

〔報告〕 博物館・美術館における冬季の空調消費 エネルギー量と間欠運転時の収蔵庫内環境

水谷 悦子・伊庭 千恵美*・相馬 静乃・秋山 純子

1. はじめに

博物館・美術館において文化財の保存環境の構築と空調設備（以下、空調機）の運用に係るエネルギー消費のバランスを如何に取るかは重要な課題である。

これまで日本国内の博物館・美術館における消費エネルギーに関する問題は、館の経済的状況、設備の老朽化といった個別の館の事情としての側面が強く、文化財保存の分野の中での議論は限られていた。しかしながら、気候変動問題への対応として2050年カーボンニュートラルに向けた基本的な考え方等を示す「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」が2021年に閣議決定されるなど¹⁾、消費エネルギーの削減は社会的に喫緊の課題となっている。実際に日本国内では、地球温暖化対策推進法や建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律（建築物省エネ法）など、脱炭素社会に向けた様々な法律の策定および適用範囲の拡大が進んでおり、美術館・博物館等の文化財の展示・収蔵施設においても、より少ない消費エネルギーでの施設運用が求められていくであろう。

建物の消費エネルギーを削減するための根本的な対策としては、建物の断熱・気密性能を高めることや、効率の良い設備を利用することなどが挙げられる。既存施設においてこれらの対策を取るには、改修工事が必要であり、効果的な改修を行う上では事前に現状の消費エネルギーに影響を与えている要素を明らかにし、そのうえで長期的な戦略を立てることが望ましい。改修工事なしに取り組める対応としては、空調機の運転時間や設定温湿度といった空調機の運用方法によるものになるが、展示・収蔵されているものの種類（望ましい環境とはどうあるべきか）、建物の外被性能、空調システムによって有効な対応が異なる。

一方で対策案を検討しようにも、国内の博物館・美術館のエネルギー消費の測定事例で参照可能なものは非常に限られている²⁾。日本建築学会のデータベースおよび空気調和・衛生工学会の論文集では建築環境・設備分野による検討事例として7件^{注1)}の報告が確認されたが³⁻⁹⁾、これらは設備のエネルギー消費に注目し、博物館・美術館特有の施設の運用特性や文化財の保存環境の維持といった観点での検討が不足している。文化財の保存環境の構築と消費エネルギーの削減という相反する要求を満たすには、まずは建物の外被性能、空調の消費エネルギー、さらに博物館における施設の運用特性に関する情報を把握し、それらの関係を分析することが必要である。

本報では、こうした課題解決に向けた最初の一歩として、空調機の間欠運転を行っている美術館を対象に、熱源装置の冬季の消費エネルギーと収蔵庫内の温湿度環境の測定を行ったので、その結果を報告する。また測定結果から、対象施設におけるエネルギー消費の削減の観点と収蔵庫内環境の安定化に向けた対策案を考察する。

* 京都大学大学院工学研究科

2. 対象施設の建物・空調の概要と測定方法

2-1. 対象施設の概要

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。主要な室の仕様を表1に示す。収蔵庫は1階に1室、地下1階に2室、展示室は2階に存在する。3室ある収蔵庫は表1および図1に示す通り、室容積が大きく異なる。また収蔵庫1は2面が屋外に面している。熱貫流率は、壁体の熱の伝えやすさを示す値であり、小さいほど断熱性が高いことを意味している。ここでは図面に記載されていた壁体構成を元に文献値¹⁰⁾を用いて算定した。

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。

2-2. 空調システム概要

対象施設の空調システムは中央集中方式を採用している。空調システムおよび空調調和機の模式図を図2に示す。空調システムは、大きく分けると空気を冷却・加熱するための冷温水を作成する熱源装置、熱源装置で製造した冷温水を溜めておくための冷温水槽、空気を適切な温度・相対湿度に調整し、各室に送る空気調和機：エアハンドリングユニット（以下、AHU）から成る。熱源装置には、冷温水を同時に供給可能な熱回収式空冷ヒートポンプチャラー（以下、空冷 HP チャラー）2台が設置されており、その仕様を表2に示す。

館内の空調機の系統は5つに分かれており、表3に各系統の AHU の仕様を示す。5つの系統全て、フィルター、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、冷却コイルで空気を冷やすことで余分な湿気を除去し、その後加熱コイルで適温に調整する。暖房運転時は、加熱コイルで空気を適温まで温め、加湿器で相対湿度の調整が行われる。

測定期間中は、空冷 HP チャラーは休館日によらず平日の9：00-17：00にのみ稼働している。

表1 主要な室の仕様

室	階	容積 [m ³]	主要な壁の熱貫流率 U [W/m ² K]
企画展示室	2階	1809	0.91
収蔵庫1	1階	769.5	1.25
収蔵庫2	地下1階	207.36	1.44
収蔵庫3	地下1階	57.6	1.44

