庫内は、やや乾燥にも強い *Aspergillus* 属、中程度の湿度湿度を好む *Penicillium* 属が同定された。

特に *Cladosporium* 属、*Penicillium* 属は室内と廊下、屋外で共通して発見され、壁裏空気層で発見されなかったことから、室内のカビの由来は屋外と廊下であると考えられる。この収蔵庫では、除湿機運転により空間が低湿に保たれており現時点で目視のカビ発生等は確認されていないがカビの胞子が俵っていることが分かった。

また、相対湿度が 60%以下で概ね維持され、収蔵庫の収蔵物のカビクリーニングが実施され戻された後も、収蔵庫内のカビの菌数が屋外よりやや大きく存在していることが分かった。原因については十分分かっていないが、相対湿度が 60%以下となっていたとしても菌数が通年を通じて存在することを前提とすると収蔵庫内の湿度制御は引き続き通年を通じて必要であると考えられる。

また、共同溝の排水口閉鎖の影響含めて継続的に収蔵庫及び共同溝等の温湿度とカビの菌数を調べその挙動を明らかにしておく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 高鳥浩介：住環境にみるカビと健康被害，公衆衛生研究，47(1)，1998.

4 収蔵室および収蔵ケース内の温湿度環境の実態調査と解析

4.1. 測定目的と測定・解析概要

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に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動するため、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動が収蔵物に及ぼす影響を緩和するため、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温湿度変動をどの程度緩和するのか、ケースの材料の違いが与える影響などの実態について調査した例は極めて限られているため、これまで博物館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、ケース内と周辺温湿度の関係を調べるとともに、熱水分移動解析を行ってケースの温湿度変動緩和効果を調べた。

その結果、収納ケースの温度・湿度変動緩和能力と変動周期との関係、収納ケース材料と収納物の吸放湿性が湿度緩和能力に及ぼす影響、収蔵室内の非一様な温湿度分布が収納ケース内の温湿度に与える影響などについて明らかにした。更に、昨年度は、収納ケース内温度と収蔵室（代表）温度との関係をより詳細に調べ、収蔵室の温度分布が収納ケース内温度に与える影響を明らかにした。

本年度は、収蔵ケース内とケース近傍の温湿度を長期に亙り測定し、両者の関係をより詳細に調べることにより、近傍センサーの（垂直）位置とセンサー機種（メーカー）が与える影響を明らかにした。更に、収蔵室温湿度の周期的変動がケース内温湿度に与える影響を熱水分移動解析により求め、簡易な評価尺度を提案し、それに基づき収蔵ケース設計法について考察した。

4.2. 測定位置・日時・方法

測定した収蔵ケースは全部で 12 ケースである。2023 年 8 月 10 日以降、3 種の収蔵ケースについては、その近傍の温湿度も HOBO 温湿度計により測定している。更に、2025 年 1 月 24 日からは、HOBO に加え T&D 温湿度計も近傍温湿度の測定に用いている（表 4-1）。

4.3. 特別収蔵室 A における温湿度測定結果

先ず、過去 2 年間（2023 年 8 月 10 日～2025 年 6 月 10 日）の収蔵室、収蔵ケースとその近傍の温湿度測定結果を示す。

4.3.1. 温度（図 4-1）

・収蔵ケース（hoko1, hoko2, hoko3）：

収蔵室（特別収蔵室 A）とほぼ同様の変化をし、温度変動は殆ど緩和されていない（図 4-1）。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 1.1℃, hoko2（中性紙箱）は 0.8℃）。

表 4-1 温湿度を測定した収蔵室・収蔵ケースと収蔵ケース近傍（黄色は追加）

	設置場所	子機名	メーカー	機種
一般収蔵室A	室内代表点	hoko15	T&D	RTR-507L
	コンテナ	hoko7	T&D	RTR-507L
	コンテナ近傍空気	HOKO2023-5	Onset HOBO	MX1101-01
	キャビネット	hoko13	T&D	RTR-507L
金属資料室	室内代表点	2021-11	T&D	RTR-507L
	コンテナ	hoko8	T&D	RTR-507L
	木箱（空箱）	hoko14	T&D	RTR-507L
資料室	室内代表点	2021-9	T&D	RTR-507L
	中2階・木箱	hoko9	T&D	RTR-507L
	中2階・コンテナ	hoko10	T&D	RTR-507L
特別収蔵室A	室内	2021-5	T&D	RTR-507L
	床下	2021-6	T&D	RTR-507L
	北側二重壁内	tr-13	T&D	RTR-507L
	天井裏吹出し	tr-12	T&D	RTR-507L
	前室	2021-10	T&D	RTR-507L
	桐箱	hoko1	T&D	RTR-507L
	桐箱近傍空気	HOKO2023-2	Onset HOBO	MX1101-01
	中性紙箱	hoko2	T&D	RTR-507L
	中性紙箱近傍空気	HOKO2023-3	Onset HOBO	MX1101-01
	文書筆筒・抽斗	hoko3	T&D	RTR-507L
	文書筆筒近傍空気	HOKO2023-1	Onset HOBO	MX1101-01
研究展示室A	室内代表点	hoko18	T&D	RTR-507L
	貝飾りの近く	hoko19	T&D	RTR-507L
	天井裏	tr-14	T&D	RTR-507L
特別収蔵室B	室内	2021-2	T&D	RTR-507L
	木箱	hoko4	T&D	RTR-507L
	コンテナ	hoko5	T&D	RTR-507L
研究展示室B	室内	hoko11	T&D	RTR-507L
	覗き込みケース	hoko12	T&D	RTR-507L
	覗き込みケース近傍空気	HOKO2023-4	Onset HOBO	MX1101-01

夏季は、 $hoko3 > hoko1 = hoko2$ の順で（収蔵室室温より）外気温に近く、冬季は逆に、 $hoko3 = hoko1 < hoko2$ の順で（収蔵室室温より）やはり外気温に近い。収蔵ケースの熱容量による差ではなく、外壁からの距離によるものと推定される。

・収蔵ケースと収蔵ケース近傍：

収蔵ケース近傍の温度は収蔵ケースとほぼ同様の変化をするが、hoko3 では近傍温度はケース内温度より高い（図 4-2）。これについては 4.4 の解析において検討する。

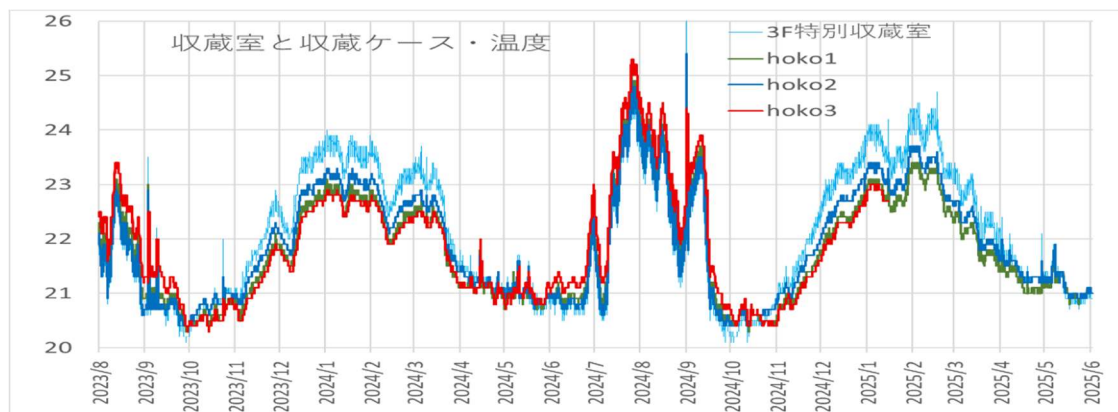


図 4-1 特別収蔵室 A と収蔵ケースの温度：2023 年 8 月 10 日～2025 年 6 月 10 日

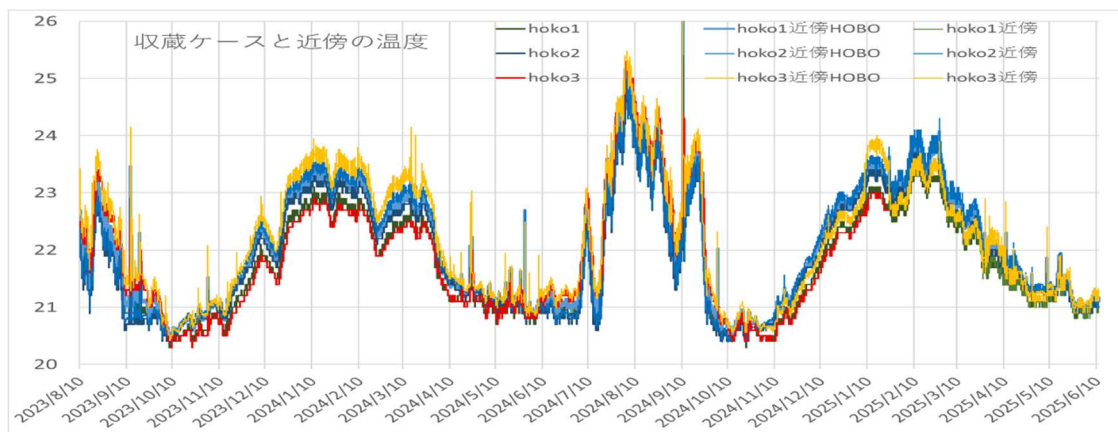


図 4-2 収蔵ケースとその近傍の温度：2023 年 8 月 10 日～2025 年 6 月 10 日

4.3.2. 相対湿度（図 4-3，図 4-4）

- ・ 収蔵室：冬季に 40～45% となる。2025 年春季には 30% まで低下している。温度が 0.5°C 程度上昇していることに対応するが、なぜ？夏季は 60～65% に上昇する。（図 4-3）
- ・ 収蔵ケース：夏季は収蔵室 RH に近く（hoko3 は数% 低く、hoko1 と hoko2 はほぼ等しい）、10 月～春は収蔵室 RH より高い（hoko3 => hoko1 > hoko2）。温度とは逆の傾向となっている。
- ・ 収蔵ケースとケース近傍（図 4-4）：収蔵ケース近傍の相対湿度は収蔵ケースとほぼ同様の变化をするが、hoko3 では 4～10 月は近傍の方が、11～2 月はケース内の方が湿度は顕著に高い。これについては、4.4 の解析において検討する。

