

I 博物館収蔵物の劣化状況調査と収蔵展示環境の最適設計制御に関する研究

第1章 研究目的

第2章 収蔵環境の室内温湿度およびエネルギー消費の調査と空調最適制御の検討

- 2.1. 本調査の目的
- 2.2. 対象美術館の概要と空調システム
- 2.3. 調査概要
 - 2.3.1 収蔵庫の温湿度設定の変更
 - 2.3.2 調査項目
- 2.4. 調査結果
 - 2.4.1. 空調設定温度変更時期に関する検討
 - 2.4.2 空調設定温度が収蔵庫環境に及ぼす影響
 - 2.4.3 熱源の消費電力
 - 2.4.4 空調設定温度が収蔵庫の熱負荷に及ぼす影響
 - 2.4.5 ダクトの熱取得
- 2.5. 2章のまとめ

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
- 3.2. 地下収蔵庫の概要
- 3.3. 収蔵庫の温湿度
 - 3.3.1. 測定概要と設置機器
 - 3.3.2. 収蔵庫内の温湿度の測定結果と考察
- 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
 - 3.4.2. 収蔵庫でのカビサンプリングの結果と考察
- 3.5. 第3章のまとめ

第4章 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
- 4.2. 測定位置・日時・方法
- 4.3. 3階特別収蔵室における温湿度測定結果
 - 4.3.1. 温度（図4-1）
 - 4.3.2. 相対湿度（図4-3, 4-4）
- 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
- 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
- 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
- 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
 - 4.5.2. 中性紙箱, 桐箱内外の温湿度測定値との比較
 - 4.5.3. 4階考古研究展示室のガラス展示ケース内外の温湿度測定結果との比較
 - 4.5.4. 近傍 RH 測定値が高い値を示すこと
 - 4.5.5. 異なるセンサー機種による近傍温湿度の測定
- 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
 - 4.6.2. 測定・解析結果 (第一段階、第二段階) のまとめ
 - 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)
 - 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)
- 4.7. 第4章のまとめ

第5章 文化財資料の劣化保存状態の調査

- 5.1. 目的
- 5.2. 研究の方針：環境基準作成の考え方と手順
 - 5.2.1. 手順
 - 5.2.2. 考え方
- 5.3. 検討事項
 - 5.3.1. シュミレーションモデル
 - 5.3.2. 劣化と収蔵物温湿度履歴との対応：評価指標の選択
 - 5.3.3. 収蔵物における多様性
 - 5.3.4. 文化財修理報告書の利用
- 5.4. 資料情報用テンプレート (検索カード)
 - 5.4.1. 検索カード作成の目的
 - 5.4.2. 検索カード作成の方針
 - 5.4.3. 検索カードの例
- 5.5. 検索カード (データベース) 作成のための基礎情報の調査
 - 5.5.1. 当博物館での調査・概要
 - 5.5.2. 宗教画
 - 5.5.3. 御帳台
 - 5.5.4. 貝飾り
 - 5.5.5. カルタ (絵馬)

- 5.5.6. 魚はい
- 5.5.7. 狛犬像
- 5.5.8. 墓室壁画
- 5.5.9. 明器馬具
- 5.5.10. 草履
- 5.5.11. 壺
- 5.5.12. 石膏模型
- 5.6. 御帳台の劣化調査
 - 5.6.1 御帳台⁴⁾について
 - 5.6.2 辿った経緯
 - 5.6.3. 劣化の観点からの御帳台概要
 - 5.6.4. 御帳台の現状調査：2024.4.6
 - 5.6.5. 御帳台の劣化変遷
 - 5.6.6. 今後すべきこと
 - 5.6.7. 資料
- 5.7. 宗教画
 - 5.7.1. 本資料検討の観点、方針：修理報告書を軸として
 - 5.7.2. 資料の辿った経緯
 - 5.7.3. 宗教画調査報告：〇〇調査報告(神庭ほか 1989)
 - 5.7.4. 修理報告書
 - 5.7.5. 劣化評価の観点
 - 5.7.6. 宗教画の劣化変遷
 - 5.7.7. 今後すべきこと
 - 5.7.8. 資料
- 5.8. 神於寺狛犬像の劣化検討
 - 5.8.1. 本資料の概要
 - 5.8.2. 辿った経緯
 - 5.8.3. 劣化評価の観点
 - 5.8.4. 劣化調査：2024.5.29
 - 5.8.5. 狛犬像の劣化変遷
 - 5.8.6. 今後の検討事項
 - 5.8.7. 資料
- 5.9 壺
 - 5.9.1. 本資料の概要
 - 5.9.2. 辿った経緯
 - 5.9.3. 劣化評価の観点

- 5.9.4. 劣化調査：2024. 5. 29
- 5.9.5. 土器の劣化変遷
- 5.9.6. 今後の検討事項・対応
- 5.9.7. 資料
- 5.10. 文学部陳列室の温湿度変化のシミュレーション
 - 5.10.1 プログラム概要
 - 5.10.2 計算結果：プログラム Exhibition1
 - 5.10.3 まとめ
- 5.11. 環境条件と劣化状態の時間経緯と定量的評価尺度の推定
 - 5.11.1 目的
 - 5.11.2 宗教画
 - 5.11.3 御帳台
 - 5.11.4 神於寺狛犬像
 - 5.11.5 土器（壺）
- 5.12. 第5章のまとめと今後の課題

第6章 今年度のまとめと今後の課題

博物館収蔵物の劣化状況調査と収蔵展示環境の最適設計制御に関する研究

1. 研究目的

本調査研究では、昨年度の調査に引き続き、温湿度制御の不具合やカビ・結露の発生、展示物や来館者の健康への影響、エネルギーの過大な消費が懸念される関西に建つ博物館と収蔵庫および関東地方の美術館を対象として、これらの課題の解決に向けて、(1)展示、収蔵スペースの空調・換気システムの運転とエネルギー消費の調査と空調最適制御の提案、(2)収蔵スペースの空気質環境の実態調査と文化財のカビクリーニングの影響、(3)収蔵室および収蔵ケース内の温湿度環境の実態調査と収蔵ケースの調湿効果の評価、(4)文化財資料の劣化保存状態の調査と環境要因との相関についての検討を行った。

第2章 展示、収蔵環境の室内温湿度およびエネルギー消費の調査と空調最適制御の検討

2.1. 本調査の目的

2022 年度まで、関西地方の博物館の展示室における AHU (Air Handling Unit; 空調機) の運転状況の把握、消費エネルギー削減の検討を行ってきた。2023 年度からは、博物館同様湿度の管理条件が厳しい美術館 (関東地方) において、空調機の運転状況調査および展示室・収蔵庫の温湿度および消費電力の測定を行い、資料保存の観点から室内環境が適切な範囲におさまっているか検討してきた。なお、対象美術館では、運営管理上の問題から空調機の間欠運転が行われており、空調機周りの様々なデータは BEMS (Building Energy Management System) により蓄積されている。