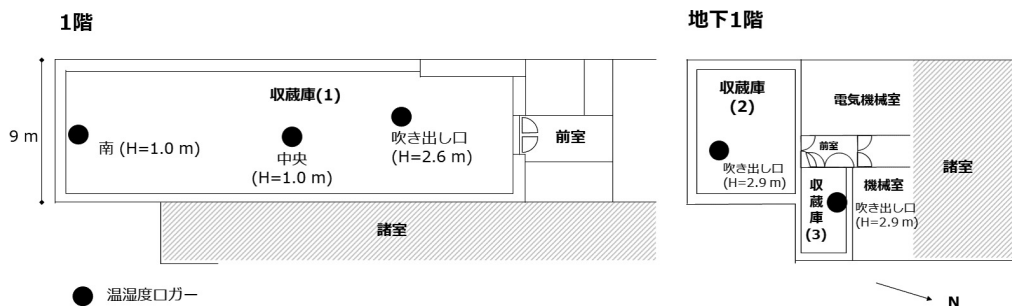


図1 収蔵庫周辺の平面図と温湿度ロガーの設置位置

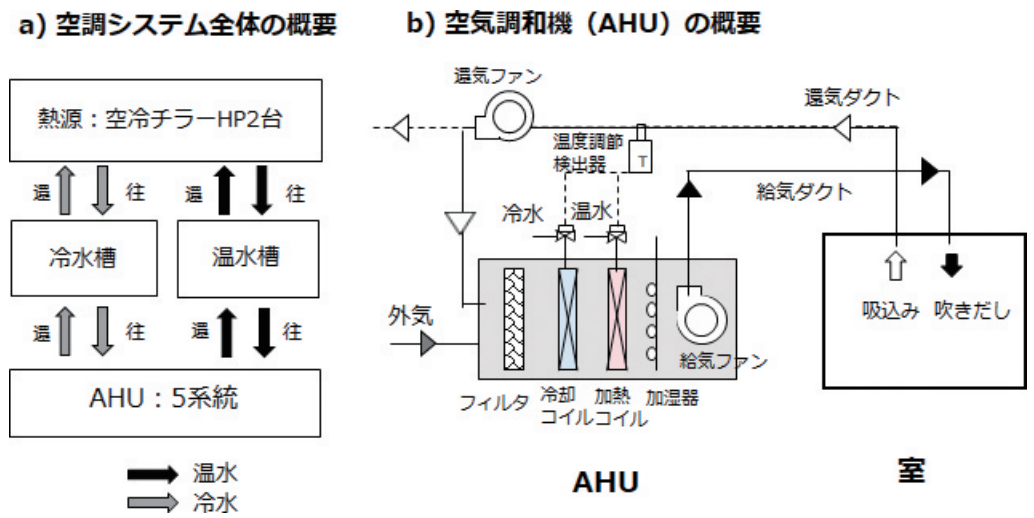


図2 (a) 空調システム全体の概要と(b) 空気調和機の模式図

表2 熱源装置の仕様

形式	熱回収式空冷ヒートポンプチラー（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3 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 m ³ /h 外気720 m ³ /h 3.7 kW(定格電力)	8.1 kg/h 8.8 kW (定格電力)	還気量6780 m ³ /h 2.2 kW(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 m ³ /h 外気200 m ³ /h 3.7 kW(定格電力)	3.1 kg/h 3.8 kw (定格電力)	還気量4200 m ³ /h 1.5 kW(定格電力)
収蔵庫2 (地下1階)	1台	15.1 kW 冷水7℃ 43 L/min	13.9 kW 温水40℃ 40 L/min	送風量3000 m ³ /h 外気200 m ³ /h 2.2 kW(定格電力)	4.0 kg/h 3.8 kW (定格電力)	還気量2800 m ³ /h 0.75 kW(定格電力)
収蔵庫3 (地下1階)						
エントランス・ ギャラリー (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 m ³ /h 外気950 m ³ /h 5.5 kW(定格電力)	9.3 kg/h 8.8 kW (定格電力)	還気量7650 m ³ /h 2.2 kW(定格電力)

AHU は、系統によって運用が異なるが基本的には平日の9:00-17:00に稼働させている。また展示室には、パッケージエアコンが備え付けられており、両者を併用して環境調整が行われている。

2-3. 測定方法

中央集中方式の空調システムの運用に係る消費エネルギーは、熱源と熱搬送に対するものに大別される。一般には熱源装置の運用に必要なエネルギーが占める割合が大きいため^{9,11)}、熱源装置を効率的に運用することが空調システム全体に対する省エネルギーに寄与する可能性が高い。そこで現状の熱源装置の運転に係る消費エネルギーを把握するため、分電盤に電力計を設置し測定を行った。測定の様子を写真1に示す。測定には、クランプオンパワーロガー(HIOKI, PW3360)を用い、1分間隔で記録した。

対象の館の空調システムは、処理すべき熱負荷に応じて、給気温度を変化して制御する方式であり、設定温度と制御用センサーの温度差を元に各室に吹き出す空気の温度を決定している。そのため、吹き出し空気の温度変化から空調で処理している熱負荷の増減や冷暖房の稼働状況を概ね把握できる。そこで、各系統の空調の吹き出し口に温湿度ロガー (T&D, RTR507BL) を設置し、30分間隔で測定を行った。使用した温湿度センサー (T&D, SHB-3101) の精度は温度 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $\pm 2.5\%$ rh である。また収蔵庫1に関しては、庫内の代表的な温湿度を把握するために、収蔵庫の中央部と南側の床面からの高さ1 m の場所にも、温湿度ロガーを設置した (図1)。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ている (Onset, U23-001A)。

