

# 〔報告〕 LED 照明を用いた展示ケースにおける 温湿度分布とその要因について

間 瀨 創\*・久岡 伸功\*<sup>2</sup>・林 良典\*<sup>2</sup>・犬塚 将英

## 1. はじめに

博物館美術館等の展示ケースは、展示室内の空調や来館者などによる温湿度変化を遮断あるいは緩衝し、展示物への影響を低減させる役割がある。これらの展示ケースは、従来蛍光灯のベース照明とハロゲンスポットライトの組み合わせによる照明が多く、照明器具からの発熱によるケース内部の温度分布、そして温度分布によって生じる相対湿度の分布について懸念されてきた。そこでケース内部の温湿度分布を一樣にするための様々な設計・仕様が検討され、ケース内空気を強制対流させるための循環ファンや調湿剤設置ボックスを備えたものなどが設計されてきた<sup>1)</sup>。特に背の高いケースでは、高さ方向での温湿度分布に大きな差が生じることによる、材料の物理変化にともなう劣化が懸念され<sup>2,3)</sup>、これまでも文化財等を展示するケース内部の温湿度についての研究がおこなわれてきた<sup>4-8)</sup>。

近年では照明に LED を採用した展示ケースが増えてきており、従来に比べて照明によるケース内部の温度上昇は抑えられているものと推定される。しかし LED 照明を用いた展示ケースの温湿度分布や循環ファンや調湿剤の効果に関する報告はなく、適切な運用も明らかではない。

そこで本研究では、LED 照明を導入した壁付展示ケース内の温湿度分布と循環ファン・調湿剤の効果について実測調査を行った。また温湿度分布の要因を推定するためには、ケース内部の立体的な気流や温湿度分布を把握することが有効であることから、同じケースについて熱流体解析 (Computational Fluid Dynamics, CFD) を用いた温湿度分布の予測を行い、この解析手法の有効性を確認するとともに、温湿度分布の要因について検証を行った。

## 2. 調査内容

### 2-1. 対象展示ケース

温湿度分布の実測調査及び CFD による予測は、三重県総合博物館企画展示室の壁付展示ケースを対象として行った。図 1 に対象としたケースの概要を示す。当該館の企画展示室には 4 種類の壁面展示ケース (岡村製作所製) が備え付けられており、いずれもエアタイト仕様で照明はすべて LED を採用している。また展示ケース内温湿度の均一化を目的として、内部の空気を循環ファンにより強制対流させることができる仕様となっている。すなわち展示ケース内の空気は上部に設置されているファンによって図 1 (B) のスリットより吸引され、背面外側にあるダクトを通じて下部に送られる。この空気は下部に設置されている図 1 (C) の調湿剤設置ボックスを通過し、調湿された空気が下部背面側に設置されたスリット吹出口からケース内部へ送られる。吹出口からの風速について、0.5m/s 程度以上の風が直接展示資料にあたると、空気の相対湿度変化に対する資料の含水率の応答が速くなることを踏まえ<sup>9)</sup>、当該展示ケース設