2024 年度は収蔵庫に着目し、熱負荷低減のため季節により設定温度を変更することとし、変更前後の測定結果に基づいて、室内温湿度と空調機で処理される熱負荷に与える影響について検討した。

2.2. 対象美術館の概要と空調システム

対象施設は、RC を主体構造とする、地下 1 階、地上 2 階建ての美術館である。収蔵庫は図 2-1 に示すように 1 階に 1 室、地下 1 階に 2 室存在し、収蔵庫 1 は 2 面が屋外に面する。対象とする館では企画展示のみ実施しており、主に来館者が滞在するエントランスや展示室の空調機の運用は、展覧会の会期や内容によって変化する。休館日の月曜日を除いた火曜日から日曜日の 9 時 30 分から 17 時まで開館している。

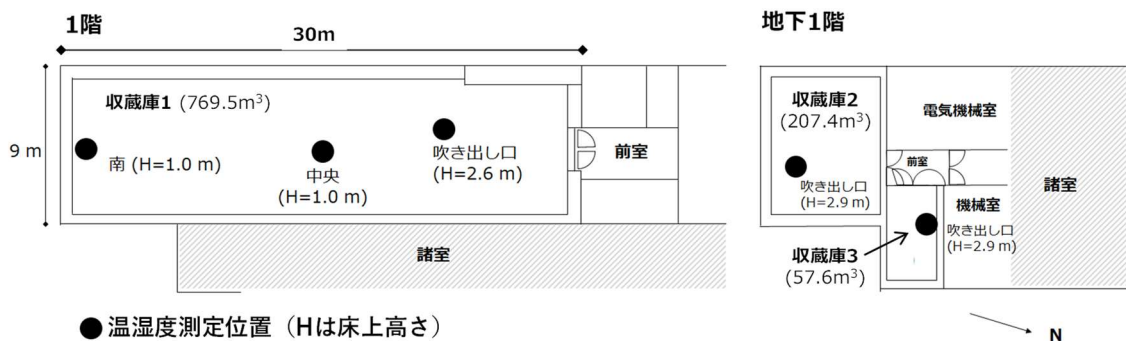


図 2-1 収蔵庫周辺の平面図と温湿度ロガーの設置位置 (地上 1 階・地下 1 階)

対象館の空調方式は、冷温水槽を有する中央集中方式を採用している。図 2-2 に空調システム全体の概要と空気調和機：エアハンドリングユニット（以下、AHU）の概要図を示す。熱源装置には冷温水同時供給可能型の熱回収式空冷ヒートポンプチャラー（以下、AHP）2 台が設置されている。AHU は全部で 5 系統あり、展示室で 2 系統（北・南）、ロビー・エントランスで 1 系統、収蔵庫 1 で 1 系統、収蔵庫 2・3 で 1 系統となっている。5 つの系統全て、フィルタ、冷却コイル、加熱コイル、電気蒸気加湿器、給気・還気ファンで構成されている。冷房運転時は、冷却コイルで空気の冷却・除湿を行い、その後加熱コイルで再熱する。暖房運転時は、加熱コイルで空気を加熱し、加湿器で相対湿度の調整が行われる。各 AHP と AHU の仕様を表 2-1 と表 2-2 にそれぞれに示す。

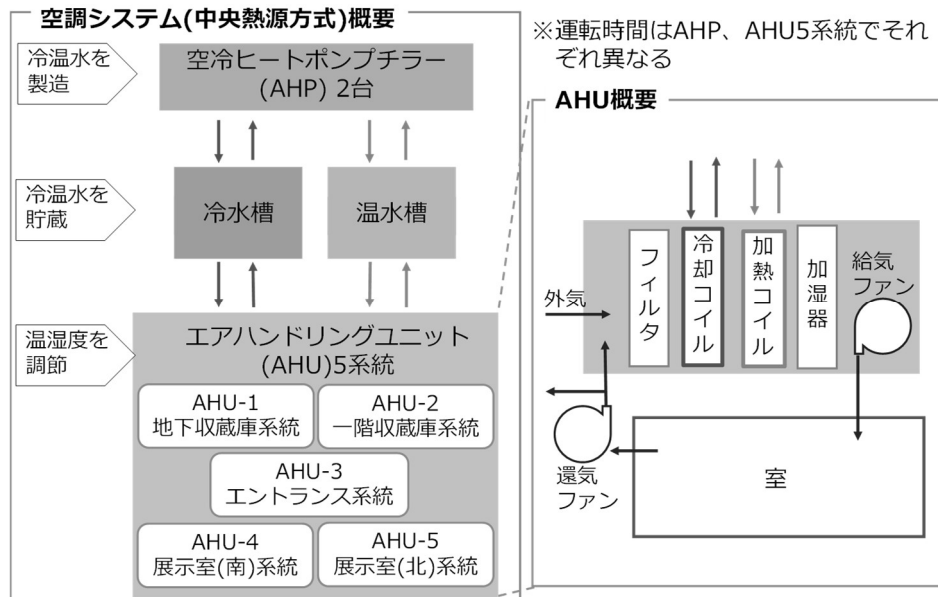


図 2-2 空調システム全体と AHU の概要

表 2-1 AHP の仕様

形式	熱回収式空冷ヒートポンプチャラー（冷温水同時供給可能形）	
冷却能力・定格消費電力	99 kW（冷水温度 7℃）	37.9 kW
加熱能力・定格消費電力	118 kW（温水温度 40℃）	39.7 kW
冷媒	R-407C	
容量制御	100～12－0%	

表 2-2 AHU の仕様

	台数	冷房能力	暖房能力	給気ファン	電気型 蒸気加湿器	還気ファン
展示室 (2 階)	2 台	31.2 kW 冷水 7℃ 90 L/min	22.3 kW 温水 40℃ 64 L/min	送風量 7500 m³/h 外気 720 m³/h 3.7 kW(定格電力)	8.1 kg/h 8.8kW (定格電力)	還気量 6780 m³/h 2.2kW(定格電力)
収蔵庫 1 (1 階)	1 台	15.8 kW 冷水 7℃ 45 L/min	18.9 kW 温水 40℃ 54 L/min	送風量 4200 m³/h 外気 200 m³/h 3.7 kW(定格電力)	3.1 kg/h 3.8kW (定格電力)	還気量 200 m³/h 1.5kW(定格電力)
収蔵庫 2 (地下 1 階)	1 台	15.1 kW 冷水 7℃	13.9 kW 温水 40℃	送風量 3000 m³/h 外気 200 m³/h	4.0 kg/h 3.8kW	還気量 2800 m³/h
収蔵庫 3 (地下 1 階)		43 L/min	40 L/min	2.2 kW(定格電力)	(定格電力)	0.75kW(定格電力)
ロビー・ エントランス (1・2 階)	1 台	44.5 kW 冷水 7℃ 128 L/min	29.8 kW 温水 40℃ 85 L/min	送風量 8600 m³/h 外気 950 m³/h 5.5 kW(定格電力)	9.3 kg/h 8.8kW (定格電力)	還気量 7650 m³/h 2.2kW(定格電力)