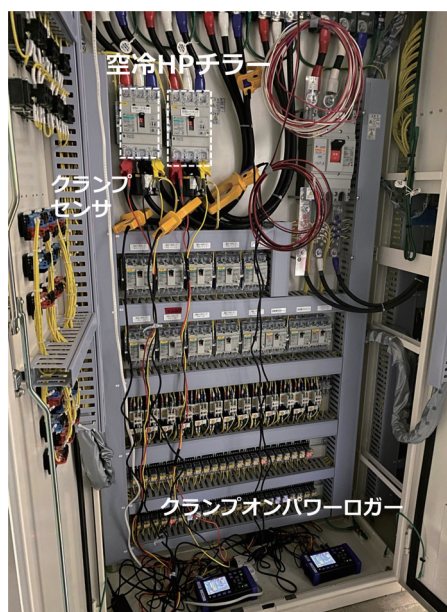


写真1 熱源装置の電力の測定の様子



写真2 吹き出し口の温湿度測定の様子

3. 結果

3-1. 冬季の熱源装置の消費エネルギー

図3に、2021年12月15日～2022年5月31日の空冷 HP チラーの日積算消費電力量と現地で測定

した外気温の日平均値の変化を示す。土日に HP チラーを停止する運用になっているため、12月～1月にかけては月曜日に消費電力が大きくなる傾向にあること、日積算消費電力量は最大で250～260 kWh 前後であることが確認された。一般的には厳冬期である1月後半～2月中旬にかけて空調用のエネルギー消費が大きく、中間期である5月には小さい傾向があるが、本施設では4月から5月にかけて増加しているため、電力消費量と稼働時間、外気温の関係を調べた(図4, 5)。

図4より、空冷 HP チラーの日積算消費電力量は明確に日積算稼働時間と正の相関があること、運用上1日の中では最大7時間の運転となっていることが確認できた。近似直線の傾きは約31 kW となっており、各日のデータを1時間あたりの平均消費電力に換算すると概ね20～35 kW の範囲に収まっていた。定格消費電力は冷却時37.9 kW, 加熱時39.7 kW であるので、平均的にはそれよりもやや小さい値となった。また、図5から外気温が8～14℃の時期にチラーがあまり稼働しておらず、それより温度が高い時期になると1日の最大稼働時間である7時間運転がなされていることがわかった。運用方法を変更したためか、自動制御の設定方法によるものか、その原因については調査する必要がある。

3-2. 各空調システムの吹き出し空気温度

3-2-1. エントランス・展示室

図6に、2021年12月15日から2022年5月31日の期間の展示室とエントランスの吹き出し空気温度の測定結果を示す。

先に述べた通り、対象とする館では企画展のみ行われることから、展示室とエントランスの空調は会期に応じて不定期に運用される。また、展示室に関しては、現在パッケージエアコンをメインに使用しており、パッケージエアコンのみでは冷暖房能力が不足している場合に AHU を運転している。これらの状況を踏まえたうえで、測定結果から各室の AHU の運転状

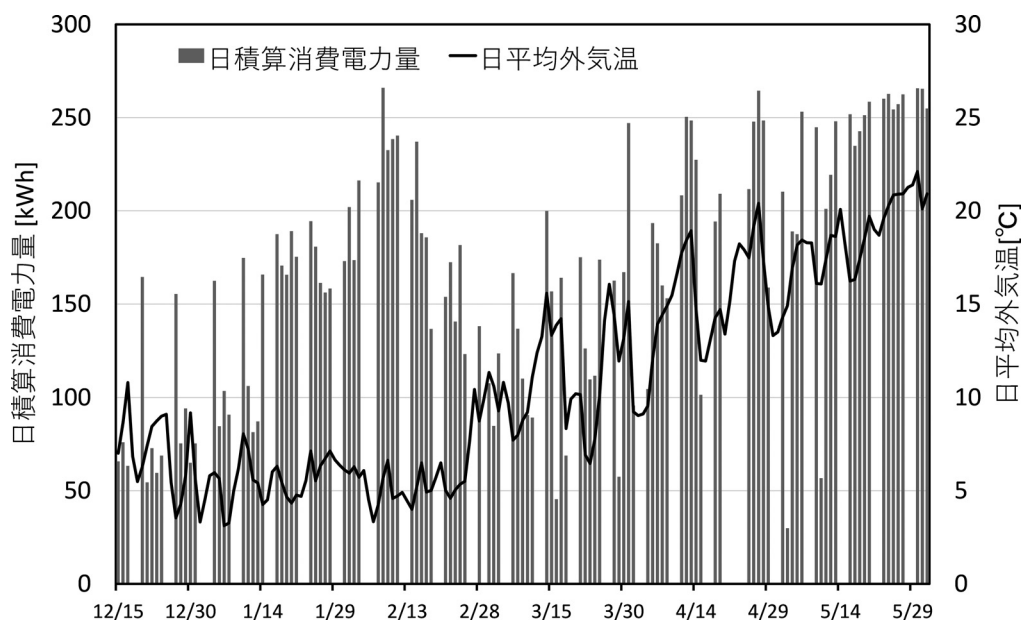


図3 空冷 HP チラーの消費電力量と外気温の変化 (2021/12/15～2022/5/31)