\*東京文化財研究所、三重県総合博物館    \*<sup>2</sup>株式会社 岡村製作所

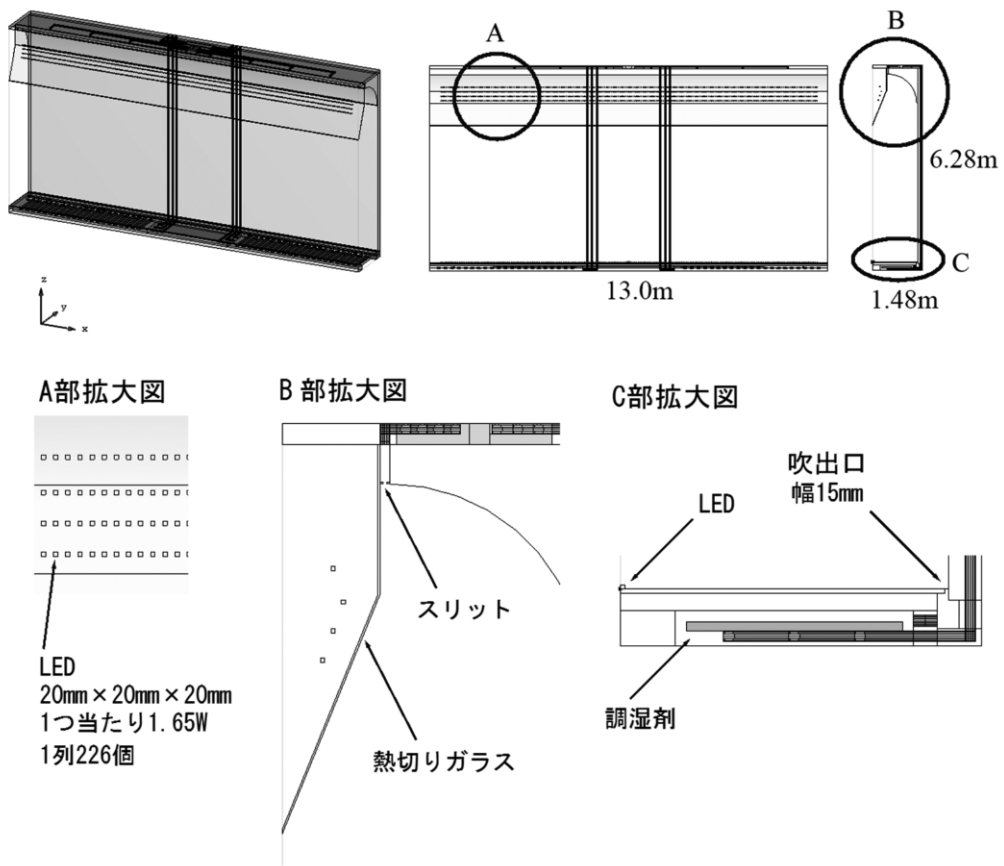


図1 実測調査及びCFDを行った壁面展示ケースの概略。外観及び、(A)LED照明部分拡大図、(B)展示ケース上部断面の拡大図、(C)展示ケース下部断面の拡大図。

計時に三重県立博物館と東京文化財研究所の協議の中で設定した0.3m/sを最大値として調節可能となっている。上部吸込口と循環ファンをつなぐ経路や、調湿ボックスと吹出口をつなぐ経路をフレキダクトとし、その長さを調整することで吸込み風速・吹出し風速が展示ケース幅方向ですべて一樣になるように設計されている。LED照明は展示ケースの上部に4列、下部に1列設置されている(図1(A))。LED照明が設置されている空間と文化財が置かれる空間との間は熱切りガラスによって仕切られている。またシリカゲル等を構成要素とする調湿剤(富士シリシア化学社製アートソープ<sup>®</sup>、ハーフタイプ<sup>®</sup>、不織布包装)を下部の調湿剤ボックスに標準仕様通り1m<sup>3</sup>あたり2個の割合で収納している。

4種類の展示ケースの仕様はほぼ同一であるが、高さ方向での温湿度分布が大きくなると予想される、最も大型の「展示ケースD」(幅:13.0m, 奥行:1.48m, 高さ:6.28m)を対象として実測調査及びCFDを行った。

## 2-2. 温度・湿度分布の実測調査

2014年2月から4月までの間に、展示ケース内の温湿度の実測調査を行った。ここではLED照明の発熱による温湿度分布及び、循環ファン・調湿剤の温湿度分布への影響について調べる

ことを目的とした。

温湿度の計測は温湿度データロガー「おんどとり」(T&D 社製, 分解能:  $0.1^{\circ}\text{C} \cdot 1\% \text{RH}$ , 精度: 平均  $\pm 0.3^{\circ}\text{C} \cdot \pm 5\% \text{RH}$  [ $25^{\circ}\text{C} \cdot 50\% \text{RH}$  において]) を用いて実施した。展示ケース内の測定箇所は横方向に 3 ヶ所, 奥行き方向に 3 ヶ所, 高さ方向に 4 ヶ所, すなわち合計 36 点における温湿度の測定を同時に行い温湿度の分布を測定した。

なお本実測調査や後述する CFD による予測は, LED 照明を上部 4 段, 下部 1 段の全点灯・調光 100% で行っている。これは岩石標本等の光に強い自然系資料やその他文化財以外のものを展示する際の照明設定で, 熱負荷が最も大きい条件である。美術工芸品などの展示については照度を 100lx 程度としており, これは高さ 5 ~ 6 m 程度の位置にある上部照明 4 段のうち 2 段のみを使用し, 且つ調光 50% 程度の点灯である。

### 2-3. CFD による温度・湿度分布の予測

展示ケース内の温度と相対湿度の分布を予測するために, CFD による解析を行った。CFD は流体が流れる現象に付随した熱移動, 物質拡散などの現象をコンピューターで数値計算をすることにより解析を行う手法である。本研究ではこれまで収蔵庫等について先行研究<sup>7,10-12)</sup>のある三次元熱流体解析システム STREAM<sup>®</sup> (ソフトウェアクレイドル社製) を用いて解析を行った。温湿度分布の予測を行うにあたっての展示ケースに関わる諸条件は, 当該展示ケースの施工図及び仕様書を参照し, 以下のとおり設定した。展示ケースの概要は図 1 に示した通りである。