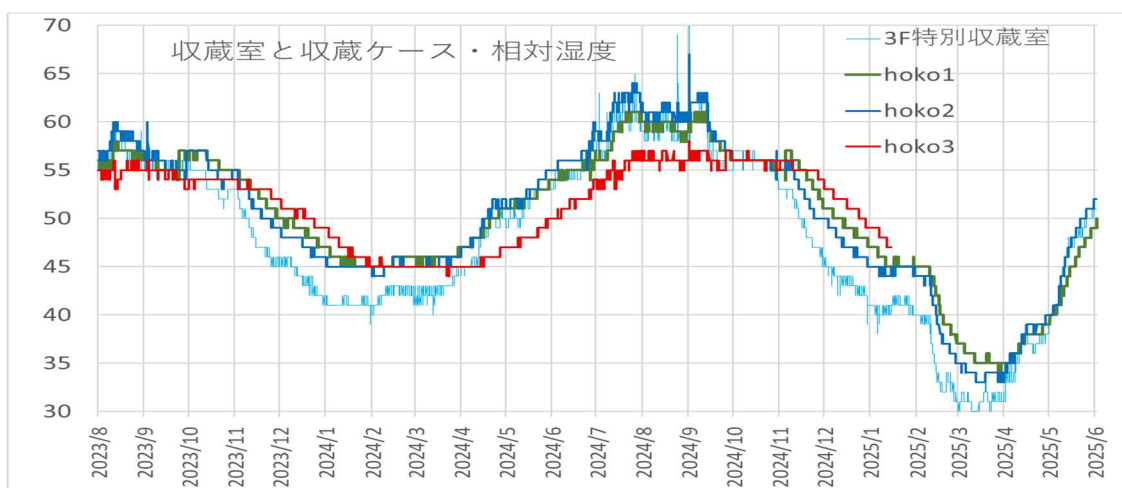


図 4-3 特別収蔵室 A と収蔵ケースの相対湿度：2023 年 8 月 10 日～2025 年 6 月 10 日

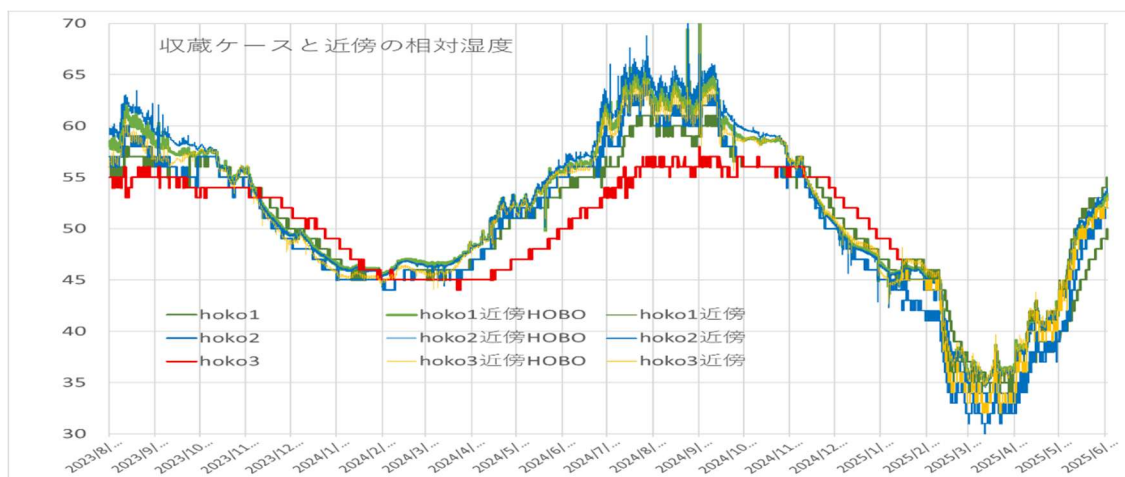


図 4-4 収蔵ケースとその近傍の相対湿度：2023 年 8 月 10 日～2025 年 6 月 10 日

4.4.収蔵ケース内の温湿度の解析

4.4.1.収蔵室の温湿度を入力とした解析

- ・昨年度報告したように、収蔵室の温湿度を入力とした計算では、収蔵ケース内の温度計算値 (Btemi2) は収蔵室温度 (F4temp2) とほぼ等しくなり、測定結果 (hoko3-T) を再現できず、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 (hoko3-RH) とは大きく異なる (図 4-5, 図 4-6)。
- ・計算値が測定値と異なる原因が、収蔵ケースの熱物性値や収蔵物の有無、換気回数の不適切な設定によるものではなく、収蔵ケース近傍の温湿度が収蔵室温湿度 (代表値) と異なることによると推定し、収蔵庫内の温度分布の測定結果に基づいて検討を行った。
- ・今回、収蔵ケース近傍の温湿度を計測したので、それを入力とした計算を行った。

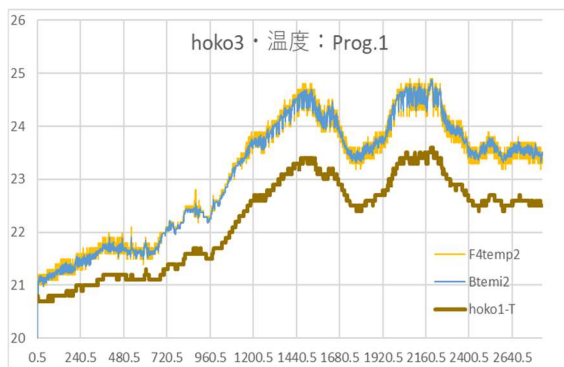


図 4-5 収蔵ケース温度:2022 年 7 月 27 日
～2023 年 3 月 2 日)

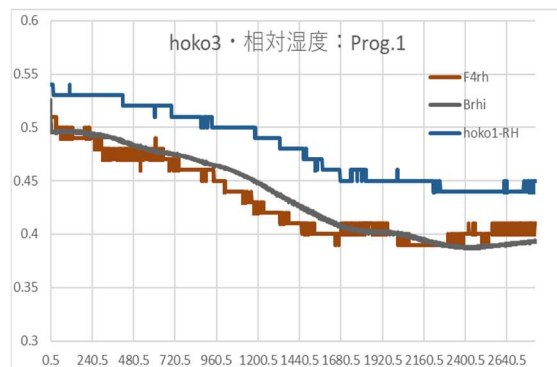


図 4-6 収蔵ケース湿度:2022 年 7 月 27 日
～2023 年 3 月 2 日)

4.4.2. 収蔵ケース近傍の温湿度測定値を入力とした解析

(1) 木製収蔵箱 : hoko3

- ・収蔵箱周辺の温湿度測定値 (2023.8.11～2024.9.30) が得られたので、それを入力として収蔵箱内の温度・相対湿度を求め、測定値との一致度合いを見た。
- ・収蔵箱内温度の測定値と計算値は、2023 年冬季の 0.5°C 程度の差を除くとよく一致している (図 4-7)。2023 年の冬季は、周辺温湿度センサーは収蔵箱内センサーより 23cm 高い位置に設置されていたので、垂直方向の温度分布が影響したと考えられる (周辺温湿度測定用センサーの (垂直) 位置は、測定期間中に短期間であるが変化した)。
- ・相対湿度は夏季に差が 3% 程度になるが、全体としては 1～2% 程度の差であり、よく一致している (図 4-8)。

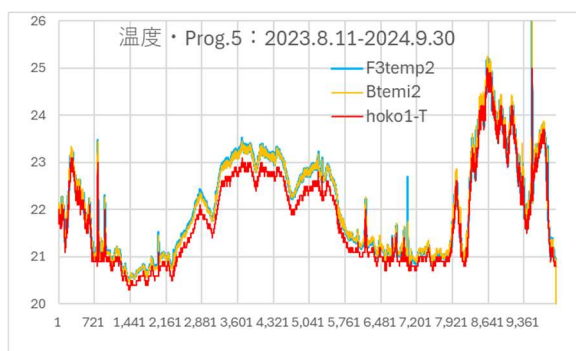


図 4-7 収蔵ケース hoko3 の温度

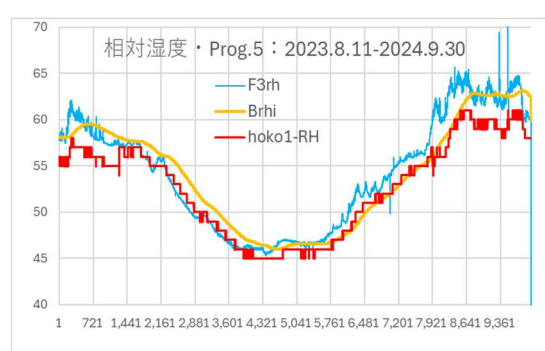


図 4-8 収蔵ケース hoko3 の湿度

(2) 中性紙箱

- ・紙製収蔵ケースについても (hoko2), 収蔵ケース近傍の温湿度測定値 (2023.8.11～2024.9.30) が得られたので、それを用いた解析を行った。
- ・中性紙の収蔵ケース内部空気の温度は、冬季に計算値が 0.2°C 程度高め、相対湿度は計算値が夏季に 2.5% 程度高めになることを除くと非常によく一致する (図 4-9, 4-10)。



図 4-9 収蔵ケース温度：中性紙箱

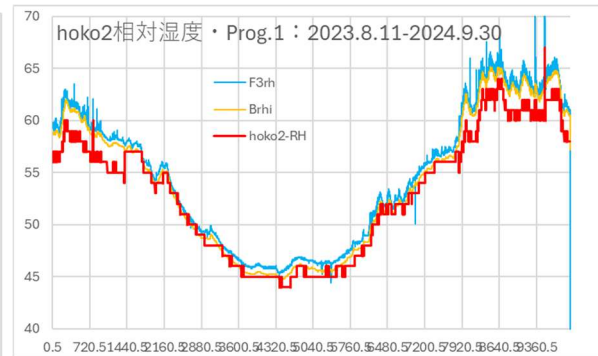


図 4-10 収蔵ケース湿度：中性紙箱

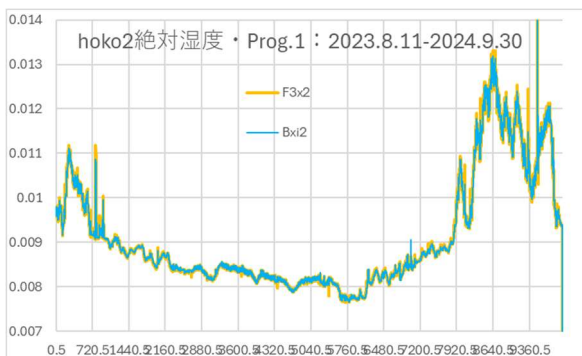


図 4-11 収蔵ケース絶対湿度：中性紙箱

4.4.3. 収蔵ケース(hoko3)内の温湿度の更なる解析：吸放湿特性、換気性状の検討

- ・収蔵ケースの近傍空気の温湿度を入力とすることにより、抽斗（木製）については測定値とほぼ一致する結果が得られたが（hoko3）、センサーの高さ調整後においても夏季の相対湿度に3%程度の差が見られた。中性紙収蔵箱についても同様な傾向が見られたため、これについての検討を行った。
- ・すなわち、木材の吸着等温線の値についての検討、換気における流量係数の相対湿度による変化を考慮した解析を行ったが、結果として大きな違いは見られなかった。

4.5. 収蔵ケース内外の温湿度測定値の検討

4.5.1. 木製抽斗（hoko3）内外の温湿度測定値の比較

(1) 目的

- ・4.4.2 の木製抽斗についての解析では（hoko3）、
 近傍空気の絶対湿度 > 容器内絶対湿度の計算値 > 容器内絶対湿度の測定値
 近傍空気の温度 > 容器内温度の計算値 > 容器内温度の測定値（殆ど等しい）
 という結果であった。
- ・ケース内温度とほぼ等しい温度とケース内絶対湿度より高い絶対湿度の近傍空気条件を入力としてケース内温湿度を計算すると、当然絶対湿度は測定されたケース内絶対