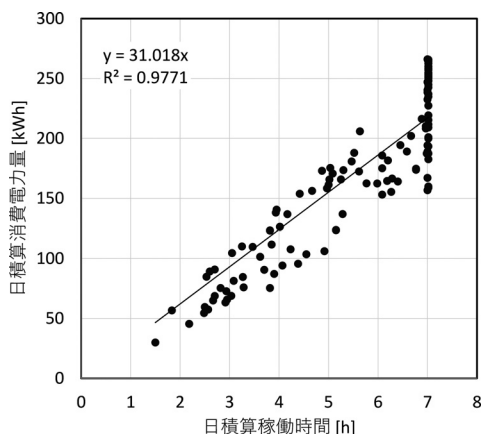


図4 空冷 HP チラーの日積算稼働時間と消費電力量の関係
(2021/12/15～2022/5/31)

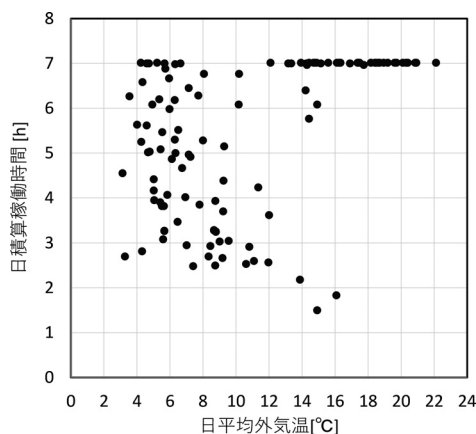


図5 外気温と空冷 HP チラーの日積算稼働時間の関係
(2021/12/15～2022/5/31)

況を検討する。

展示室については、1月中旬から平日の日中に空調の吹出し空気温度が約30℃を超える日が確認されるようになっており、このタイミングで AHU の運転が開始したものと考えられる。

エントランスでは、4月の後半から5月にかけては、日中に温度の上昇と低下が頻繁に発生している（図6bの網掛け部分）。この時期のエントランスの空調吹出し口の温度を拡大して図7に示す。空冷 HP チラーと AHU が稼働している平日（5月9～13日、16～20日）の日中、吹出し空気温度が上昇と低下を繰り返していることが分かる。この変動は単純に外気流入の影響とは考えにくく、1日の間に暖房と冷房が切り替わりながら運転していた可能性が考えられる。こうした空調機由来と思われる温度の上昇と下降の繰り返しは、最も多い日で6回発生していた。

3-2-2. 収蔵庫

図8に、2021年12月15日から2022年5月31日の期間の収蔵庫の吹出し口の温度の測定結果を示す。収蔵庫では、上記の測定期間では平日の9：00～17：00に AHU が稼働している。

図8より、1階に存在する収蔵庫1では、測定期間の暖房運転をしていると思われる12月15日から4月8日までの期間、AHU の運転開始直後の9：00から日中にかけて吹出し空気温度が35～37.5℃の高温になっている。暖房時の温水の温度は40℃であり、35～37.5℃といった値は、吹き出し温度としてはほぼ最大値とみなすことができる。また4月8日以降には（図8-a 網掛け部分）AHU 稼働時の吹き出し空気温度が、設定値である22℃より低くなる日が徐々に増えており、冷房と暖房が外気温に応じて切り替わるような運転をしばらくしたのち徐々に冷房運転に移行する様子が確認された。

地下1階にある収蔵庫2と収蔵庫3に関しては、上記の計測期間内では AHU 稼働時間の吹き出し空気温度が常に設定値である22℃より高くなっていることから、この期間は暖房運転が行われていることが確認された。

建物や地盤の熱容量のために外気の変動より多少遅れて影響が出るものの、収蔵庫2や収蔵庫3で確認されるように、一般には外気温が低くなるほど、空調機で処理が必要な暖房負荷が

