

〔報文〕 収蔵庫内の温湿度環境とスチール棚の表面温度

犬塚 将英・多比羅 菜美子*・佐野 千絵

1. はじめに

ICCROM（文化財保存修復研究国際センター）などでは文化財を保存するための温度と相対湿度の基準値を約20℃と約60%と勤めていて、その収蔵の温湿度の変化履歴も考慮すべきであるとしている¹⁾。このような温湿度環境を維持するために、博物館・美術館の展示・収蔵施設では空調設備を運用しているところが多い。ところで、収蔵庫の新設または改築を行う場合、揮発性有機化合物の発生を抑えるために、木製のものよりもスチール製の棚を導入するケースが近年では増えている。一方、木材よりも金属の熱伝導率が高いことから、特に空調機の吹出口近傍にスチール棚が置かれている場合に、スチール棚やそこに収納されている資料の表面における結露、そしてそれに伴うカビ等の発生が懸念される。以上の内容を実地で調べるために、東京都港区にある根津美術館の収蔵庫において、空調機の吹出口の近くに置かれているスチール棚の表面温度とその周辺の温湿度の測定を行った。以下の節に示すような測定結果が得られ、考察を行ったので報告する。

2. 事前調査と測定方法

2-1. 根津美術館の収蔵庫

東京都港区にある根津美術館では、参考文献2)で経緯が示されているように、収蔵施設と展示施設を改築することになり、収蔵庫は2007年1月31日に竣工され²⁾、シーズニングが行われた。収蔵庫としての機能を持たせるために、旧新館の展示室が改修された。旧新館の床上に免震装置を設置し、その上に収蔵庫を建てる、という二重構造となっている。このため、断熱性と耐震性に優れた収蔵庫となっている。

収蔵庫の空調システムは、庫内の気温の日変動を±2℃以内、年変動を夏季24℃、冬季16℃と設定し、年間を通じて緩やかに変化するように設計されている^{3,4)}。二重壁内と庫内は、省エネルギーの観点から、以下のように別系統の空調方式となっている。庫内では通常は換気のみが行われており、庫内温度が設定値から±2℃、または庫内の相対湿度が設定値から±2%の差が生じた場合に空調運転が行われる方式となっている。空調運転が行われる時には、資料への影響を考慮して、庫内温度と3℃差以内の温度の空気を吹き出すようにされている。一方、二重壁内は外気を導入しない循環方式となっている。

庫内は必要な収蔵量を満たすために、2層構造となっている²⁾。2階の床には開口部が設けられており、天井に設置された吹出口から吹き出された空気は1階に流れていくように設計されている^{3,4)}。2階の吹出口と床面の開口部、1階の吹出口と吸込口の位置は、気流シミュレーションで検証することにより、庫内に空気がよどむ箇所ができないように配置された^{3,4)}。

*根津美術館

2-2. スチール棚と事前調査

測定に先駆けて、2008年9月12日に事前調査を行った。今回は2階に備え付けられたスチール棚に注目した。このスチール棚に注目した理由は、天井面にある空調機の吹出口近傍に備え付けられているからである。このスチール棚の高さは約2.13mであり、天井面を除くと、この棚は6段に分割されている。その棚の上方（高さ2.30m）の天井面には面積が370mm×370mmの空調機からの吹出口がある。吹出口は水平方向に特化した気流を出すことのできるパンチングタイプが採用されている³⁾。そして収蔵品への影響を考慮して、吹出口からの気流速度は1.0m/s以下となるように設定されている⁴⁾。事前調査の際に超音波風速計で計測したところ、吹出口では0.7m/s、スチール棚の最上段では0.05m/sであった。また、図1のように熱画像撮影を行ったが、スチール棚の表面上で有意な温度差は確認できなかった。そこで、次項に示すように、データロガーを用いて、継続的にスチール棚の表面温度と周囲の温湿度の測定を行うことにした。