湿度より高くなり、結果として相対湿度も高くなる。これは、種々のパラメータ値を変更しても同様な結果となるはずである。他部材への2, 3次元の熱湿気流れがある場合にそのような結果が生じる可能性はあるが、それがほぼ1年間に亘って継続するような湿気源は殆ど考えられない。従って、計算値が測定値に一致しないのはモデルの不備によるものではないと考えられる。

- ・従って、先ず計算の前提となる温湿度測定値の妥当性について検討する。

(2) 抽斗（木製）内外の温湿度測定値の比較

- ・近傍温湿度測定用のセンサーは、前述のように2023年8月11日～2024年10月3日の間でも位置に変化があるので、抽斗内部センサーと高さがほぼ等しい2024年6月7日～2024年9月10日を中心に検討する。
- ・先ず、2023年8月11日～2024年9月30日の温度、相対湿度、絶対湿度を図4-12に示す。温度については、冬季に近傍空気温度が0.3℃程度高いことを除くと、内部温度とほぼ一致している。センサー位置を内部と同程度にした2024年6月7日～9月10日では、両者はほぼ等しい。絶対湿度については、年間を通して0.7g/kg前後近傍空気の方が内部より高い。これらの温度と絶対湿度より、相対湿度は冬季には比較的近く、夏季には3～4%程度の差が見られる。



図 4-12 hoko3 と近傍の温度・絶対湿度・相対湿度：2023 年 8 月 11 日～2024 年 9 月 30 日

- ・抽斗内外のセンサーを同じ高さに設置した2024年7月1日～9月30日（9月10日まで）の測定値を図4-13に示す。温度は0.1℃程度、相対湿度は3～4%程度、絶対湿度は1g/kg程度、近傍の方が内部より高い。

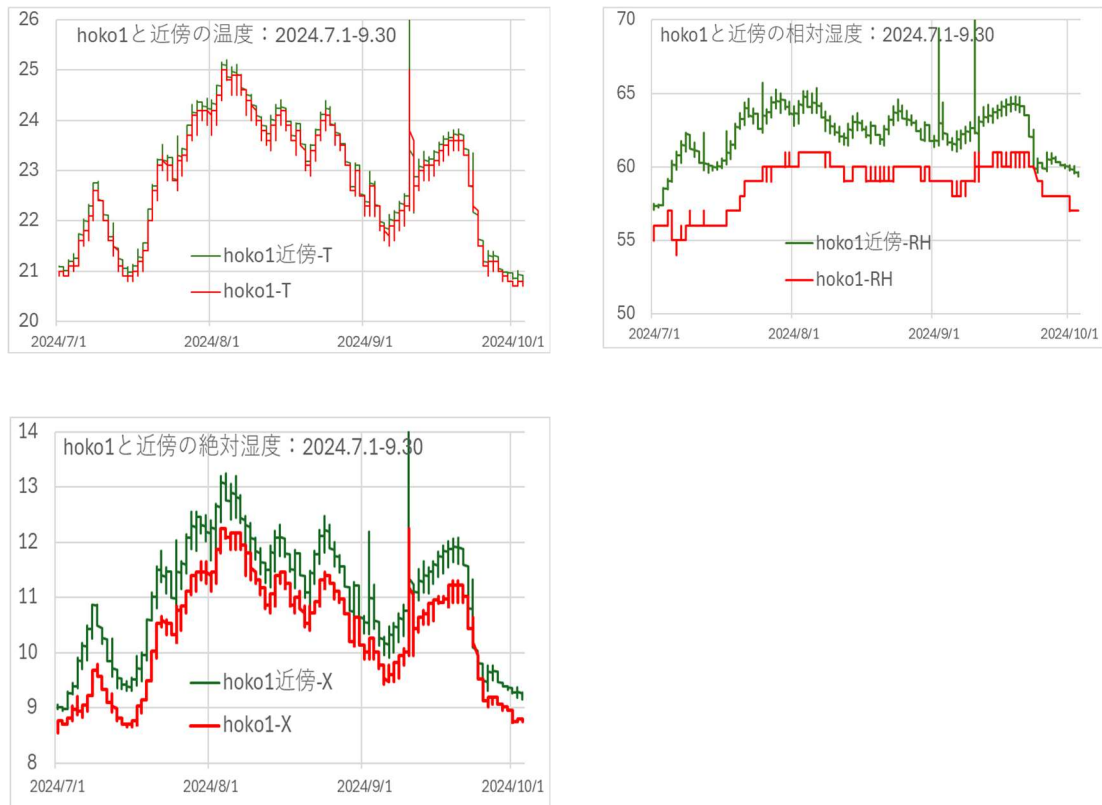


図 4-13 hoko3 と近傍の温度・相対湿度・絶対湿度：2024 年 7 月 1 日～9 月 30 日

(3)内外温湿度測定値の差の理由

- ・考えられる理由としては、
 - ① 抽斗の非一様性（抽斗が異なる温湿度の物体に接している，熱源・湿気源有）
 - ② 各センサーの特性の違い：センサーの個体差，ばらつき
 - ③ 容器内外の風速，放射条件の違い：結果としてセンサーの温湿度が異なる．
 - ④ HOBO の温湿度校正曲線の特性，HOBO の機種の違い
 などが考えられる．
- ・これらについては，特別収蔵室 A に設置された他のセンサー（中性紙箱と桐箱）の測定結果との比較より検討する．

4.5.2 中性紙箱，桐箱内外の温湿度測定値との比較

(1)hoko1～hoko3 の比較：内外センサーの高さを揃えた期間（2024/7/1/～9/30/(9/10/まで)）

- ・各収蔵ケースの結果はほぼ同様の傾向を示している(図 4-14)．すなわち，温度については近傍より容器内の方が 0.1°C 程度低い，相対湿度はケースにより程度の違いはあるが（hoko1：4%，hoko2：2.5%，hoko3：6～7%）変化傾向は同じであり，絶対湿度についても変化傾向は似ている（hoko1： 0.8g/kg ，hoko2： 0.3g/kg ，hoko3： $1\sim 1.2\text{g/kg}$ ）．

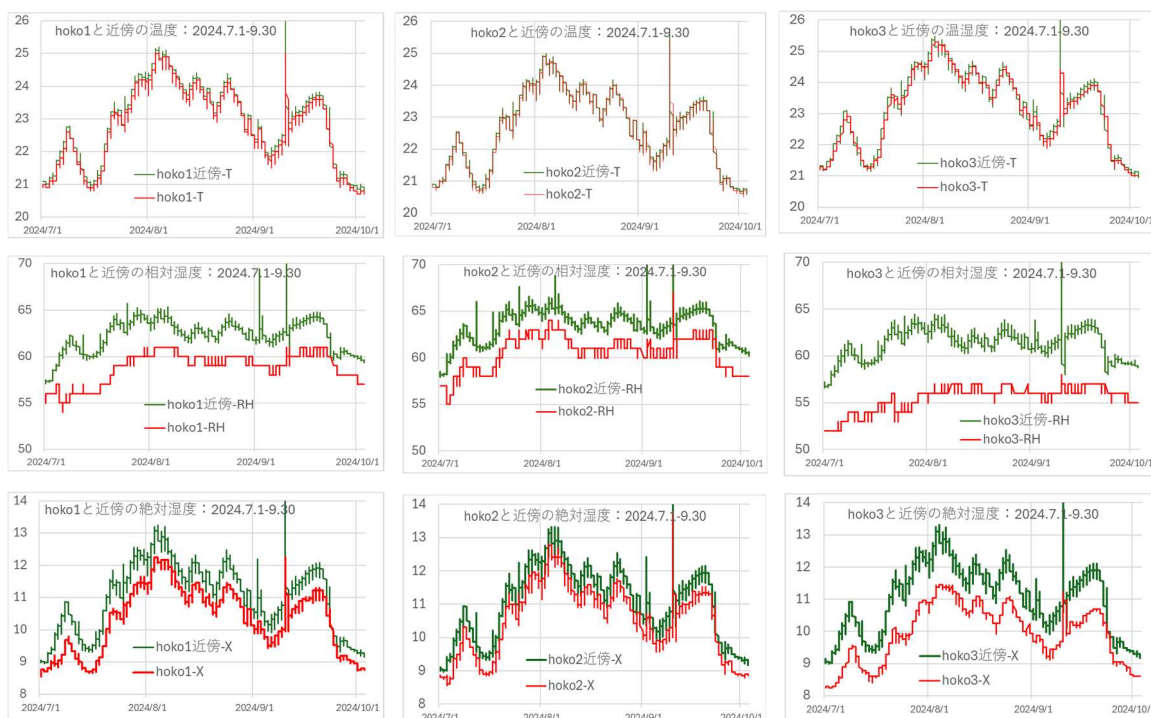


図 4-14 ケース内外の温度・相対湿度・絶対湿度の比較：2024 年 7 月 1 日～9 月 30 日

- ・各ケース間で、温度と絶対湿度の平均は比較的近く、それが 3 ヶ月程度続いていることから、①収蔵ケースの非一様性（異なる温湿度の物体に接している、熱源・湿気源がある）の可能性は低いだろう。3 種類の収蔵ケースにおける変化、内外の違いの傾向が共通していることより、②の各センサーの特性の違いの可能性は無いだろう。
- ・従って、理由としては以下の 2 つが残される。

③容器内外の風速、放射条件の違いの影響：

- ・容器内外で風速・放射・温湿度条件は異なると、結果センサーの温湿度が異なる。
- ・各ケースの近傍温度は平均で 0.3～0.5℃異なり、放射条件も異なるだろう。
⇒これにより、各容器の例えば背部で熱の流れが生じ、それは水蒸気の流出入（吸着・脱着）を惹き起こす。つまり、①の可能性が生じる。
⇒内部では正味放射は 0 に近いが、近傍は年間を通してセンサーに流入：夏季は外壁温度が高く放射流入し対流熱伝達で熱流出、冬季は逆？⇒冬季も室上部には高温の空気が溜まり、天井から放射熱が流入する？

- ・風速の違い（内が小で、近傍で大）

④HOBO の温湿度校正曲線の特徴

取り扱い説明書には、風速 1m/s における校正関係が書かれている。風速がほぼ 0 の容器内と 0.3m/s 程度の周辺では、この関係が異なるか？

(2)全期間を通した比較 (図 4-15)

- ・全期間を通して hoko1～hoko3 を比較する。
- ・2023 年 8 月 11 日～2024 年 9 月 30 日の温度・相対湿度・絶対湿度を見ると、温度については、冬季に近傍空気温度が 0.3℃程度高いことを除くと、内部温度とほぼ一致している。センサー位置を内部と同じ高さにした 2024 年 6 月 7 日～9 月 10 日では、両者はほぼ等しい。絶対湿度については、年間を通して 0.7g/kg 前後近傍空気の方が内部より高い。温度と絶対湿度より、相対湿度は冬季には比較的近く、夏季には 3～4%程度の差が見られる。