大きくなるために吹出し空気の温度が高くなる傾向が見られる。一方、収蔵庫1では AHU の稼働直後の吹出し空気温度が暖房期間を通じてほぼ変わらない。

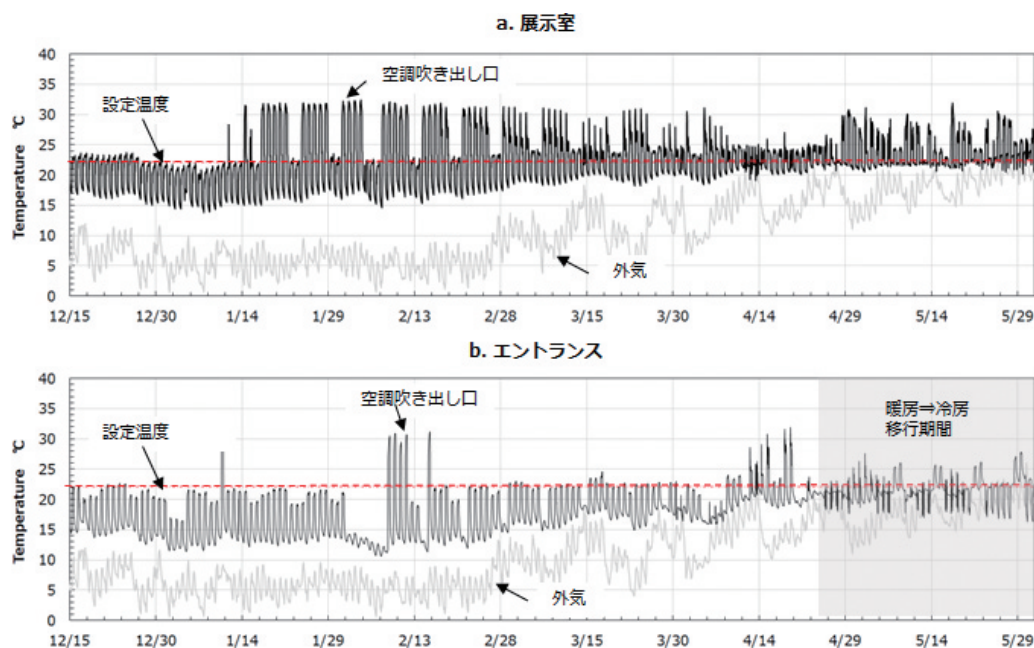


図6 計測期間のエントランスと展示室の空調吹き出し口の温度変化
(2021/12/15～2022/5/31)

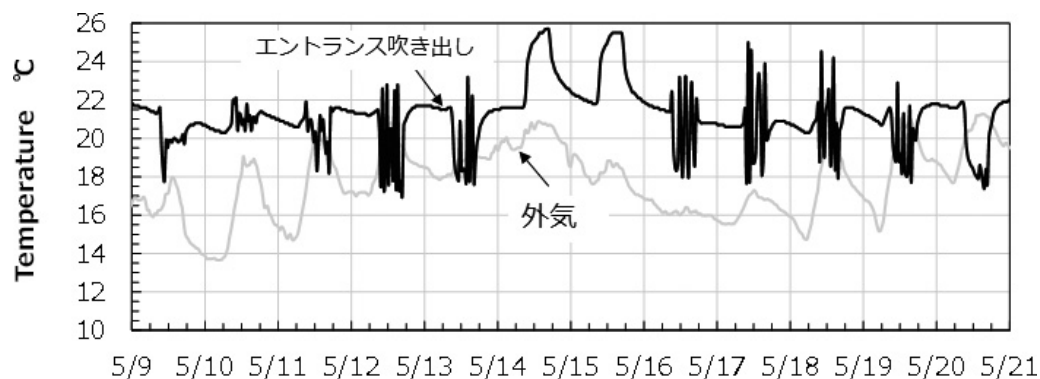


図7 中間期のエントランスの空調吹き出し口の温度変化 (2022/5/9～2022/5/21)

3-3. 冬季の間欠運転時の収蔵庫1の温湿度環境

上述の通り、収蔵庫1では、AHU の稼働直後の吹出し口の空気の温度が非常に高くなることが確認された。そこで、この急激な変動が、収蔵庫内の環境にどのような影響を与えるかを詳しく調べることにした。

図9に収蔵庫1の吹出し口（床面からの高さ2.6 m）、収蔵庫1の代表点として中央（床面から

の高さ1.0 m), 南(床面からの高さ1.0 m)の計3点の2022年1月15日から1月30日までの期間の温度, 相対湿度, 絶対湿度を示す。温度変化の特徴としては, 平日の9:00に空調を運転開始すると, 35℃を超える高温の空気が収蔵庫内に給気され, 12:00ごろ庫内の温度が22℃に達すると吹出し口の空気温度が低下することが挙げられる。また, 空調を稼働させている日には, 庫内の代表点では4~5℃の日変動が生じていることが分かる。

相対湿度に関しては, 空調機の運転開始直後に吹出し空気の相対湿度が30% rh を下回り, 12:00頃になると40% rh 台まで上昇することが分かる。このとき庫内の代表点では, 4~5% rh の相対湿度の変動が発生している。また空調機の停止時間中には, 庫内の相対湿度はほとんど変動していないことが分かる。絶対湿度に関しては, 庫内の代表点の相対湿度が50% rh を下回ると増加しており, このタイミングで蒸気加湿器の運転による加湿が行われたものと見られる。

以上の結果から, 庫内の代表点においては比較的安定した温湿度環境になっているものの, 吹出し口周辺では運転開始時に設定温度と庫内温度の差を解消するために, 高温空気が吹き出され, 9:00~12:00の間に局所的に過乾燥状態になることが確認された。