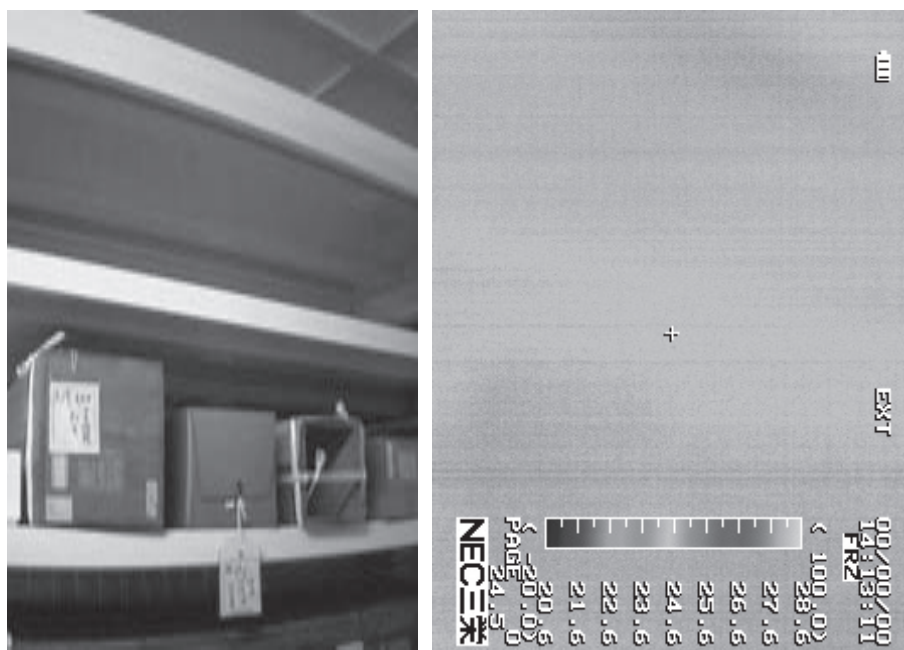


図1 熱画像撮影による事前調査

2-3. 測定方法

夏季の冷房時にスチール棚の表面が結露しているか、表面近傍の相対湿度がどのような値になっているのかを調べるためには、スチール棚の表面温度と周囲の空気温湿度との関係を調べれば良い。表面温度の測定は、オンセット社のサーモカップルロガー U12に Tタイプの熱電対（銅-コンスタンタン）を接続したものを使用して行った。使用したデータロガーは、氷水を用いて0℃における検定を行い、測定値の補正をした。空気温湿度の測定は、オンセット社の温湿度データロガー U10-003で行った。使用したデータロガーの相対湿度は、恒温恒湿槽内（20℃）にて、KCl(85%)、NaCl(75%)、NaBr(59%)、Mg(NO₃)₂·6H₂O(54%)、MgCl₂·6H₂O(33%)の飽和水溶液を用いて検定を行い、測定値の補正をした^{5~7)}。これらのデータロガーを以下に示す箇所に設置した（図2）。

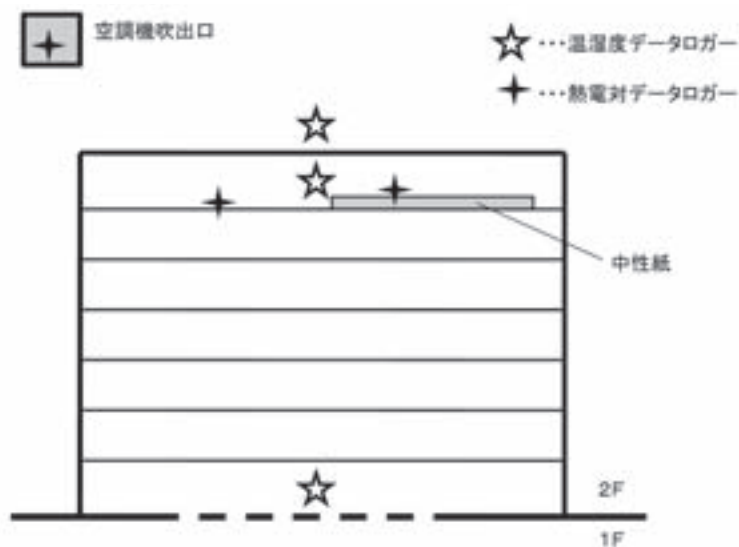


図2 データロガー設置箇所

収蔵品を置くためにスチール棚は6段構造となっているが、今回の調査では吹出口から一番近い最上段のスペースで測定を行うことにした（この測定箇所を、以下では便宜上「棚中段」とする）。棚中段では図2に示されているように、温湿度データロガーを1個、同箇所のスチールの表面温度を測定するためにサーモカップルロガー1個を設置した。また、スチール棚に中性紙を敷いた場合の緩衝効果を調べるために、同箇所に敷いた厚さ1mmの中性紙の表面温度もサーモカップルロガーを用いて測定した。これら3個のデータロガーの設置状況は図3左の写真の通りである。