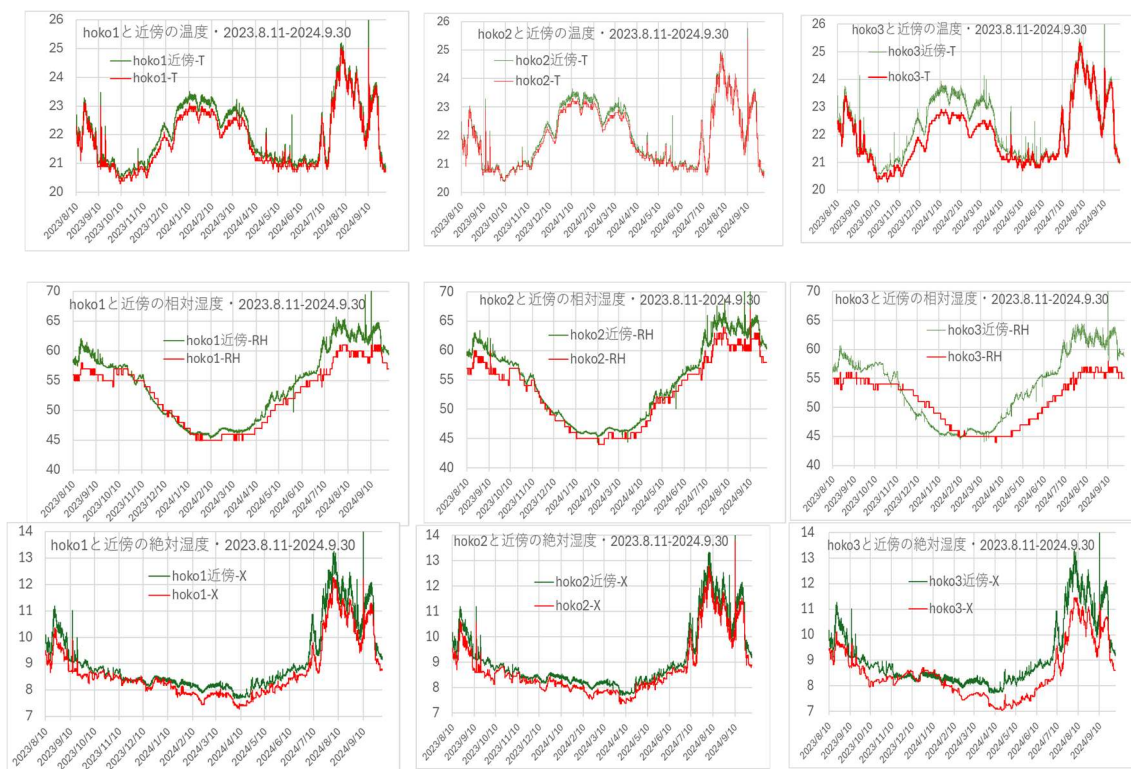


図 4-15 ケース内外の温度・相対湿度・絶対湿度の比較：2023/8/11～2024/9/30

- ・絶対湿度は、年間を通して近傍空気の方が内部より高い。これはセンサー高さの異なることの影響はあっても共通に言えそう。(少なくとも、中性紙箱 (hoko2) は全期間を通してほぼ同じ高さにあった。)

⇒とすると、収蔵箱内外の水分収支が取れない。

(3)hoko1～hoko3 の周辺空気の絶対湿度の比較

- ・図 4-16 に示すように、高さの異なる hoko1～hoko3 の周辺空気の絶対湿度は全期間を通してほぼ等しい。従って、少なくともこれらのセンサー高さの範囲内においては、絶対湿度は「常に」等しく、一様に分布していると言える。

⇒水蒸気の収蔵ケース内外の流れも平均的には(数日より短周期の変動を除き)0 となる。

⇒従って、収蔵ケース内外で平均的に絶対湿度が異なるのは、測定上の要因に由来する。



図 4-16 ケース近傍の絶対湿度の比較：2023/8/11～2024/9/30

4.5.3 研究展示室 B のガラス展示ケース内外の温湿度測定結果との比較

(1) 検討経緯

- ・別件で、研究展示室 B のガラス展示ケース内外の温湿度測定結果を調べたところ、4.5.2 と同様な傾向が見られたので、その結果を示す。

(2) 展示ケース内部と近傍の温湿度測定値：hoko12 と hoko12 近傍（図 4-17）

- ・ケース内外で温度については殆ど差が見られないが（最大で $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ）、相対湿度については周辺の値は内部より平均で 4% 程度、最大で 10% 高く、特別収蔵室 A の状況に似ている。

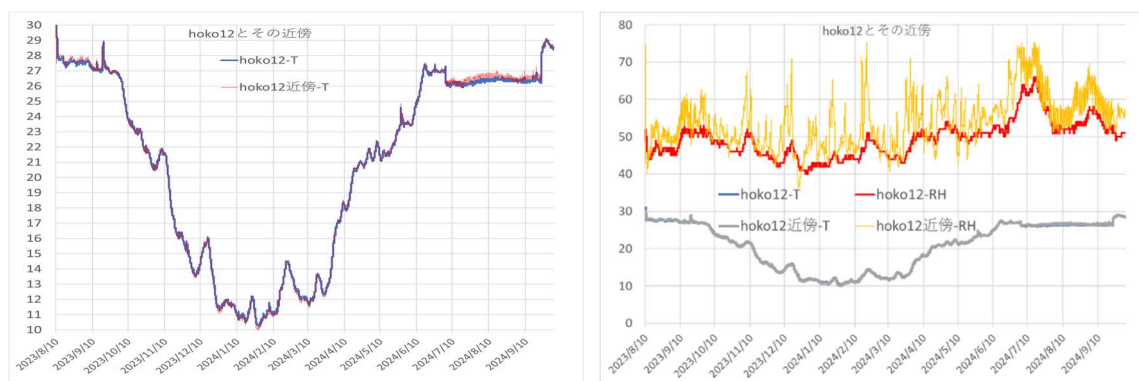


図 4-17 ケース内外の温度・相対湿度の比較：研究展示室 B

- ・同じ研究展示室 B 内の外壁に近い室内で測定した結果（hoko11）を図 4-18 に示す。温度については、ガラスケース内より夏季は低く（2023 年のみ）、冬季に低い。夏季は窓際のエアコンからの冷気により低温となっていたこと、暖房の無い冬季にはケースより外気側に位置していることが影響したためと考えられる。相対湿度については、変化幅はケース近傍（hoko12 近傍）と同程度だが、

平均値が 5%程度低い。妥当と考えられる変化を示している。

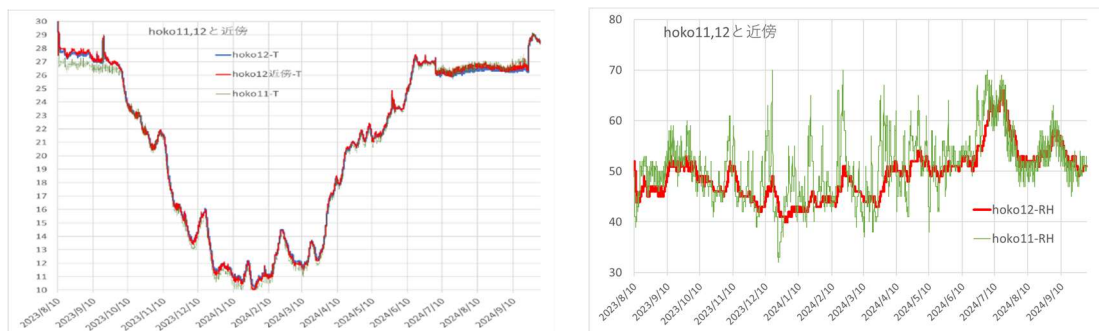


図 4-18 ケース内外の温度・相対湿度の比較：研究展示室 B

- ・ ケース近傍相対湿度(hoko12 近傍)とケース内部(hoko12)および壁際 RH(hoko11)との相関を図 4-19 に示す。ケース近傍 RH とケース内部 RH の相関係数 0.66 に比して、ケース近傍 RH と壁際 RH との相関係数は 0.95 と高い。いずれもケース近傍の RH は、ケース内部および壁際 RH と等しいと考えた場合より RH60%で 5%程度、RH40%で 3%高い値となる。
- ・ 本来、これらの値は（熱容量、湿気容量のため）等しくはないが、数日の平均ではかなり近い値になると考えられるため（要検討）、ケース近傍空気の真の RH は測定された近傍 RH より 3～5%程度低い値（より小さい）と推定される。

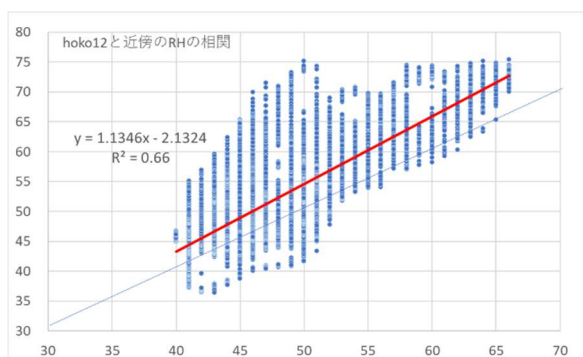


図 4-19 hoko12 とその近傍の RH の相関

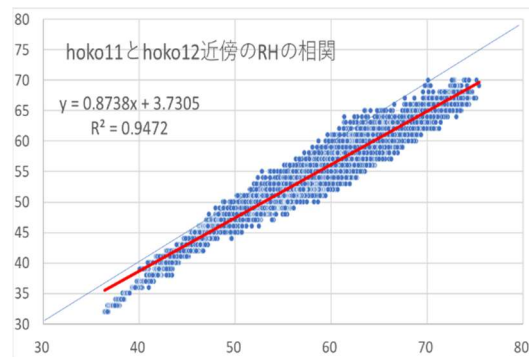


図 4-20 hoko11 と hoko12 近傍の RH の相関

4.5.4 近傍 RH 測定値が高い値を示すこと

- ・ 各測定点で使用されているセンサーは、収蔵容器（hoko1～hoko3）内は RTR-507L であるが、hoko1～hoko3 と hoko12 の近傍空気は MX1101-01 となっている。つまり、これまで検討してきた状況では全て、収蔵容器内は RTR-507L で、近傍の温湿度は MX1101-01 で測定していることになる。
- ・ 近傍 RH が高い RH を与える理由は、センサーMX1101-01 がセンサーRTR-507L より高い RH 値を与えることによると推察される(どちらが正しい RH かは別途検討要)。

以上より、

- ・ 近傍 RH の測定値が物理的に受け入れ難い点は、センサの種類の違いにより説明可能であることが示されたが、これについてはセンサの入れ替えをして測定を継続し、推定の妥当性をチェックする必要がある。

4.5.5 異なるセンサー機種による近傍温湿度の測定

- ・ 以上の検討のために、2025 年 1 月より hoko1～hoko3 近傍センサーとして、これまでの MX1101-01 に加え、RTR-507L による測定を開始した（図 4-21～図 4-23）。全ての収蔵ケースにおいて両者の温度はほぼ等しいが、相対湿度は RTR-507L による測定値の方が低い(hoko2, hoko3)かほぼ等しい(hoko1)。4.5.4 がほぼ確認されたと言えよう。
- ・ 今後、計測を継続し確認するとともに、温湿度解析により対応を調べる必要がある。