2.3. 調査概要

2.3.1 収蔵庫の温湿度設定の変更

熱負荷削減を意図し、夏季、冬季ともに室温の設定を変更した、その他時期によって AHU の運用時間も異なっており、詳細を表 2-3 に示す。

表 2-3 収蔵庫系統 AHU 目標温湿度・運用時間

時期	目標温度	運用時間
2021 年以前	22±2℃年間一定	平日 9～17 時
2021-22 冬季（12～3 月）	22±2℃	月～土曜 9～18 時 (9 時間)
2023 夏季（6～9 月）	22±2℃	
2024 夏季（6～9 月）	23±2℃	
2024-25 冬季（12～3 月）	20±2℃	
※目標相対湿度はすべての機関で 55±5%		

2.3.2 調査項目

対象館に設置されているビルエネルギー管理システム（以下、BEMS）を用いて、各 AHU 給気温湿度、室内制御点の温湿度、外気温湿度を 10 分間隔で測定した。各収蔵庫においては、図 2-1 に示す各室代表点と空調吹出し口付近に温湿度ロガー（T&D, RTR507BL）を設置した。

室内の温湿度に加え、外気の温度、相対湿度も敷地内の日射が当たらない場所で計測を行った（Onset, U23-001A）。収蔵庫内の測定の様子を図 2-3 に示す。



図 2-3 収蔵庫内の温湿度測定の様子（収蔵庫 2）

2.4. 測定結果

2.4.1 空調設定温度が収蔵庫環境に及ぼす影響

図 2-4 に、温度設定を $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ で運用した 2023 年の夏（5 月 1 日～9 月 30 日）と温度設定を $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ で運用した 2024 年夏季（5 月 1 日～9 月 30 日）の吹出口の温度を示す。両期間とも、目標湿度は $55\% \pm 5\%$ で、地下収蔵庫系統の AHU-1、一階収蔵庫系統の AHU-2 は日曜日を除く 9～18 時に運転していた。一階収蔵庫 1 と地下収蔵庫 2 に関しては、空調運転中の吹出温度が 2024 年の方が 1°C 前後高くなっていた。地下収蔵庫 3 に関しては吹出温度の差は明確には見られなかった。

その内地下の収蔵庫では、2024 年は 7 月上旬まで暖房運転が行われており（2023 年は 6 月中旬まで）、暖房時の吹出し温度は 2024 年の方が高くなった。地盤に接する地下収蔵庫では外気温上昇の影響が遅れて現れるため、冷房負荷削減のため夏に向けて設定温度を上げる際は、地上の収蔵庫よりも遅い時期にする必要があるといえる。



図 2-4 夏季の収蔵庫の空調吹出口の温度
(上) 2023/5/1-2023/9/30 (下) 2024/5/1-2024/9/30

2.4.2 空調設定温度が収蔵庫環境に及ぼす影響

(a) 夏季の収蔵庫内の温湿度環境

設定温度を従来通り $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ で運用した 2023 年夏季と、設定温度を 1°C 上げて $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ で運用した 2024 年夏季の結果を比較する。

2023 年夏季の代表的な期間として 8 月 8 日 (火) ～8 月 9 日 (水)、2024 年夏季の代表的な期間として 8 月 6 日 (火) ～8 月 7 日 (水) の収蔵庫 1～3 の各空調系統 (AHU-1、2) の制御に用いる温湿度 (以下、室内温湿度とする) と吹出温湿度の測定結果を図 2-5 に示す。