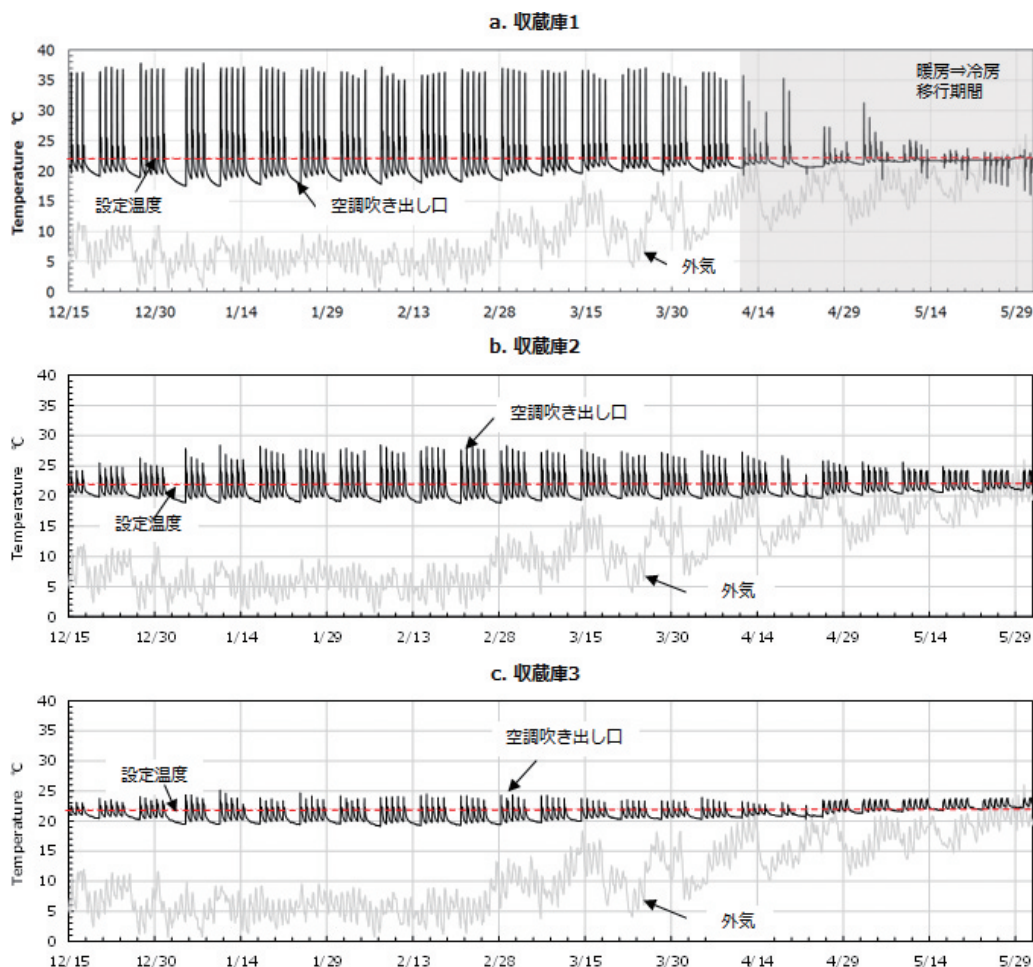


図8 計測期間の収蔵庫の空調吹き出し口の温度変化 (2021/12/15~2022/5/31)