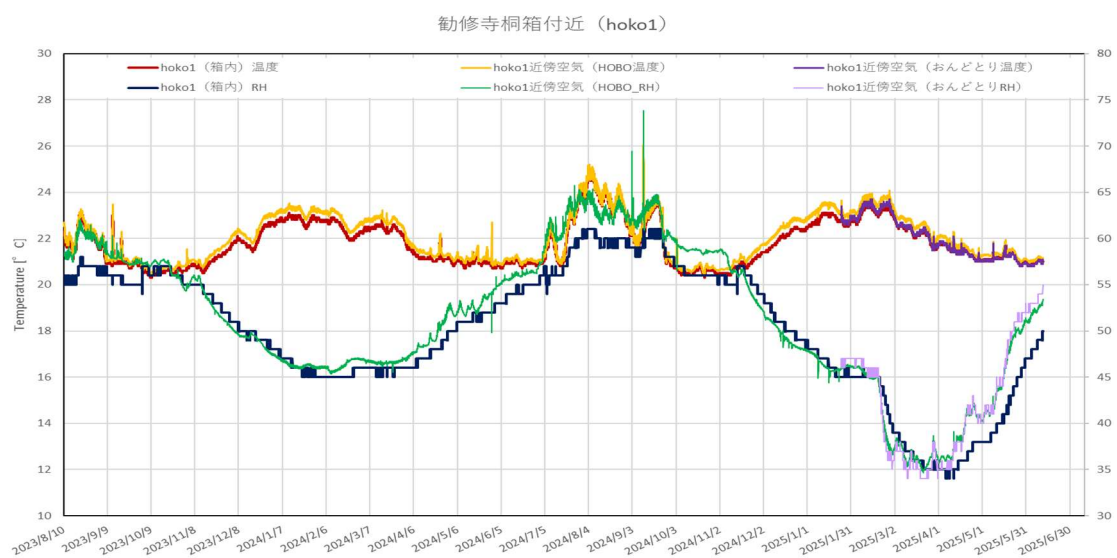


図 4-21 ケース近傍の温度と相対湿度(hoko1)：センサー機種による違い

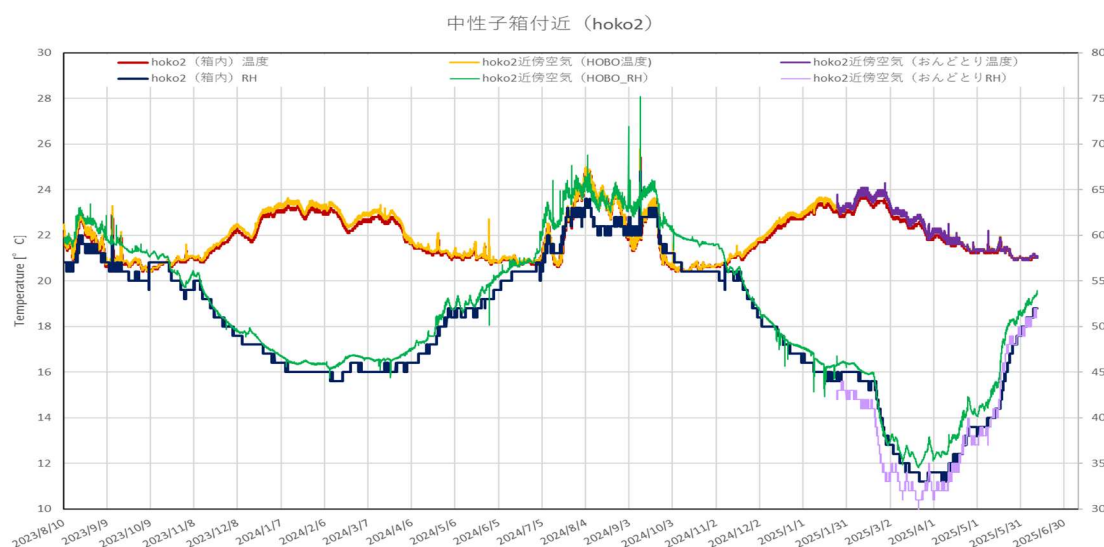


図 4-22 ケース近傍の温度と相対湿度(hoko2)：センサー機種による違い

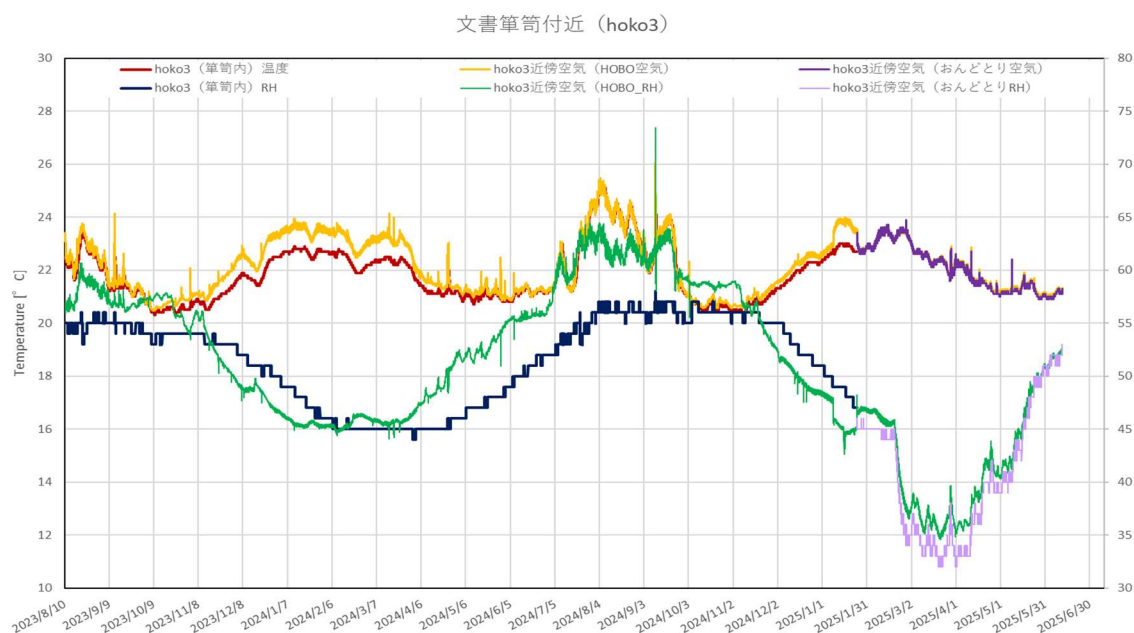


図 4-23 ケース近傍の温度と相対湿度(hoko3)：センサー機種による違い

4. 6. 収蔵ケースの温湿度調整能力の評価

4.6.1.本節の目的

- (1)前報告書では、収蔵ケースの役割を、「周辺環境の変化が収蔵物に及ぼす影響を緩和し、収蔵物を良好な状態に保つこと」とした。
- (2)収蔵ケースの温湿度変動緩和能力についての詳細な実態調査が限られているため、詳細な実測を行うことを第一段階とし、第二段階として測定結果を再現する解析モデルを作成することとした。これらについては、すでに 4.3～4.5 に書いた通りである。
- (3)第三段階として、作成した解析モデルを用いて収蔵ケースの温湿度緩和効果を評価する。
- (4)更に、以上の検討結果を考慮して温湿度緩和性能の向上策を検討する（第四段階）。

4.6.2.測定・解析結果（第一段階、第二段階）のまとめ

測定とそれに対する解析により、以下のことを明らかにした。

- (1)収蔵ケースの温度変化幅は収蔵室のそれとほぼ等しい（温度変動緩和能力は小さい）。湿度変動緩和能力は、長周期については小さいが、短周期についてはかなり大きい。
- (2)熱水分移動解析により測定結果をほぼ再現でき、木製収納箱の湿度変動緩和能力は大きい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蔵ケース内の湿度変動に大きく影響することを明らかにした。
- (3)収蔵室内の非一様な温湿度分布が収納ケース内の温湿度に与える影響が大きい。解析モ

デルにより実測値の再現がほぼ可能である。

4.6.3. 収蔵ケースの温湿度調整性能の一般評価（第三段階）

熱湿気解析モデルにより妥当な精度で測定値を再現することができたので、それを用いて収蔵ケースが有する温湿度調整能力を一般的に評価する。入力温湿度、材料物性値などの変数の影響を、周波数応答により評価する。

(1) 熱湿気モデルにおける周波数応答

- ・非線形モデル：空調されていない収蔵施設の年間の温度変化幅（の大きいこと）を考慮すると、線形化（主に飽和水蒸気圧の温度変化）による精度低下が気になる。非線形性を残した周期入力計算により、線形化の妥当性評価を含めて検討する。

- ・計算条件：入力とする収蔵室の温湿度変化

周期：1 時間，6 時間，24 時間(1 日)，720 時間(1 ヶ月)

平均：温度（5℃，15℃，21℃，25℃，30℃），相对湿度（40%，55%，80%）

*絶対湿度一定とする空調制御は一般的でなく，RH とする。収蔵室空気絶対湿度を一定に保っても，壁表面の温度変化→表面の相对湿度変化→表面の絶対湿度変化が生じ，實際上絶対湿度を一定に保つことにならない。

振幅：温度（1℃，5℃，10℃），相对湿度（1%，5%，10%）

- ・収蔵ケースの条件

材料（中性紙箱，桐箱，文書筆筒），大きさ（現収蔵ケースを基準。厚さが重要）

- ・収蔵ケース内の収納物：空気熱湿気容量を大きくすることで代用

- ・基準の計算条件：文書筆筒（厚さ 2.1cm）。温度（平均 21℃・5℃振幅），相对湿度（平均 55%・5%振幅）を基準。換気回数 0。

(2) 入力温度周期の影響（相对湿度一定）

(1) 温度 24 時間周期変動：温度（平均 21℃・5℃振幅），相对湿度（平均 55%・振幅 0%）

- ・温度：筆筒の内外表面，筆筒内空気全てが収蔵室温度にほぼ等しく平均 21℃・5℃振幅
- ・筆筒内空気の相对湿度：振幅 0.95%，平均は 55%一定に近いが僅かに高い（注 参照）。