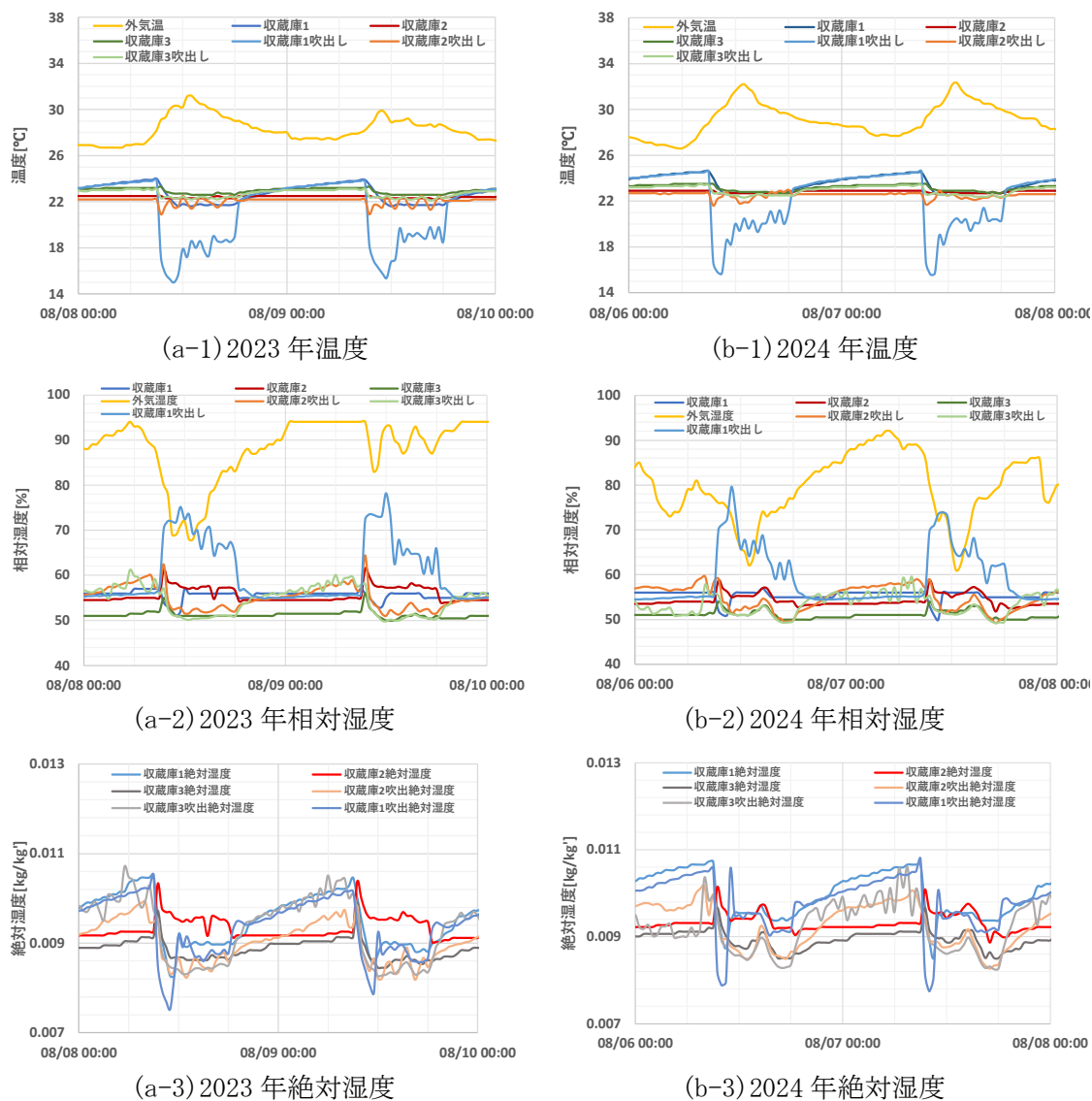


図 2-5 夏季代表期間の収蔵庫の室内および吹出し口の温度・相対湿度・絶対湿度

一階収蔵庫 1 に関しては、設定温度の変更により、18℃以下の低温で給気する時間が 1 日あたり 2 時間ほど減少した。室内環境については、両期間において空調運転開始時に低温乾燥した空気を吹き出すことに伴い一時的に相対湿度が 50%ほどまで急激に低下する。収蔵庫 2 に関しては、2023 年は空調運転開始時に相対湿度が急激に上昇し 60%を上回っていたが、設定温度を変更した 2024 年においては、空調運転開始時の湿度上昇が抑えられていた。夏季の設定温度を上げることで急激な温湿度変化を抑制し、室内環境を安定化させることができると考えられる。一方で、地下収蔵庫において空調機が停止している夜間に吹出口の相対湿度が上昇する傾向が見られた。

湿度環境を詳細に検討するため、図 2-5(a-3) (b-3)の絶対湿度に着目する。空調機運転開始時、一階収蔵庫 1 では絶対湿度が低下したのち再び上昇している。運転開始時に 15℃ほ

どの低温乾燥した空気が吹出されることに伴って一時的に相対湿度が低下するため、湿度を再び設定値に近づけるために加湿運転が行われたと考えられる。地下収蔵庫 2 では、運転開始時に絶対湿度が上昇したのち再び低下する傾向が見られた。空調吹出口が木で構成されているため、吹出し口やダクト内の温度が夜間に上昇することにより、吹出し口の木材が放湿を行い、ダクト内の絶対湿度が上昇している可能性がある。空調機稼働直後に、絶対湿度が高い空気が室内に吹出されることで室の絶対湿度が上昇するが、吹出し口付近の温度が低下することにより木材が吸湿し始めるので、再び絶対湿度が低下していると考えられる。

(b) 冬季の収蔵庫内の温湿度環境

設定温度を従来通り $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ で運用した 2021～2022 年冬季と、設定温度を 2°C 下げて $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ で運用した 2024～2025 年冬季の結果を比較する。

2021～2022 年冬季の代表的な期間として 2022 年 2 月 2 日（水）～2 月 3 日（木）、2024～2025 年冬季の代表的な期間として 2025 年 2 月 5 日（水）～2 月 6 日（木）の収蔵庫 1～3 の各空調系統（AHU-1、2）の制御に用いる温湿度（以下、室内温湿度とする）と吹出温湿度の測定結果を次頁図 2-6 に示す。なお、2025 年度の収蔵庫 1 については室内での吹出し温度が欠測したため、空調機の給気温度を示している。

一階収蔵庫 1 に関しては、設定温度の変更により 30°C 以上の高温乾燥した空気を吹き出す時間が 1 日あたり 1.5 時間ほど減少した。室内環境については、空調運転開始時の温度上昇幅が 2022 年は 3°C 前後であったが、2025 年は 1°C 前後に抑えられていた。地下収蔵庫に関しては、2022 年は空調運転開始時に収蔵庫 2 では 27°C 前後、収蔵庫 3 では 23°C ほどで給気していたが、設定温度を変更した 2025 年においては、どちらも 22°C 前後で給気していた。また、収蔵庫 2 において、2022 年は空調機運転時間中吹出し口付近の相対湿度が常に 50% 以下となっていたが、2025 年は 50% 以下となるのは運転開始時の高温給気時のみであった。室内環境については、空調運転開始時の温度上昇幅が両収蔵庫ともに 2022 年は 2°C 前後であったが、2025 年は $0.5 \sim 1^{\circ}\text{C}$ 程度に抑えられていた。冬季の設定温度を下げることで急激な温湿度変化を抑制し、室内環境を安定化させることができると考えられる。

湿度環境を詳細に検討するため、図 2-6(a-3) (b-3) の絶対湿度に着目する。一階、地下収蔵庫共に設定温度の変更により、空調機運転時間中の室内絶対湿度が低下している。設定温度の変更により必要加湿量が減少したため、エネルギー消費の削減にも寄与する可能性がある。