また、吹出口からの影響をさらに詳しく調べるために、スチール棚の天井（この測定箇所を、以下では便宜上「棚上段」とする）に温湿度データロガーを1個、吹き出し口の温度を調べるためのサーモカップルロガーを1個設置した（図3右の写真）。スチール棚の下には、収蔵庫1階へ通じる開口部があるが、ここにも温湿度データロガーを1個設置した。

以上のデータロガーを用いて、2008年9月12日12時から、スチール棚の表面温度と周辺の温湿度の自動計測を開始した（記録間隔=10分）。



図3 測定に用いたデータロガーの設置状況

3. 測定結果

3-1. 温度と相対湿度の測定結果

空調機の吹出口近傍に置かれているスチール棚における結露やそれに伴うカビ等の発生が懸念されるのは主に夏季である。ここでは、2009年7月1日から10日までの期間に得られた測定結果をグラフ化し解析をすることにより検討を行う。この時期の空調機の温度と相対湿度の設定値は22℃と63%だった（湿度の設定値は、以前収蔵庫として用いていた蔵から作品を移動するに際して、蔵が高湿度安定の状態であったため、新収蔵庫を蔵にあわせたやや高め湿度（65%）に設定し、作品の移動後徐々に湿度を下げていく調整を行っていた過程での設定値である³⁾）。

図4は吹出口、棚上段、棚中段、床面における温度の測定結果である。吹出口の温度変化を見ると、この時期は平日の日中に空調運転が行われていたことがわかる（現在、夏季では休日も空調運転が行われており、2009年7月とは運転状況は異なる）。また、棚上段、棚中段、床面の日中の温度と比較すると、当初の計画通り、庫内温度と3℃差以内の温度の空気を吹き出されていることも確認できた³⁾。空調運転が行われている時間帯では、棚周辺では空調機の設定値通り、約22℃となっていた。また、空調運転が行われている時間帯では、棚の上下方向での温度勾配は小さかったが、床面と比較すると棚上段では約0.5℃低い傾向が見られた。一方、夜間や週末などの空調運転が行われていない時間帯では、棚の上下方向での温度勾配は逆向きになっており、床面と比較すると棚上段では約1℃高い傾向が見られた。

図5は棚上段、棚中段、床面における相対湿度の測定結果である。文化財の置かれている棚中段では日変動は5%程度であった。空調運転が行われている時間帯では、棚周辺では空調機の設定値通り、約63%となっていた。空調運転が行われている時間帯では吹出口に近いほど相対湿度は高く、遠くなるほど相対湿度は低くなっていた。そして、空調運転が行われていない時間帯では逆の傾向を示していた。図6は温度と相対湿度の測定値から計算して求めた棚上段、棚中段、床面における絶対湿度である（Wexler-Hylandの式から飽和水蒸気圧を計算し、ダルトンの法則を用いて絶対湿度を算出した⁸⁾）。絶対湿度の値を比較してみると、場所による違いが小さかったことがわかる。このことから、図5に見られる相対湿度の分布は、図4に見られる温度の分布が主な原因であることがわかった。

3-2. スチール棚の表面温度と露点との比較

木製の棚と比べると、スチール製の棚は熱伝導率が高いので、特に夏季の冷房期間中は、空調機の吹出口近傍にスチール棚が置かれている場合、周辺の空気よりもスチール棚の方が冷やされて温度が低くなる可能性がある。このような場合、スチール棚やそこに収納されている資料の表面における結露、そしてそれに伴うカビ等の発生が懸念される。スチール棚表面での結露の発生の有無については、周辺の空気の露点とスチール棚の表面温度を比較すると調べることができる。図7では、棚中段における空気の露点、スチール表面温度、中性紙の表面温度の推移を比較した。今回の測定結果では、スチール、中性紙の表面温度は周辺空気の露点よりも十分に高いので、この測定期間中における、スチール表面での結露発生の危険性は見られなかった。一方、スチールの表面温度と中性紙の表面温度との間に大きな差は見られなかったため、熱伝導や結露防止という観点では、今回の測定結果からは、その効果を確認することができなかった。