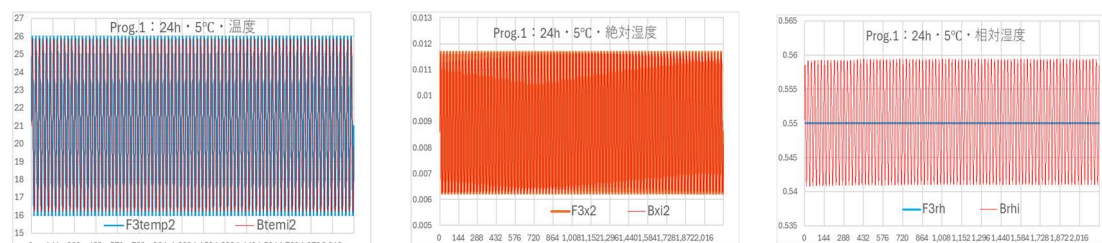


図 4-24 収蔵室の温度が 24 時間周期・振幅 5℃変化の場合：温度、絶対湿度、相对湿度

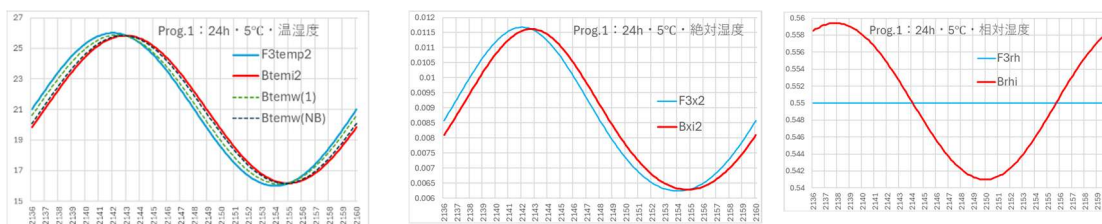


図 4-25 90 日目の変化：収蔵室温度 24 時間周期・振幅 5℃：温度、絶対湿度、相対湿度

- ・24 時間の変化を見ると（90 日目），収蔵室の温度上昇に伴いケース内温度も 1.0h 程度の遅れで上昇するが，上昇中は 1℃程度低い．絶対湿度についてもほぼ同様な結果となっている．温度上昇過程では壁から（ケース内へ）の放湿に伴う吸熱があるため，伝熱の時間遅れによるものより温度が低くなっており，温度下降過程では逆に吸湿に発熱・温度上昇により高温となる．
- ・相対湿度は温度のピークより 4h 程度前に上昇している．いわゆる放湿とそれに伴う吸着熱による湿度の前進現象であるが，平均値としては収蔵庫の湿度（0.55）よりわずかに高い．飽和蒸気圧の温度による上昇のためである．
- ・入力温度の温度振幅を 1℃，0.1℃に小さくした場合（図 4-26, 27），温度と絶対湿度の変化性状は振幅 5℃の場合と殆ど同じだが，相対湿度の高湿度側と低湿度側への変化幅は，温度振幅が 0.1℃になると殆ど等しい．

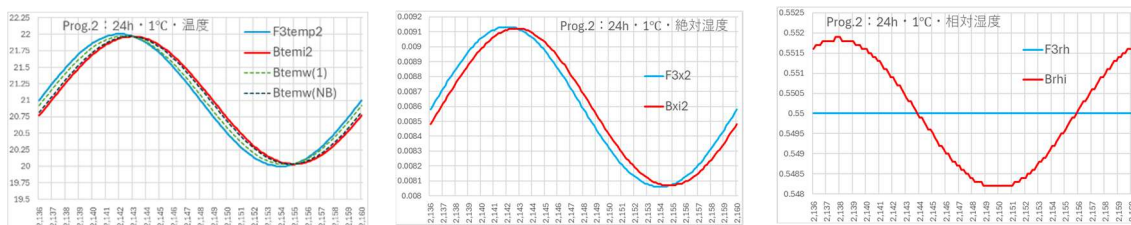


図 4-26 収蔵室の温度振幅が 1℃の場合：温度、絶対湿度、相対湿度

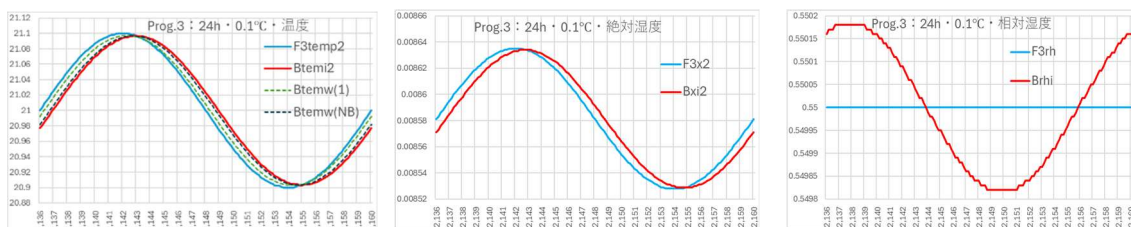


図 4-27 収蔵室の温度振幅が 0.1℃の場合：温度、絶対湿度、相対湿度

- ・収蔵室の相対湿度を 40%, 80%にした場合（図 4-28, 4-29），温度，絶対湿度とも RH55%の場合とほぼ等しい．高湿度側と低湿度側の相対湿度振幅の違い（従って平均相対湿度）は，収蔵室の平均絶対湿度が高いと大きくなる．

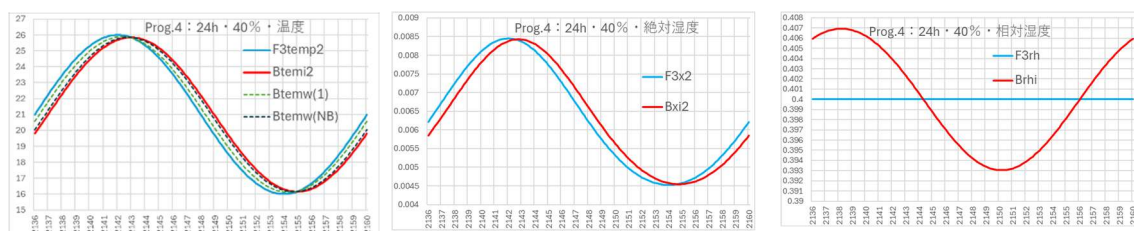


図 4-28 収蔵室の平均相対湿度が RH40%の場合：温度，絶対湿度，相対湿度

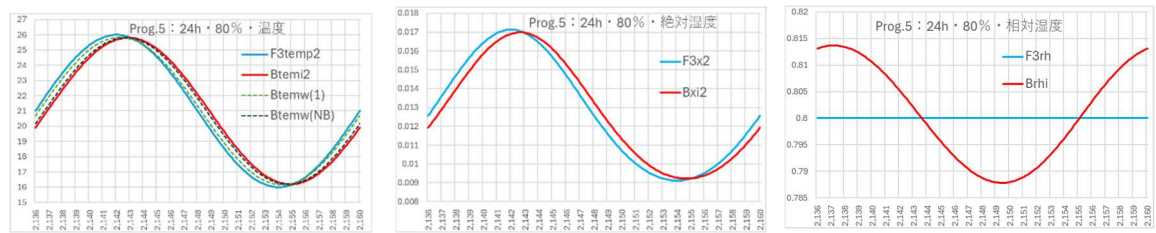


図 4-29 収蔵庫の平均相対湿度が RH80% の場合：温度，絶対湿度，相対湿度

- ・ケースの材料（檜）の平衡含水率を 1/2 にした場合(図 4-30)，図 4-25 とほぼ同じ結果。

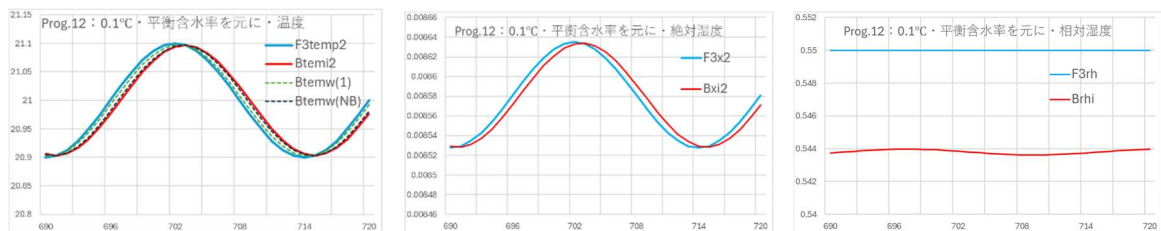


図 4-30 平衡含水率を元の 1/2 ? に：温度振幅 0.1°C の場合の温度，絶対湿度，相対湿度

- ・以上をまとめると，温度のみが 24 時間周期で変化する場合のケース内の温度，絶対湿度，相対湿度は（厚さ 21mm のヒノキの場合），
 温度と絶対湿度：収蔵室の温度振幅（5，1，0.1°C），収蔵室の平均 RH（40～80%），
 漏気の有無，平衡含水率（*1，*2）による違い殆ど無く，振幅は 5%？程度減少し，
 位相が 1h 程度遅れる．線形としての扱いが可能
 相対湿度：収蔵ケース内空気平均相対湿度は，収蔵室の温度変化幅が大きくなるほど，
 平均 RH が高い程，わずかなが高くなる．

(2) 温度 6 時間周期変動：図 4-31

- ・ケース内温度は位相が 0h 程度遅れ，振幅は 3.8°C 程度に減衰する．絶対湿度についてもほぼ同様だが，ケース内の絶対湿度平均は収蔵室平均より高く，水分収支が取れていない．これについては 1h 周期において詳述する．相対湿度は平均 55.3%（最低 52.5%，最高 58.1%）で収蔵室の平均相対湿度より 0.3% 高い．なお，絶対湿度および相対湿度は 90 サイクル（540 時間=22.5 日）でまだ完全な周期定常には達していない．

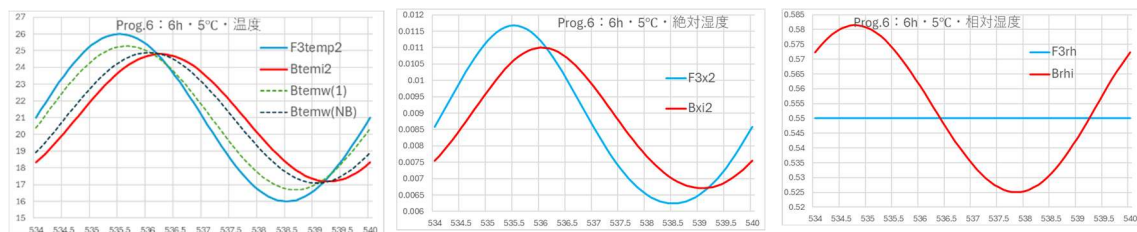


図 4-31 6 時間周期・温度振幅 5°C の場合の温度，絶対湿度，相対湿度

(3)温度 1 時間周期変動の結果を図 4-32 に示す。温度については、ケース内平均は収蔵室と同じ 21℃，振幅 0.9℃程度で妥当と考えられる。ただ，絶対湿度を見ると，収蔵室の絶対湿度(F3x2)が 0.00625～0.0117kg/kg（平均 0.00898）を変動するのに対して，ケース内(Btemi2)は 0.0078～0.00945kg/kg（平均 0.00863）を変化し，平均的に低く，水分収支がとれていない。相对湿度については，ケース内の方が平均値が 0.5%程度高い。