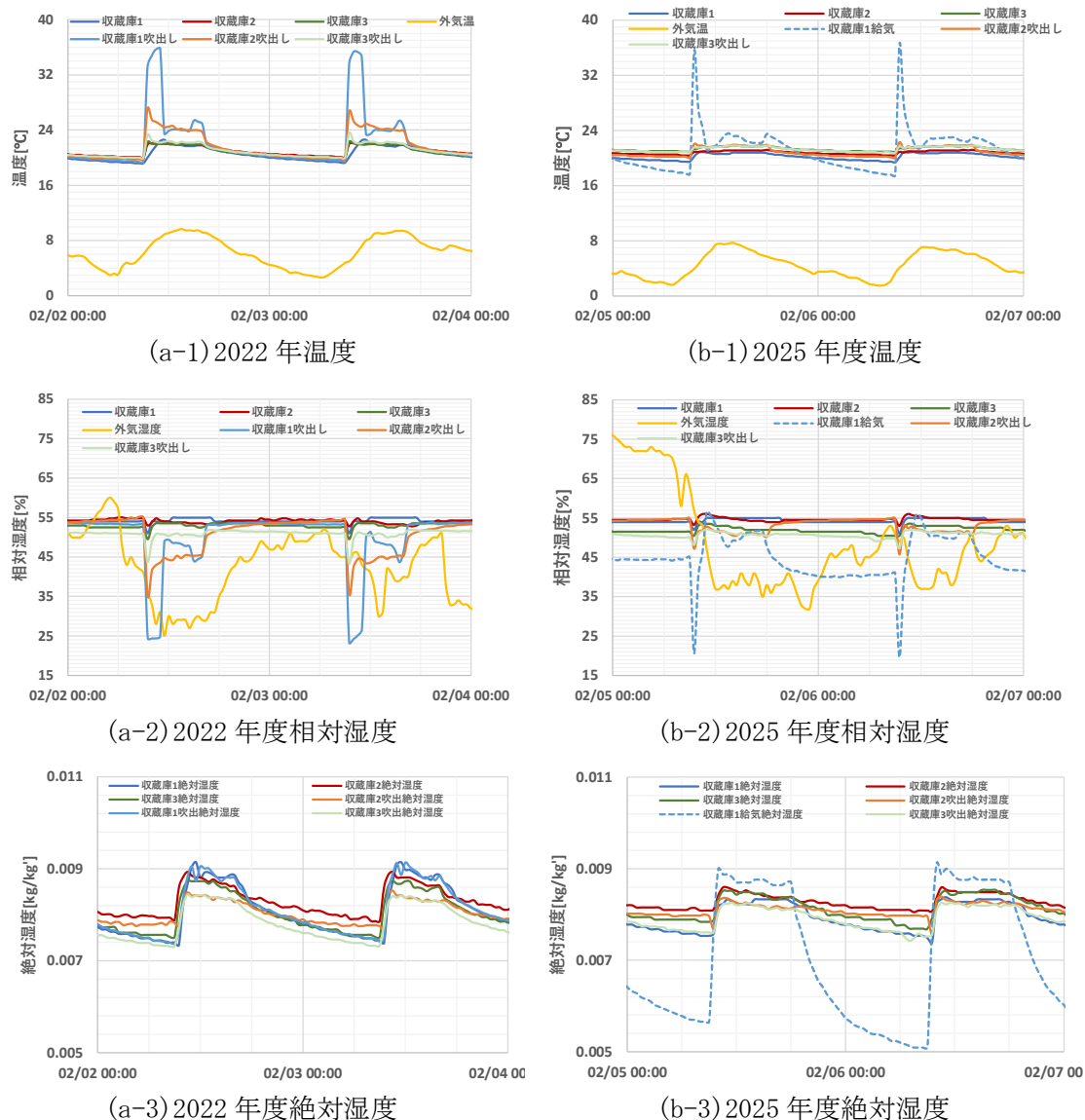


図 2-6 冬季代表期間の収蔵庫の室内および吹出し口の温度・相対湿度・絶対湿度

2.4.3 熱源の消費電力

AHU に冷温水を供給する AHP の運用方法は時期によって異なるが、9～18 時の最大 9 時間（2022 年冬季は最大 7 時間）、月曜日～土曜日に運転しており、日曜日は停止する（2022 年冬季は土曜・日曜に停止、2024 年夏季は日曜にも運転することがあった）。図 2-7 に、2023 年夏季の代表的な一週間（8 月 7 日（月）～8 月 13 日（日））と 2024 年夏の代表的な一週間（8 月 5 日（月）～8 月 11 日（日））、2022 年冬の代表的な一週間（2 月 7 日（月）～2 月 13 日（日））と 2025 年冬の代表的な一週間（2 月 3 日（月）～2 月 9 日（日））の AHP における日積算消費電力量を示す。

図 2-6 に示した各時期の代表的な一週間の積算消費電力では、それぞれ設定温度を変更した後、夏季で 1.7%、冬季で 6.7%消費電力が低下した。AHP で作られた冷温水は冷水槽・温水槽に貯められた後、各 AHU に供給されること、収蔵庫よりも熱負荷の大きい展示室やエントランス・ロビーの AHU にも冷温水を供給するため、消費電力の低下が収蔵庫の温度設定の変更によるものと明確には言えないため、次節では収蔵庫の AHU の処理熱量に着目して検討する。

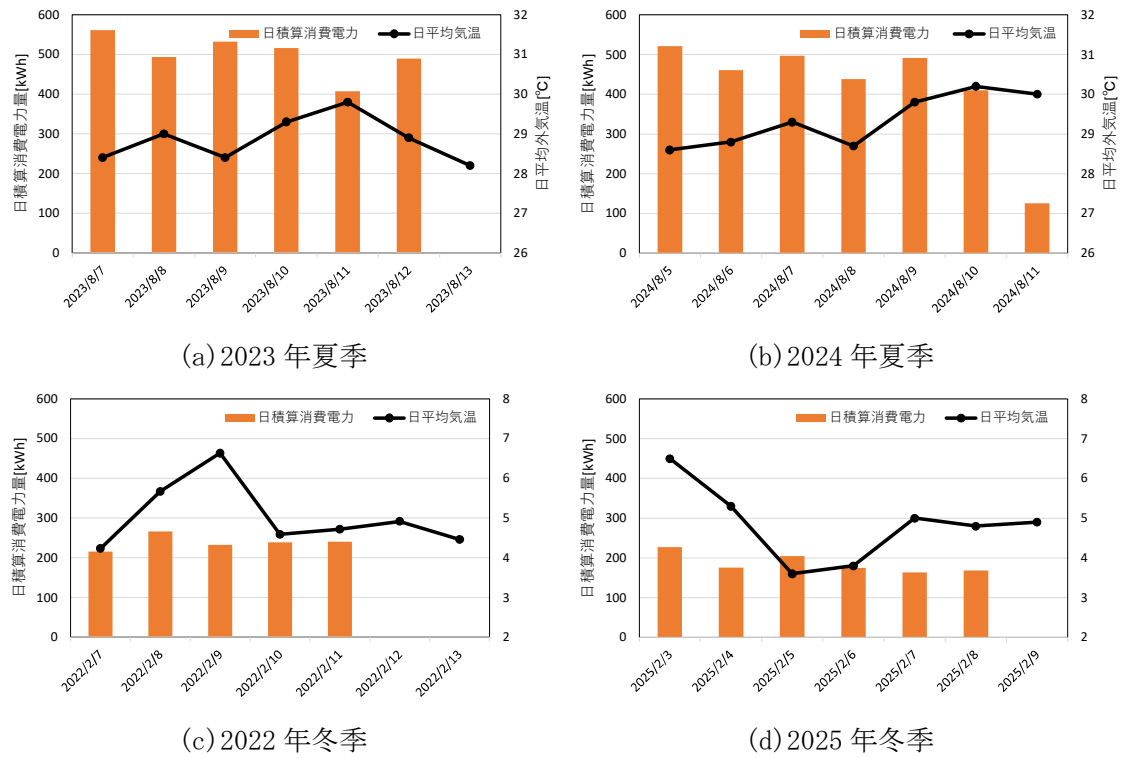


図 2-7 夏季・冬季代表期間の熱源 AHP の消費電力と日平均外気温

2.4.4 空調設定温度が収蔵庫の熱負荷に及ぼす影響

収蔵庫系統 (AHU-1、2) における全熱・顕熱・潜熱処理量を、給気温湿度と室内温湿度 (還気と想定) の測定結果から式(1)～(7)を用いて算出した。

$$Q_t = G\rho_a(h_{SA} - h_{MA}) \quad (1)$$

$$Q_s = C_a\rho_a G_a(T_{SA} - T_{MA}) \quad (2)$$

$$Q_l = \rho_{da} G_a(x_{SA} - x_{MA})L_w \quad (3)$$

$$T_{MA} = (1 - \eta)T_{RA} + \eta T_{OA} \quad (4)$$

$$x_{MA} = (1 - \eta)x_{RA} + \eta x_{OA} \quad (5)$$

$$h_{MA} = (1 - \eta)h_{RA} + \eta h_{OA} \quad (6)$$

$$h = C_{da}T + (L_w + C_wT)x \quad (7)$$

記号			添え字		
C:比熱[J/kgK]	h:比エンタルピー[J/kg']	η :外気導入率[-]	a:空気	w:水	t:全熱
T:温度[°C]	L:蒸発潜熱[J/kg]	Q:熱量[J/s]	da:乾燥空気	SA:給気	s:顕熱
ρ :密度[kg/m³]	x:絶対湿度[kg/kg']	G:流量[kg/s]	MA:混合空気	RA:還気	l:潜熱