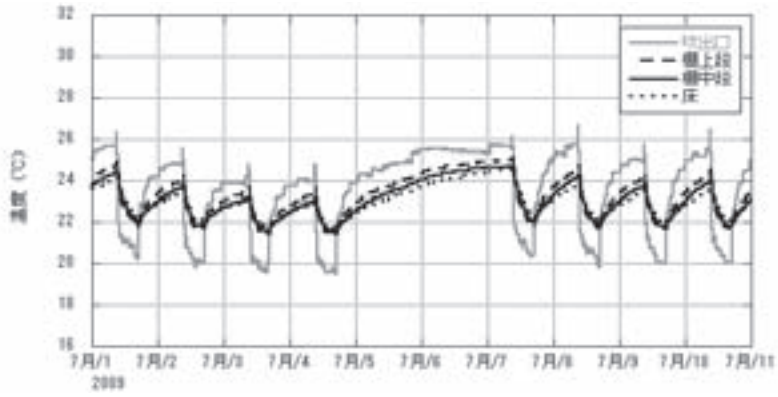


図4 温度の測定結果

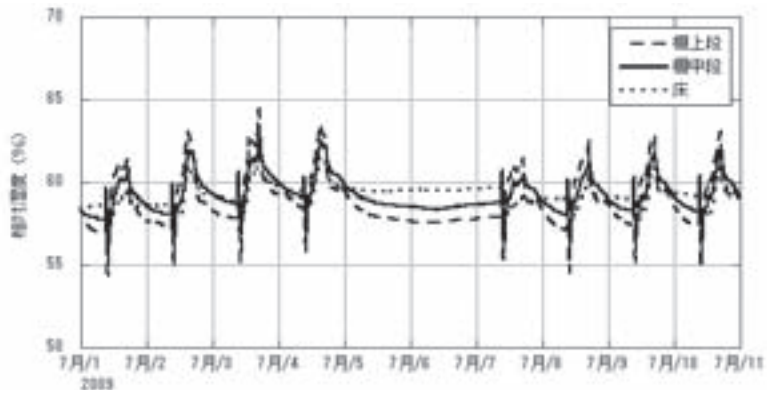


図5 相対湿度の測定結果

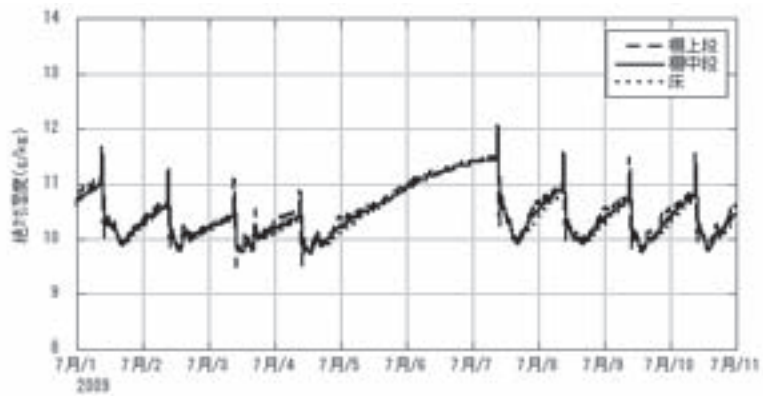


図6 絶対湿度の比較

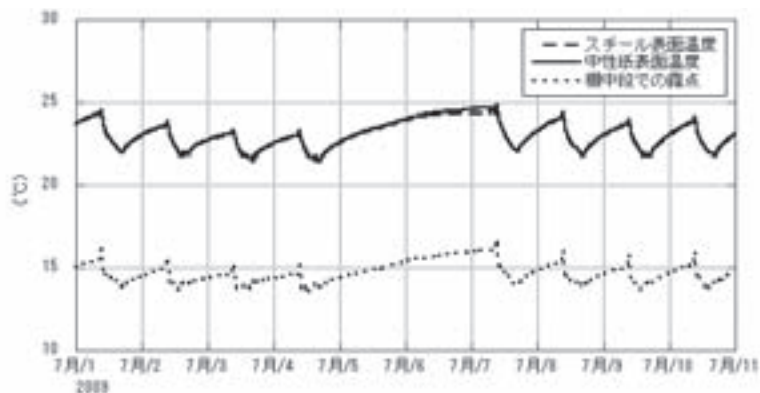


図7 スチール棚と中性紙の表面温度と空気の露点との比較

3-3. 計算から求めたスチール棚表面における相対湿度

前項では、スチール棚の表面温度と空気の露点を比較することにより、スチール棚表面での結露の発生はなかったことがわかった。結露が発生する、ということは、スチール棚表面における相対湿度が100%であることを意味する。しかし、相対湿度が100%に達しなくても、高湿度の状態が持続すればカビ等が発生する危険性は高まる。今回の調査では、スチール棚の表面温度と空気の温度がほぼ同じであり（図8）、空気中の相対湿度が65%を超えていないから（図5）、上記のような危険性は極めて低いことはわかっているが、この項ではひとつの試みとして、スチール棚表面における相対湿度を算出して調べてみた。

木材などの多孔質材質とは対照的に、スチール棚表面における吸放湿は起こらない。よって、棚中段の空気中の絶対湿度とスチール棚表面近傍における絶対湿度は同じであると仮定する。