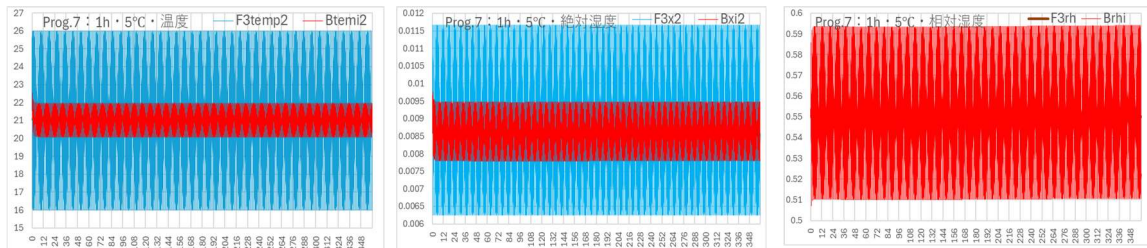


図 4-32 1 時間周期・温度振幅 5℃の場合の温度，絶対湿度，相对湿度

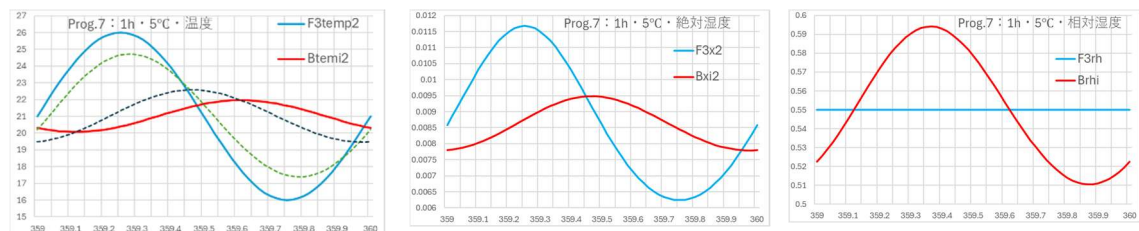


図 4-33 1 時間周期・温度振幅 5℃の場合の 360 サイクル目の温度，絶対湿度，相对湿度
・出力時間が荒くピークが取り出せていない，計算時間が短いなどが原因ではなく，変動周期が短いと半無限壁体に近くなり，変動が壁内部まで十分に伝わらず，十分な精度の計算がなされていないためと考えられる。差分計算では後退差分などを用いる必要が
あろう。

(4)温度周期変動・720 時間周期・5℃振幅：図 4-34

収蔵ケース，ケース内空気とも収蔵室と同じ平均 21℃・振幅ほぼ 5℃を変化する。絶対湿度についても，収蔵室およびケース内とも平均 $0.0088 \pm 0.0027 \text{ kg/kg}$ を変化する。ケース内の相对湿度は，最高 55.24%，最低 54.73%，平均 54.99%程度で，収蔵室の 55%にほぼ等しい。

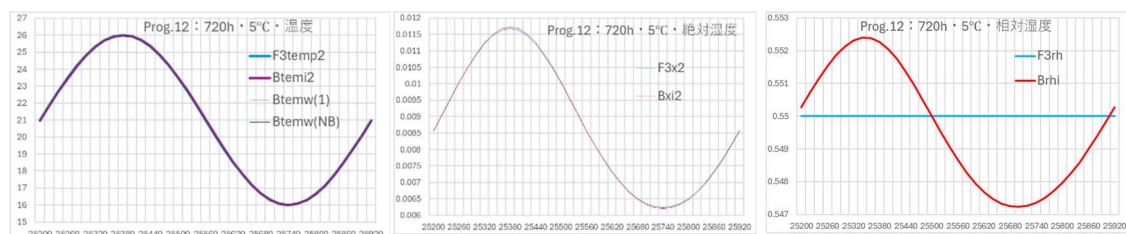


図 4-34 720 時間周期・温度振幅 5℃の場合(35 サイクル目)の温度，絶対湿度，相对湿度

(3)入力相对湿度周期の影響（温度一定）

・24 時間周期，温度一定 21℃，相对湿度平均 55%・5%振幅を基準とする。

(1)相対湿度 24 時間周期変動：ケース内温度は最高 21.3℃・最低 20.68℃（平均 20.99℃）で、平均は収蔵室温度 21℃より僅かに低い。絶対湿度については、収蔵室は平均 $0.00859 \pm 0.00079\text{kg/kg}$ 、ケース内は平均 $0.00858 \pm 0.00016\text{kg/kg}$ を変化し、やはり平均は僅かに低い。温度、絶対湿度の僅かな違いは、数値誤差の可能性？

- ・ケース内の相対湿度は 55%程度で、ほぼ収蔵室の平均に等しい。
- ・相対湿度入力の場合にも、温度入力の場合と同様に、ケース内表面温度はケース外表面温度より 1 時間程度遅れて同程度に増加しており、収蔵室の入力温度がケース内表面温度の増加を惹き起こし蒸発が起きるといふ収蔵室温度入力時と同様な状況と考えられる。つまり、収蔵室の湿度変化の影響は、等価な収蔵室温度変化に置き換えることができそうである。なお、ケース内表面温度がケース外表面温度より低い理由は、外表面の湿気伝達率が内表面のそれより大きく、蒸発量が大きいためである（低温時は逆であるはずだが、平均温度がずれるため図では分かりづらい）。

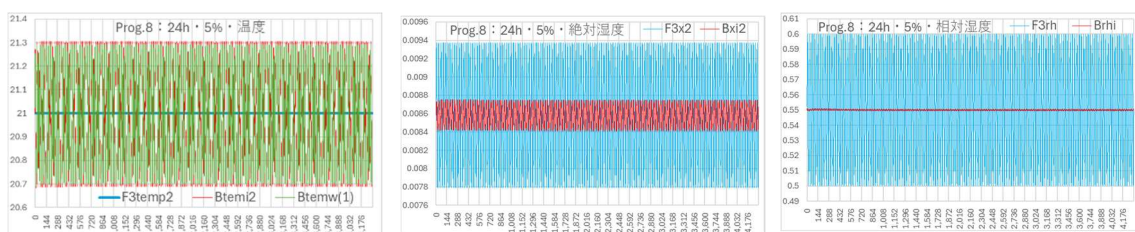


図 4-35 24 時間周期・相対湿度振幅 5% の場合の温度、絶対湿度、相対湿度

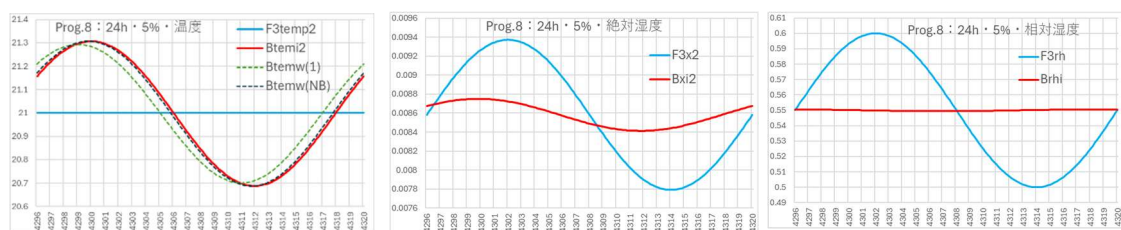


図 4-36 24 時間周期・湿度振幅 5% の場合(180 サイクル目)の温度、絶対湿度、相対湿度

- ・24 時間周期・相対湿度振幅 10% の場合：図 4-37, 図 4-38

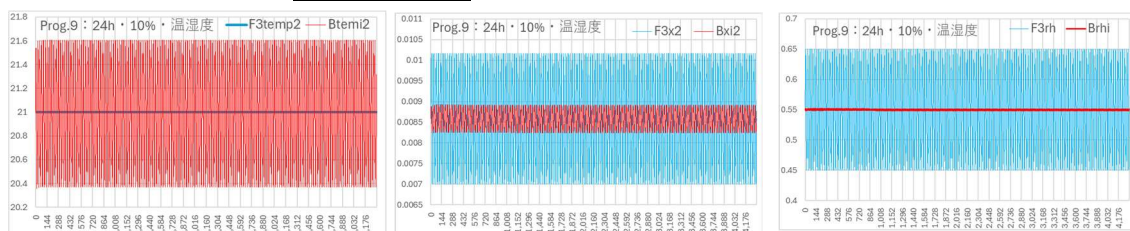


図 4-37 24 時間周期・相対湿度振幅 10% の場合の温度、絶対湿度、相対湿度

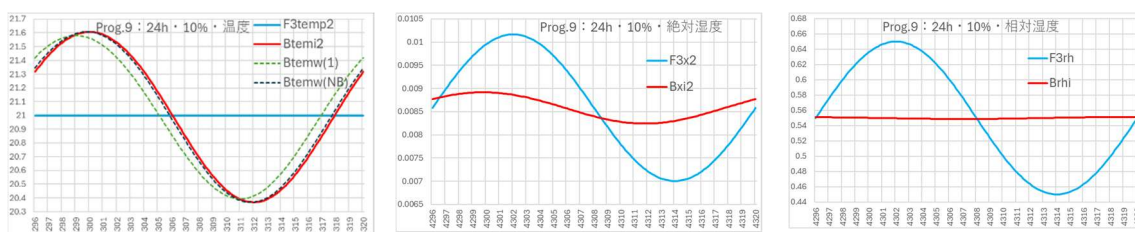


図 4-38 24 時間周期・相対湿度振幅 10%(180 サイクル目)の温度，絶対湿度，相対湿度

- ・ 24 時間周期・相対湿度振幅 1%の場合：図 4-39，図 4-40

ケース内温度は最高 21.062℃・最低 20.928℃（平均 20.995℃）で，平均は収蔵室温度 21℃にほぼ等しい．絶対湿度については，収蔵室は最高 0.008735kg/kg・最低 0.008425kg/kg（平均 0.00858kg/kg），ケース内は最高 0.008615kg/kg・最低 0.00855kg/kg（平均 0.008583kg/kg）で，やはり平均はほぼ等しい．

- ・ ケース内の相対湿度は収蔵室の相対湿度平均にほぼ等しい．

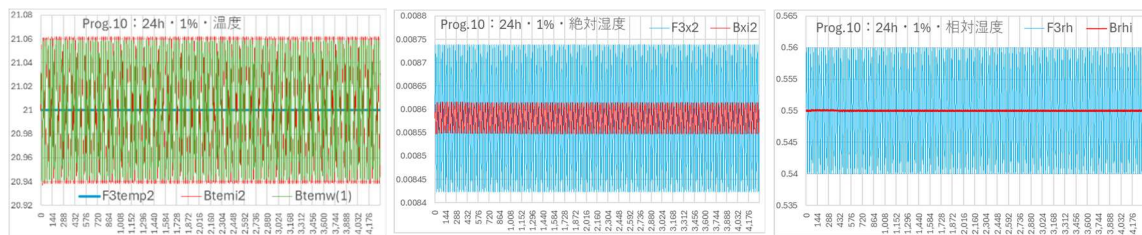


図 4-39 24 時間周期・相対湿度振幅 1%の場合の温度，絶対湿度，相対湿度

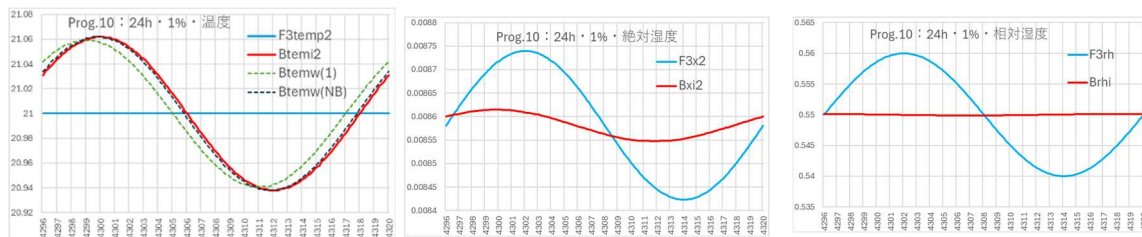


図 4-40 24 時間周期・湿度振幅 1%の場合(180 サイクル目)の温度，絶対湿度，相対湿度

- ・ 10%の場合 (0.115%,0.6℃)，5%の場合 (0.055%,0.3℃)，1%の場合 (0.01%,0.06℃) であり，少なくとも温度については，ほぼ線形に変化．(⇒これは修正前のデータ)