(a) 夏季の収蔵庫の負荷

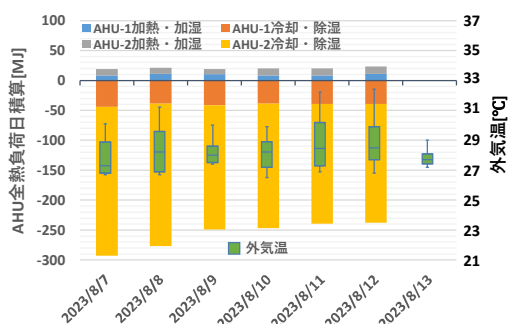
図 2-8(a-1) (b-1)に、2023 年夏の代表的な一週間(8 月 7 日(月)～8 月 13 日(日))と、2024 年夏の代表的な一週間(8 月 5 日(月)～8 月 11 日(日))の全熱負荷 Q_t を、稼働時間で日積算した値を示す。正の値は加熱・加湿側の処理、負の値は冷却・除湿側の処理を示す。ここで、 Q_t は AHU 出入口空気の温湿度から算出した正味の熱処理量であり、除湿のための過度の冷却と再熱を分けて考えられてはいない。

2023 年において、地下収蔵庫系統 AHU-1 では 39～44MJ の冷却・除湿と 8.3～11MJ の加熱・加湿を行っていた。一階収蔵庫系統 AHU-2 では 198～248MJ の冷却・除湿と 9～12MJ の加熱・加湿を行っていた。2024 年においては、AHU-1 で 32～36MJ の冷却・除湿と 7.2～10MJ の加熱・加湿を行い、AHU-2 では 175～219MJ の冷却・除湿と 6.8～11MJ の加熱・加湿を行っており、収蔵庫の設定温度変更により収蔵庫全体で一日約 30MJ 負荷が小さくなっていた。また、収蔵庫系統 AHU が停止する日曜日の蓄熱負荷を処理する必要があるため、月曜日の負荷が他の曜日と比較して大きくなっていた。

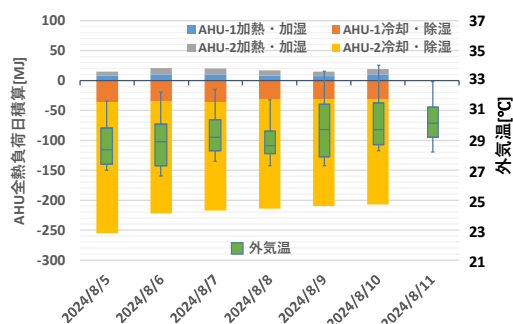
図 2-8(a-2) (b-2) (a-3) (b-3)に、同期間の顕熱・潜熱処理量(それぞれ Q_s 、 Q_l)を稼働時間で日積算した値を示す。顕熱については、2023 年の地下収蔵庫系統 AHU-1 では 301～318MJ の冷却と 272～295MJ の加熱・再熱を行っていた。一階収蔵庫系統 AHU-2 では 245～292MJ の冷却と 17～30MJ の加熱・再熱を行っていた。2024 年においては、AHU-1 で 136～240MJ の冷却と 103～208MJ の加熱・再熱を行い、AHU-2 では 224～276MJ の冷却と 15～25MJ の加熱・再熱を行っていた。潜熱について、2023 の地下収蔵庫系統 AHU-1 では 14～19MJ の除湿と 6.8～9.6MJ の加湿を行っていた。一階収蔵庫系統 AHU-2 では、2.4～7.5MJ の除湿と 30～38MJ の加湿を行っていた。2024 年においては、AHU-1 で 1.5～4.1MJ の除湿と 8.8～12MJ の加湿を行い、AHU-2 では 6.5～9.1MJ の除湿と 33～39MJ の加湿を行っていた。

これらの結果から、収蔵庫の設定温度変更により、地下収蔵庫では除湿負荷と除湿に係る冷却・加熱量が減少する傾向が見られた。温度変更により必要除湿量が低下したため、除湿運転を行う時間が減少したためと考えられる。しかし、除湿後に再加湿を行っていた場合、除湿量を過小に見積もっている可能性があるため、加湿器の稼働状況を調べる必要がある。一階収蔵庫では、温度変更により冷却負荷が減少する傾向が見られたものの、両期間とも加

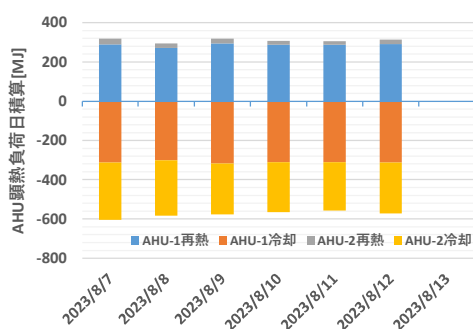
湿寄りの運転を行っていたため、潜熱負荷や再熱に係る負荷に大きな差は見られなかったと考えられる。