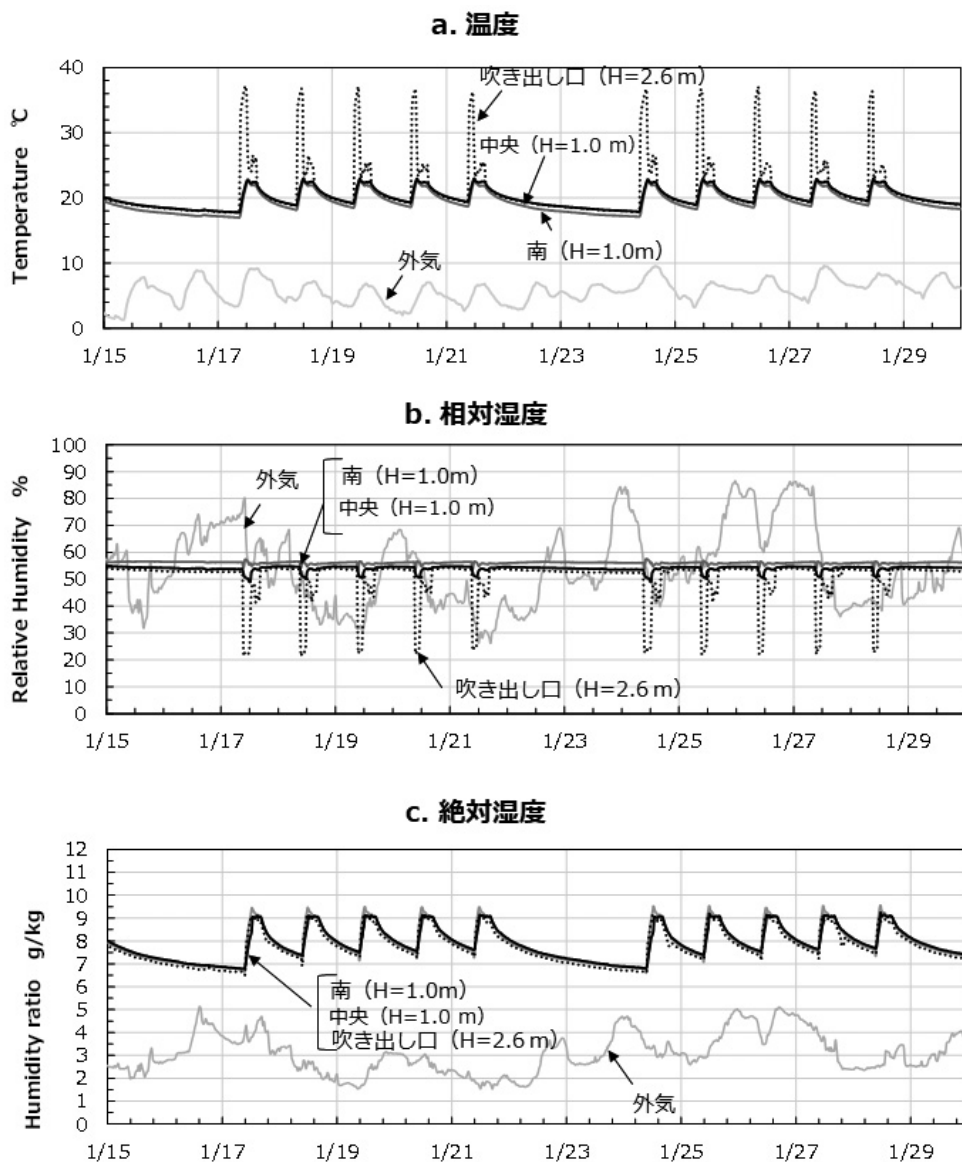


図9 収蔵庫1の温度・相対湿度・絶対湿度

4. 考察

対象とする館においては、省エネルギーや設備の管理を考慮し空冷 HP チラーと AHU を間欠運転している状況ではあるが、よりエネルギー効率の良い空調システムの運用方法や温湿度の変動を抑え室内環境をより安定させるために取り得る対策を考察する。

現在の空調システムの運用において、外気温が8~14℃の時期は空冷 HP チラーの運転時間が短く余裕のある運転となっている。一方、厳冬期と中間期は最大時間(7時間)稼働しており、この時期に空調システムの運用による対策の余地があるかどうか省エネルギー戦略を考えるうえで重要である。

厳冬期のチラーの消費電力量が増加する時期（図3）と、展示室での AHU の稼働が開始した時期（図6-a）は対応しており、AHU の稼働台数が増えたことがこの時期の消費電力の増加につながった可能性が高い。これはエントランス、展示室での暖房の需要が増加したことを意味しており、来館者の快適性を考慮すると現状以上に空調の運用方法による省エネルギー化を図ることは困難であると考えられる。

4月・5月の中間期については、吹き出し空気温度の測定から、エントランスと収蔵庫1において冷房運転が開始した時期と考えられる。このことから、暖房運転のための温水の需要に加え、冷房運転のための冷水の需要が加わったことが、中間期の消費エネルギーの増加に影響を及ぼしている可能性が考えられる。加えて、エントランスの AHU 系統については、一日の間に暖房・冷房が切り替わるような運転状況になっていることから、AHU の運転自体が熱負荷を与えるような状況になっているものと考えられる。省エネルギーの観点からは、暖房運転もしくは冷房運転のどちらかに統一することで効率が上がる可能性があると思われる。

収蔵庫1に関しては、空調機の運転直後に吹き出し口周辺で局所的に相対湿度が低い領域が発生している。実際に吹き出し口から給気される高温、乾燥した空気の影響がどの程度の範囲まで及んでいるかは確認できていないが、少なくとも吹き出し口周辺での作品の収蔵を避ける等の運用上の配慮が必要である。また現状からエネルギー消費量を増加させることなく、吹き出し口周辺を含めより安定な庫内環境を構築する方法としては、冬季の設定温度を現状の22℃から下げ、その代わりに蓄熱水槽の冷温水を利用し AHU をできるだけ長時間運転することが挙げられる。対象とする館は空冷 HP チラーと AHU の間に蓄熱水槽を有しており、空冷 HP チラーの停止時間においても、蓄熱水槽の温水と冷水を空調に利用することができるため、上記のような対策が取れると考えられる。実際に対策を行う際は、急に設定を変えると温湿度の変動が大きくなる可能性があるため、外気平均温度の低下に合わせて設定温度を少しずつ下げて様子を見ながら実施することが望ましい。また冬季の設定温度を低くすることは、より低い絶対湿度で相対湿度 $55 \pm 5\%$ rh を達成できるため、加湿に必要なエネルギー消費の削減にもつながるものと考えられる。この対策が庫内の温湿度環境の改善につながるか、またエネルギー消費にどのような影響を及ぼすかは、実際に空調システムの運用を変えた場合の庫内温湿度と消費エネルギーの測定を行い、検討する必要がある。