そうすると、図6で示した棚中段での絶対湿度とスチール棚の表面温度からスチール棚表面近傍における相対湿度を算出することができる。このようにして計算から求めたスチール棚表面近傍における相対湿度と空気の相対湿度とを図9で比較した。図9では、スチール棚表面近傍における相対湿度の方が空気の相対湿度よりも高い期間があったように見える（最大で0.5%程度）。しかし、サーモカップルロガーと温湿度データロガーの温度の測定精度と比べるとスチール棚の表面温度と空気の温度との差が小さかったこと、温湿度データロガーの相対湿度の測定精度を考慮すると、図9で見られる両者の差は測定誤差の範囲内におさまる程度であった。

以上のように今回の調査では、スチール棚表面近傍における相対湿度と空気中の相対湿度との間には差異が見られなかったが、スチール棚の導入を検討している施設では同様に適用できると考えられるので、ここではこのような解析手法を紹介した。

4. まとめ

収蔵庫の新設または改築を行う場合、スチール製の棚を導入するケースが近年では増えている。しかし、特に夏季の冷房期間中は、空調機の吹出口近傍にスチール棚が置かれている場合、周辺の空気よりもスチール棚の方が冷やされて温度が低くなる可能性がある。このような場合、スチール棚やそこに収納されている資料の表面における結露、そしてそれに伴うカビ等の発生が懸念される。以上の内容を実地で調べるために、根津美術館の収蔵庫の2階において、空調機の吹出口の近くに置かれているスチール棚の表面温度とその周辺の温湿度の測定を行った。