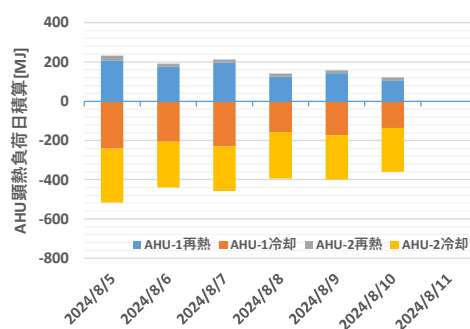
(a-1) 2023 年全熱



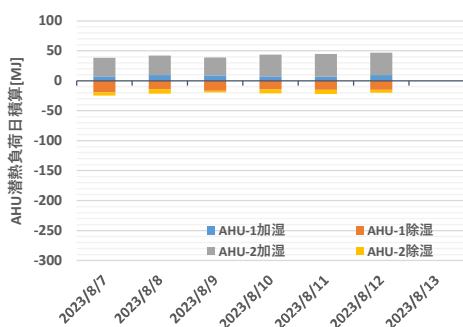
(b-1) 2024 年全熱



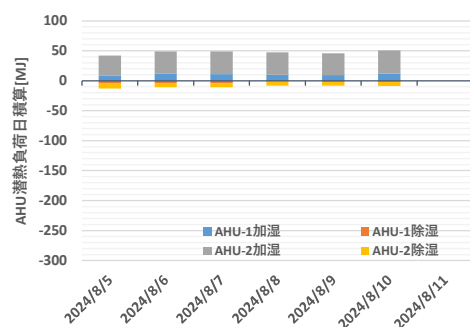
(a-2) 2023 年顕熱



(b-2) 2024 年顕熱



(a-3) 2023 年潜熱



(b-3) 2024 年潜熱

図 2-8 夏季代表期間の収蔵庫の全熱・顕熱・潜熱負荷日積算値

(b) 冬季の収蔵庫の負荷

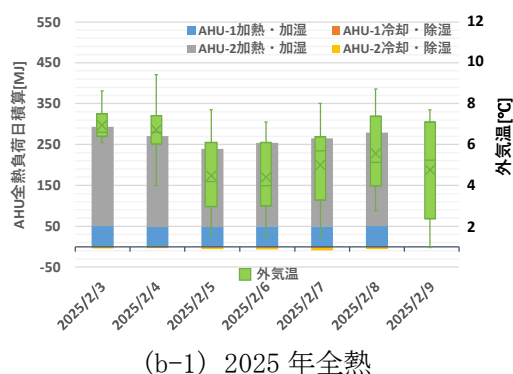
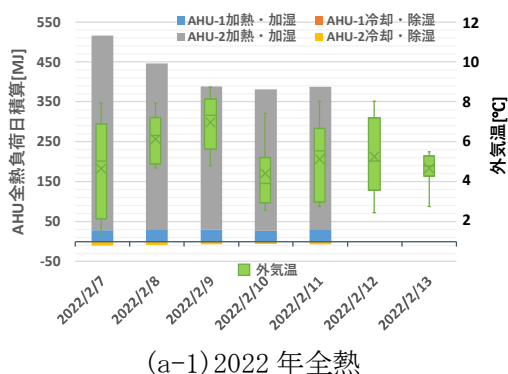
図 2-9(a-1) (b-1) に、2022 年冬の代表的な一週間 (2 月 7 日 (月) ~2 月 13 日 (日)) と、2025 年冬の代表的な一週間 (2 月 3 日 (月) ~2 月 9 日 (日)) の全熱負荷の稼働時間で日積算した値を示す。2022 年において、地下収蔵庫系統 AHU-1 では 26~30MJ の加熱・加湿を、一階収蔵庫系統 AHU-2 では 354~487MJ の加熱・加湿を行っていた。2025 年においては、AHU-1 で 48~51MJ の、AHU-2 では 190~242MJ の加熱・加湿を行っており、収蔵庫の設定温度変更により収蔵庫全体で一日 120MJ 以上負荷が小さくなっていた。夏季同様、

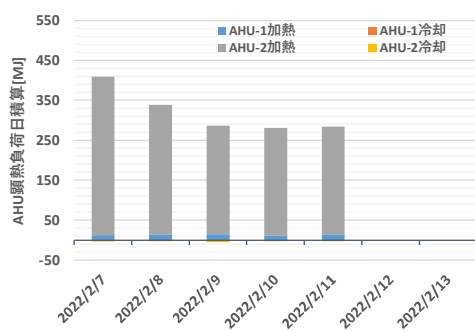
月曜日の負荷が他の曜日と比較して大きくなっているが、収蔵庫系統 AHU が停止する週末の蓄熱負荷を処理する必要があるためだと考えられる。また、計算過程でわずかに冷却・除湿側の値が生じるが、計測用センサの応答速度による影響と考えられる。

図 2-9 (a-2) (b-2) (a-3) (b-3) に、同期間の顕熱・潜熱処理量を稼働時間で日積算した値を示す。顕熱について、2022 年の地下収蔵庫系統 AHU-1 では 10～14MJ の、一階収蔵庫系統 AHU-2 では 270～396MJ の加熱を行っていた。2025 年においては、AHU-1 で 28～31MJ の加熱を行い、AHU-2 では 138～186MJ の加熱を行っていた。潜熱について、2022 年の地下収蔵庫系統 AHU-1 では 15～18MJ の、一階収蔵庫系統 AHU-2 では、57～62MJ の加湿を行っていた。2025 年においては、AHU-1 で 18～20MJ の、AHU-2 では 36～41MJ の加湿を行っていた。

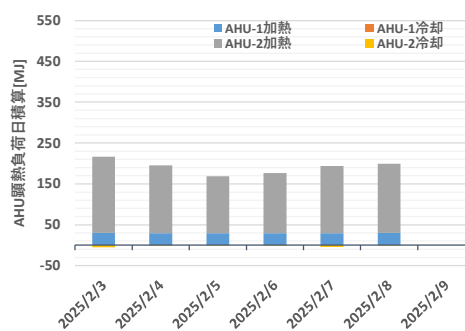
これらの結果から、収蔵庫の設定温度変更により、地下収蔵庫では加熱・加湿負荷が共に増加し、一階収蔵庫では加熱・加湿負荷が共に減少する傾向が見られた。2022 年の地下収蔵庫においては、収蔵庫 2 の吹出し温度が収蔵庫 3 よりも 2℃程度高くなっていたため、収蔵庫 2 に吹き出す前に加温コイルで別途加温された可能性がある。

ここで示した顕熱負荷には加温コイルでの加熱分を含めていないため、実際より顕熱負荷を小さく見積もっている可能性がある。また、空調機運転時間が一時間長くなったことが地下収蔵庫の負荷の増加につながった可能性がある。一階収蔵庫では、温度変更により高温で給気する時間が減少したほか、必要加湿量が減少したため負荷が減少したと考えられる。