5. まとめ

空冷 HP チラーと AHU の間欠運転を行っている美術館を対象に、熱源装置の冬季の消費エネルギーと収蔵庫内の温湿度環境の測定を行った。

熱源装置である空冷 HP チラーの消費電力測定により、空冷 HP チラーの消費電力と稼働時間に相関があることが確認された。また外気温との比較により、厳冬期と中間期において空冷 HP チラーの消費電力が増加する傾向があることが確認された。

吹き出し口の空気の温度の測定を行うことで、各室の AHU の運転状況を把握することができた。厳冬期においては、エントランス・展示室の AHU の稼働時間の増加が確認された。中間期においては、暖房運転と冷房運転の混在が確認され、運転の切り替えがこの時期の空冷 HP チラーの消費電力の増加につながった可能性が考えられる。

また測定結果から、対象施設におけるエネルギー消費の削減の観点と収蔵庫の保存環境の安定化に向けた対策案を考察した。今後は本報で示した対応策について保存環境上の問題が生じないか慎重を期したうえで、試験期間を設けて検討することを考えている。

本報で報告したものと同様の空調の消費電力の測定は、住宅、オフィスビル、ホテル、病院、

大学などの用途の建物を対象には多く実施されており、こうした建物では設計や施工、設備の運用にかかる情報が入手しやすい。一方、博物館・美術館等の文化財展示、収蔵施設を対象にしたものは、展示・収蔵環境が展示や借用といった館の運営に大きく関わる問題であるため、情報の公開がされにくいのが現状である。改修工事や新設館の建設においては建築設計の実務者とのコミュニケーションが必須であり、このように消費電力を調べることで、持続可能な空調運用を進める検討材料を提供できると考えられる。

注1) 同一グループが実施した同一の館での調査は1件として計上している。

謝辞 本研究は当該美術館の館長ならびに学芸員の皆様のご理解、ご協力のもと実施できた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 環境省 HP：パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略（令和3年10月22日閣議決定）、<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/chokisenryaku.html>（2022年11月7日参照）
- 2) 相川悠，和田浩：展示室における換気対策が与えるエネルギー消費への影響と持続可能な博物館環境の維持に関する考察，文化財保存修復学会44回大会，P059，2022
- 3) 富田峻亮，永吉敬行，湯浅孝：美術館におけるエネルギー消費量の実態に関する研究 その2 美術品収蔵庫の1次エネルギー消費量の実績値，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），2415-2416，2022
- 4) 大塚悠生，伊庭千恵美，石川和輝，小椋大輔，鈴木修一：既存博物館施設における展示室の空調消費電力及び温湿度調査，建築学会近畿支部研究報告集，61，141-144，2021
- 5) 朴省俊，湯浅和博，巽彩子：博物館のエネルギー消費に関する調査研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），851-852，2007
- 6) 新田武史，村川三郎，西名大作，前田浩二，清水康成：某美術館におけるエネルギー消費実態に関する研究 その3二次側消費熱量の予測検討，日本建築学会中国支部研究報告集，第31巻，413-1-4，2008
- 7) 松島修，伊藤真人，谷口雄樹，岡建雄，門脇正夫：美術館における蓄熱式ヒートポンプ空調システムの実態調査，空気調和・衛生工学会論文集，No.63，39-48，1996
- 8) 田中毅弘，藤井修二：博物館における設備・維持管理に関する調査研究，No.97，31-37，2005
- 9) 西川雅弥，熊谷雅彦，野村太郎，鳥居博恭，大塚大輔：博物館における ESCO 事業を活用した省エネルギー改修と性能検証の実証的検討，空気調和・衛生工学会論文集，No.264，55-62，2019
- 10) 空気調和・衛生工学会：空気調和設備計画設計の実務の知識 改訂4版，オーム社，p106-108
- 11) 省エネルギーセンター HP：オフィスビルの省エネルギーの特徴，https://www.eccj.or.jp/office_bldg/01.html（2022年11月7日参照）

キーワード：空気調和設備（air conditioning equipment）；消費エネルギー（energy consumption）；保存環境（storage environment）；外皮（building envelope）

Energy Consumption of Heat Source Equipment and Storage Environment during Winter in a Museum with Intermittent Air Conditioning Operation

MIZUTANI Etsuko, IBA Chiemi*, SOMA Shizuno and AKIYAMA Junko

The establishment of strategies to both maintain the conservation environment for cultural properties and reduce the energy consumption of air-conditioning equipment in museums is an important issue in the face of increasing social demands for decarbonization. To achieve this objective, it is necessary to collect information on the building envelope of a museum, its energy consumption, its required indoor environment, and its building operational characteristics and to analyze the relationships among them.

In this study, the energy consumption of the heat source equipment and the indoor temperature and humidity in a museum were measured during winter when its air conditioning equipment was being operated intermittently. The power consumption of heat source equipment correlates with operating hours. A comparison of outdoor temperatures and the museum's power consumption shows that the power consumption of heat source equipment tends to increase in winter, when outdoor temperatures are low, and in May, when outdoor temperatures start to rise. It was also observed that an extremely dry area formed around the air outlet when the air-conditioning unit started operating in the storage room. Therefore, a method was investigated to reduce the fluctuations in relative humidity in the storage room without increasing power consumption from the current level.

*Graduate School of Engineering, Kyoto University