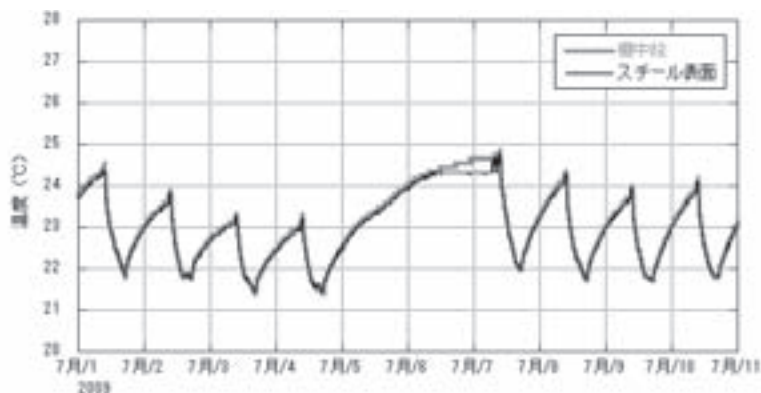


図8 スチール棚の表面温度と空気の温度との比較

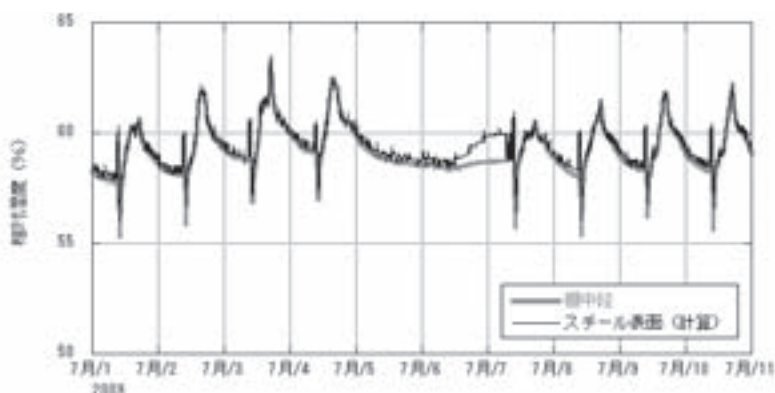


図9 空気の相対湿度と計算から得られたスチール棚表面における相対湿度との比較

スチール棚表面での結露の発生の有無については、周辺の空気の露点とスチール棚の表面温度を比較して調べた。今回の測定結果では、スチール棚の表面温度は周辺空気の露点よりも充分に高いので、この測定期間中における、スチール棚表面での結露発生の危険性は見られなかった。

さらに、棚中段の空気中の絶対湿度とスチール棚表面近傍における絶対湿度は同じであると仮定し、スチール棚表面における相対湿度を算出して調べてみた。測定精度を考慮すると、両者の間には差異が見られなかったが、スチール棚の導入を検討している施設では同様に適用できると考えられるので、ここではこのような解析手法を紹介した。

謝辞

館内の温湿度測定の際に、根津美術館の皆様には多大なご協力をいただきました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) G. de Guichen: Climate in Museums, ICCROM, 1984
- 2) 西田宏子：夢と理想の美術館をつくる，根津美術館紀要『此君』，第二号，25-40（2010）
- 3) 菅野元衛，太田昭彦：新施設整備計画の経緯と収蔵環境づくり，根津美術館紀要『此君』，第二号，41-54（2010）
- 4) 菅野元衛，梶間智明，田中勲，新聞英一，太田昭彦：既存展示室を改修した根津美術館新収蔵庫の計画と庫内環境，文化財保存修復学会第30回記念大会研究発表要旨集 38-39（2008）
- 5) 三浦定俊，佐野千絵，木川りか：『文化財保存環境学』，pp.1-46，朝倉書店（2004）
- 6) 高分子学会高分子と吸湿委員会編：『材料と水分ハンドブック』，共立出版，pp.729（1968）
- 7) 工業技術大系編集委員会編：『湿度水分測定』，日刊工業新聞社（1965）
- 8) 田中俊六，宇田川光弘，武田仁，斎藤忠義，大塚雅之，松本敏男，田尻陸夫：『最新建築設備工学』，井上書院（2002）

キーワード：収蔵庫（storage）；空調システム（air conditioning system）；収納棚（shelves）；結露（condensation）；露点（dew point）

Measurements of Air Temperature, Humidity and Surface Temperature of a Steel Shelf in a Storage

Masahide INUZUKA, Namiko TAHIRA* and Chie SANO

Recently, when a storage in a museum is constructed or renovated, steel shelves tend to be preferred for furnishing rather than wooden shelves. This is because the amount of volatile organic compounds emitted from steel shelves is negligible compared with that from wooden shelves. However, in case a steel shelf is located close to an outlet of an air conditioning system, the surface temperature of the shelf might become lower than air temperature because thermal conductivity of steel is higher than that of wood, especially in summer. This leads to concerns about condensation and mold growth on the surface of the shelf and cultural properties stored there. In order to investigate into this phenomenon quantitatively on site, measurements of air temperature, humidity and surface temperature of a steel shelf were conducted in the storage of Nezu Museum in Minato-ku, Tokyo.

The data taken in July 2009 were analyzed. The surface temperature of the steel shelf and the dew point of the surrounding air was compared. The conclusion of the analysis is that there was no evidence of condensation on the surface of the shelf during the above period.

Furthermore, the relative humidity on the surface of the shelf was computed from the surface temperature and absolute humidity of the surrounding air. This paper proposes this analysis technique because it can be a method for the evaluation of the environment surrounding cultural properties.

* Nezu Museum