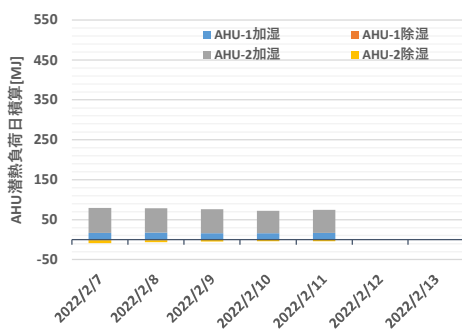




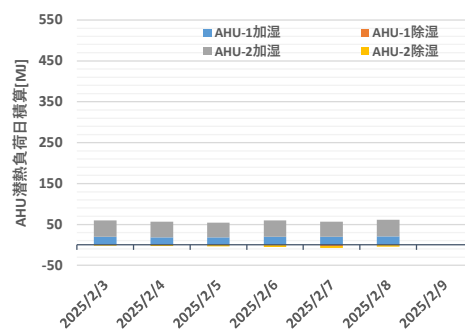
(a-2) 2022 年顕熱



(b-2) 2025 年顕熱



(a-3) 2022 年潜熱



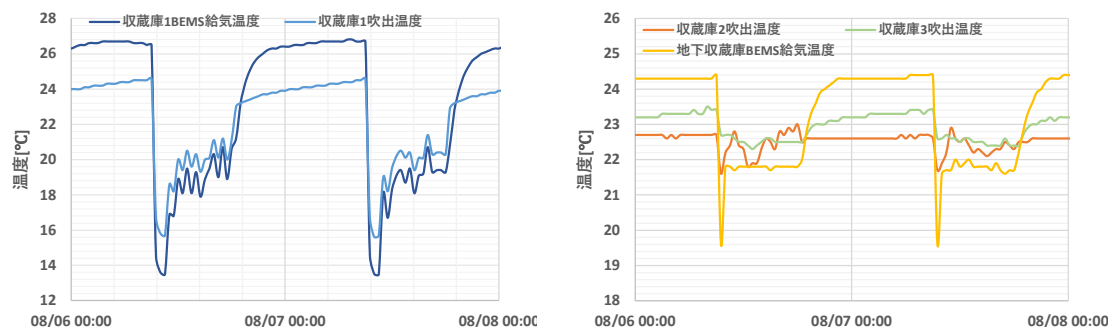
(b-3) 2025 年潜熱

図 2-9 冬四季代表期間の収蔵庫の全熱・顕熱・潜熱負荷日積算値

2.4.5 ダクトの熱取得

室の吹出し温度を詳細に検討したところ、AHU の給気温度との間に差があることが確認された。図 2-10 に、2024 年 8 月 6 日（火）～8 月 7 日（水）の吹出口の温度と BEMS で測定している給気温度の測定結果を示す。

一階収蔵庫では、空調機の運転開始時に 2℃ほど吹出口の空気温度が高くなる傾向がある。それ以降の空調機運転中は 0.5℃～1.5℃ほど吹出口温度が高くなっている。AHU で空気温度が調節された後、吹出口に送る際にダクトで熱取得が生じており、温度が上昇している可能性がある。これにより過剰に冷却する必要が生じており負荷が増大するため、ダクトの断熱性能の向上などの対策を行うことで負荷を減らすことができると考えられる。地下収蔵庫では、空調運転開始時には 2～3℃ほど、それ以降の運転時間中は最大で 1.5℃ほど吹出口の空気温度が高くなっている。地下収蔵庫は AHU からの距離が近く、途中に加温のためのコイルがあることから、給気温度と吹出し温度の差がダクトでの熱取得によるものとは判断しかねるため、加温コイルの稼働状況を調べる必要がある。



(a) 一階収蔵庫

(b) 地下収蔵庫

図 2-10 収蔵庫の給気温度と吹出口温度

2.5. 2章のまとめ

・収蔵庫の空調吹出口の温湿度

地下の収蔵庫では、2024 年は 7 月上旬まで暖房運転が行われており（2023 年は 6 月中旬まで）、暖房時の吹出し温度は 2024 年の方が高くなった。地盤に接する地下収蔵庫では外気温上昇の影響が遅れて現れるため、冷房負荷削減のため夏に向けて設定温度を上げる際は、地上の収蔵庫よりも遅い時期にする必要があるといえる。

・収蔵庫内の温湿度環境

地上の収蔵庫では、設定温度の変更により 18°C 以下の低温で給気する時間が 1 日あたり 2 時間ほど減少し、両期間において空調運転開始時に低温で乾燥した空気を吹き出すことに伴い、相対湿度は 50% 程度まで急激に低下した（設定相対湿度は $55 \pm 5\%$ ）。地下の収蔵庫では、2023 年は空調運転開始時に相対湿度が急激に上昇し 60% を上回ったが、設定温度を変更した 2024 年は、空調運転開始時の湿度上昇が抑えられ、1 日を通して目標温湿度範囲に収まっていた。夏季の設定温度を上げることで急激な温湿度変化が抑制され、室内環境は安定した。一方、空調機が停止する夜間に吹出し口の相対湿度が上昇する傾向が見られた。地下収蔵庫は吹出し口が木材で構成されているため、吹出し口が吸放湿することで、空調運転開始直後に室内の絶対湿度が急変動する可能性が示された。この変動が収蔵物の吸放湿およびそれに伴う変形に影響しないかどうか、今後詳細に検討する必要がある。

・空調機が処理する負荷

温度設定を $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ で運用した 2023 年夏と、温度設定を $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ で運用した 2024 年夏の収蔵庫系統 AHU における負荷を、測定した温湿度と装置の定格風量から算出した。収蔵庫の設定温度変更により収蔵庫全体で一日約 30MJ ほど負荷が小さくなっていることが確認できた。また、AHU が停止する日曜日の蓄熱負荷を処理する必要があるため、月曜日の負荷が他の曜日比べて大きくなることがわかった。

・ダクトの熱損失・熱取得

AHU の給気温度（装置出口の空気温度）と、ダクトを通して室内に送られた後の室内吹出し口温度を比較すると、一番大きな収蔵庫では夏季に 0.5℃～1.5℃ほど吹出し口温度が高くなることがわかった。逆に冬季は約 1℃吹出し口の空気温度が低くなる傾向があった。AHU で空気温度が調節された後、吹出口に送る際にダクトで熱取得や熱取得が生じており、温度が変化している可能性がある。これにより過剰に冷却・加熱する必要が生じており負荷が増大するため、ダクトの断熱性能の向上などの対策を行うことで負荷を減らすことができると考えられる。

・今後の課題

収蔵庫の外皮の断熱・気密性能、内装材および収蔵物の熱容量と吸放湿性能、空調機の吹出し温湿度が収蔵庫内温湿度に与える影響について詳細に検討するために、室内温湿度を予測する数理モデルを作成中である。あわせて、空調機が処理する負荷を計算するモデルも作成し、より効率よく空調を行うことができる制御条件を検討する予定である。

参考文献

- 1) 環境省 2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて
https://www.env.go.jp/earth/2050carbon_neutral.html (2025/3/4 参照)
- 2) 永吉 敬行 他：美術館におけるエネルギー消費の実態に関する研究（第 1 報）建物・設備概要 および竣工後 1 年間の 1 次エネルギー消費量の実績値、 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 8 巻、 p113-116、2022
- 3) 水谷 悦子 他：博物館・美術館の夏季の空調消費エネルギー量と空調設定温度が冬季の収蔵庫内環境に及ぼす影響、保存科学、第 63 号、pp55-66、2024
- 4) 田中琴巳 他：美術館の温湿度環境とエネルギー消費の調査および改善方法の提案、令和 6 年度大会（佐賀）学術講演論文集、pp. 193-196、2024