(2)相対湿度・720 時間周期・5%振幅：図 4-41，図 4-42

ケース内表面とケース内空気は平均 21℃・振幅 0.095℃，収蔵ケース外表面は平均 21℃・振幅 0.055℃を変化する．絶対湿度については，収蔵室は平均 0.00858 ± 0.0008 kg/kg，ケース内は平均 0.00858 ± 0.00015 kg/kg を変化する．温度，絶対湿度とも平均値はほぼ一致しているよう．

- ・ ケース内の相対湿度は，平均がほぼ 55%，振幅は 1.4%である．

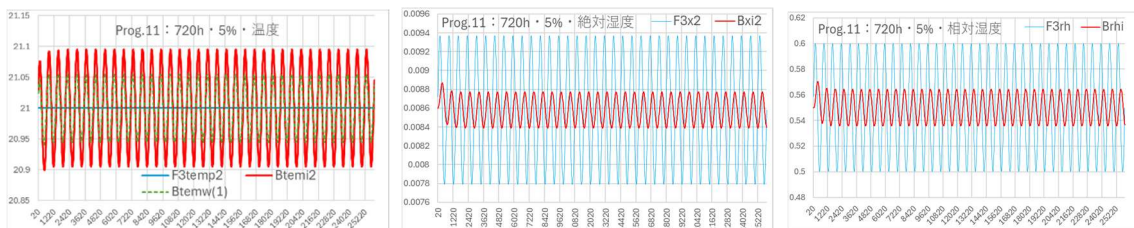


図 4-41 720 時間周期・相対湿度振幅 5%の場合の温度，絶対湿度，相対湿度

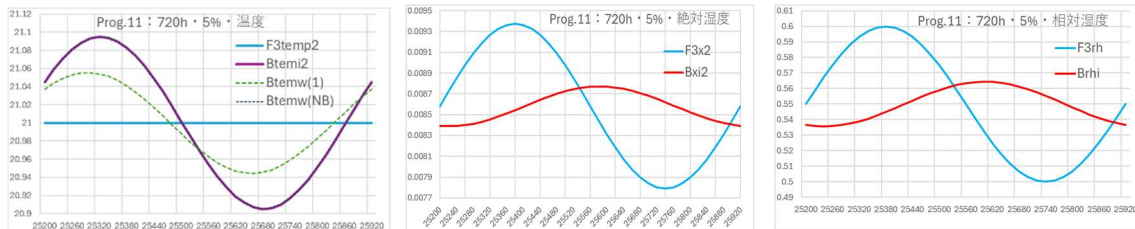


図 4-42 720 時間周期・湿度振幅 5% の場合(35 サイクル目)の温度，絶対湿度，相対湿度

(3) 中性紙箱の場合

- ・紙製収蔵ケース（厚さ 3mm の木製ケースで近似）の場合の結果については，省略。

(4) 入出力関係

- ・以上の結果（入力温度，入力相対湿度に対する出力のケース内相対湿度，温度）をまとめると，厚さ 21mm の木質材料，24 時間周期の場合，

温度入力－RH 出力：(1℃, 0.18%)，(5℃, 0.9%)，(10℃, 1.85%)⇒ほぼ直線増加

RH 入力－温度出力：(1%, 0.06℃, 0.001%)，(5%, 0.3℃, 0.055%)，(10%, 0.6℃, 0.115%)

⇒ほぼ直線変化

⇒近似的に線形化が可能

- ・収蔵室の相対湿度変化がケース内相対湿度変化に及ぼす影響は，主として収蔵ケース外側表面における吸脱着に伴う温度変化が，ケース内表面の温度上昇を惹き起こすことにより生じるものであり，従って，収蔵室相対湿度の変動の影響は収蔵室温度変動に換算可能である．この時の温度，相対湿度変化は，吸脱着を考慮した等価温度を導入することにより簡易に評価可能であろう。

(5) 収蔵ケースの温湿度調整性能の評価

① 温度調整能力

- ・収蔵室の温度変化に対して，収蔵ケースには 1 日より長い周期的温度変動を緩和する能力は殆ど無い．変動周期が短い程緩和能力は増加し，6 時間周期で 20%程度，1 時間周期で 80%程度の減衰となる．収蔵ケースの温度変動緩和能力は，時間レベルの短周期変動に対して有効と言える．
- ・収蔵室の相対湿度変化に関しては，相対湿度が 10%変化するとケース内温度変化幅は 0.6℃となる．その影響は實際上小さいと言える．長周期の 720 時間周期，5%変動の場合には，収蔵ケース外表面が振幅 0.06℃の変化をするのに対して，ケース内空気温度の振幅は 0.09℃で寧ろ大きい（内外熱伝達率の違いによるのだろう），温度変化の絶対量は小さく，実用上無視し得るだろう．結局，周辺の相対湿度変動により引き起こさ

れるケース内温度変動を、収蔵ケースは有効に抑制すると言える。

- ・結局、近傍環境の（日レベル以上の）長周期温度変動に対して、収蔵ケースは脆弱である。長周期の温度変動は（変動というより）ある意味で平均値のことであり、紙などの化学変化や汚染気体を発生する収蔵物などが問題となる。これは、収蔵室自体が対応すべき課題であろう。

②湿度調整能力

- ①収蔵室の温度変化に対するケース内相対湿度の変化は、24 時間周期の場合（1℃, 0.18%）、（5℃, 0.9%）、（10℃, 1.85%）であり、温度変化幅が大きくなるにつれて相対湿度変化幅はほぼ直線的に増加する。ただ、ここで扱っている木製収蔵ケースのように吸放湿性を有するケースの場合には、相対湿度変動はそれ程大きくない。入力周期が長周期の 720 時間周期の場合、ケース内の相対湿度の変化幅は 0.1%程度で、周期が 24 時間の場合の 1/10 程度であり、非常に小さい。
- ・入力温度変化がケース内絶対湿度に及ぼす影響は、収蔵室温度変化→ケース内側の温度変化→ケース内への放湿（と吸湿）→ケース内空気の湿度変化、という過程による（厚さ 21mm のヒノキの場合）。従って、その伝わる速度はほぼ熱と同じで速い。その大きさはケース材料の水分容量が大きければ材料には依存せず、熱力学的関係だけで定まる。その場合の温度変化に対する絶対湿度変化の比率は一定なので、入力温度変化がケース内湿度変化に及ぼす影響は容易に推定できる（収蔵物が無い場合）。その結果としての相対湿度変化はかなり小さい。
- ②入力相対湿度変化がケース内 RH 変化に及ぼす影響は、24 時間程度の短周期では（収蔵室 RH 変化：ケース内 RH 変化：ケース内温度変化）＝（1%, 0.001%, 0.06℃）、（5%, 0.055%, 0.3℃）、（10%, 0.115%, 0.6℃）であり、RH 変化幅は 1/100（温度変化幅は 0.6℃/10%）程度に減少し小さい。多くの使用状況下では、入力温度変化と比較して、入力相対湿度変化の影響は無視できる。
- ・相対湿度の周期が長周期 720 時間で 5%振幅の場合、ケース内振幅は 0.1%程度となり、（十分小さいが）周期が 24 時間の場合より大きい。これは長周期では（熱伝導ではなく）水蒸気の単純拡散が支配的現象になるためだろう。
- ・以上、いずれにしても入力相対湿度の変化はケース内 RH に大きな影響を持たない。

4.6.4.収蔵ケース（収蔵システム）の温湿度調整能力の向上策（第四段階）

(1)収蔵室の断熱・気密化

- ・収蔵ケースの温湿度調整能力が特に長周期において高くないことを考慮すると、収蔵室の温湿度、特に温度を適当な範囲内に保つことが第一に必要である。空調を前提にしない場合、断熱や気密化により温湿度変化を抑制することが非常に重要である。

(2)長周期の温度変動への対応

- ・収蔵室の長周期温度変動が避けられない場合には、高温のみあるいは低温のみに限定し

た対応を考慮する。

- ・長時間の高温への対応策

収蔵ケースの高温対策：収蔵庫（夜間は日中より温度が低いとする）との間の夜間換気を促進するような、収蔵ケース材料の熱湿気膨張を利用した収蔵ケースの設計

- ・長時間の低温への対応策（⇒どのような収蔵物で問題？）：高温への対策と同様に、日中に換気が促進されるような収蔵ケースの設計

(3)高湿度対策

- ・収蔵ケースの設計：収蔵庫との間で相対湿度の低い時間帯（日中中心）の換気が促進されるような収蔵ケースの設計⇒木製ケースで可能なはず
- ・収蔵ケースを非吸放湿性材料で構成し、収蔵ケースの中に適当な吸湿材料を設置：収蔵物自身の吸放湿に依存したくない。

(4)低湿度対策

- ・収蔵ケースの設計：収蔵庫との間で相対湿度の高い時間帯（夜間中心）の換気が促進されるような収蔵ケースの設計⇒木製ケースで可能なはず

4.7. 第4章のまとめ

収蔵ケースの温湿度調整性能を評価するために、関西に建つ博物館の収蔵室を対象として、3種類の収蔵ケースについてその内部とケース近傍の温湿度、収蔵室内の温湿度分布を詳細に測定し、それをベースに熱水分解析を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1)収蔵ケース内の温湿度を熱水分移動の式に基づいて計算し、測定値と良く一致する結果を得た。ただ、主に夏季に計算値の相対湿度が測定値より高い値となった。
- (2)差の原因を明らかにするために、各収蔵ケースの近傍にセンサーを設置し、近傍の温湿度を測定した。その結果を用いて収蔵ケースの温湿度を計算し直し、非常に良い一致（最大で3%程度の誤差）を得ることができた。それにより、収蔵室内の非一様な温湿度分布、特に垂直方向の分布が重要であることが分かった。
- (3)近傍温湿度を入力とした(2)の計算でも見られた誤差の原因として、センサー機種の違いが可能性として考えられた。収蔵ケース内と同じ機種のセンサーを近傍温湿度の測定にも用いたところ、誤差を説明する方向の違いが確認された。今後、更なる測定を進めると共に、それを考慮した解析をする必要がある。
- (4)収蔵ケースの温湿度調整能力を評価するため、収蔵室の温湿度が周期的な変化をする場合の収蔵ケースの熱水分移動解析を行った。その結果、厚さ21mmの木質材料、24時間周期の場合、温度入力とRH出力、RH入力ー温度出力との関係はほぼ線形と見なせる。収蔵室の相対湿度変化がケース内相対湿度変化に及ぼす影響は、主として収蔵ケース外側表面における吸脱着に伴う温度変化が、ケース内表面の温度上昇を惹き起こすことにより生じるものであり、収蔵室相対湿度の変動の影響は収蔵室温度変動に換算可能である。

収蔵ケース（収蔵システム）の温湿度調整能力の捉え方について検討し，能力向上策を提案した．