展示ケース: 幅: 13.0m, 奥行: 1.48m, 高さ: 6.28m, 容積: 120.8m<sup>3</sup>, 仕様書より吹出口からの風速を 0.3m/s, 展示ケース内の空気の循環量を 122.46m<sup>3</sup>/h, 各流路の流量を均一と仮想して設定した。展示ケースの外側の温度は企画展示室の設定値である 23°C とした。

LED 照明: 展示ケースの仕様書・施工図より, 幅方向に 55mm 間隔でサイズ 20mm × 20mm × 20mm の LED を 226 個配置した。また 1 列あたり消費電力が 374W であることから, LED 1 個あたりの発熱量を 1.65W とした。

調湿剤: 当該展示ケースでは, 調湿剤 (240mm × 100mm × 15mm) 246 袋を展示ケースの下部の調湿剤ボックスに収納している。調湿剤の表面の相対湿度を 60%RH の一定値として設定した。

物性値: 空気の物性値について, 日本機械学会編「伝熱工学資料 (改訂第 4 版)」をもとに, 20°C (293K) での値を補間して使用した。密度  $\rho = 1.206 \text{kg/m}^3$ , 粘性係数  $\mu = 1.83 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$ , 定圧比熱  $C_p = 1007 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , 体膨張率  $\beta = 3.495 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ , 熱伝導率  $\lambda = 2.56 \times 10^{-2} \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

境界条件: 壁面応力条件を滑らかな壁 (対数則), 壁面熱移動条件を熱伝達係数  $h = 5.5 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  とし, また仕様書より熱切ガラス熱 (高透過ガラス 5 mm) の熱貫流率  $K = 5.9 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 展示ケース前面ガラス (高透過ガラス 8 mm 複層) の熱貫流率  $K = 5.5 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  として設定した。

以上のような諸条件を設定し, 乱流モデルを用いた定常解析を行い, 循環ファンによる空気の強制対流を行わない場合と, 行った場合のケース内部の温湿度分布の予測を行った。実測調査との比較を行うことで, この解析手法での再現性を確認するとともに, 温湿度分布の要因について検証した。

### 3. 結果

#### 3-1. 温度・湿度分布の実測調査

図2に実測調査結果の一例として、展示ケースの中央付近における異なる高さ(底面から1.5m, 3.0m, 4.5m)での温度、相対湿度、絶対湿度の実測調査の結果を示す。なおこれらの結果は36点のいずれの測定箇所においても同様の傾向が見られた。図に示す測定期間中、3月26日15:10から3月27日21:00まで循環ファンを稼働させず、LED照明点灯のみ、3月31日17:15から4月2日8:55まで循環ファンを稼働させてLED照明を点灯した。

図2の温度の測定結果(上段)から、LED照明を点灯することにより展示ケース内の温度上昇が見られた。強制対流を行わなかった場合の温度は、強制対流を行った場合よりも全体的に高くなった。強制対流の有無にかかわらず床面から1.5mと3mの高さでは温度差がほとんど見られなかったが、4.5mではこれらよりも高温になる傾向が見られた。また強制対流を行った場合の方が高さ方向の温度差の勾配が低く抑えられていた。

図2の相対湿度の結果(中段)から、強制対流を行わなかった場合は、行った場合と比較して4%RH程度相対湿度が低くなった。強制対流の有無にかかわらず、高さ方向の相対湿度差はほとんど見られなかった。

測定した温度及び相対湿度より計算した絶対湿度を図2の下段に示す。強制対流を行った方が展示ケース内の絶対湿度が上昇した。また強制対流の有無に関わらず高さ方向の絶対湿度の差はほとんど見られなかった。

#### 3-2. CFDによる温度・湿度分布の予測

図3に展示ケースの奥行き方向の中心で切った平面上での温度のコンター図を示す。図3上段と下段はそれぞれファンによる空気の強制対流を行わなかった場合と、行った場合の結果を示す。展示ケース内全体がすべて一様ではないが、傾向として強制対流を行った場合の方がケース外の温度として設定した23°Cに近い値で分布すると予測された。また強制対流を行わなかった場合の温度は、行った場合と比較して、床からの高さ3m程度までは0.3から0.4°C程度、4.5m以上では約0.5から0.6°C程度高くなると予測された。また強制対流を行った場合の方が、高さ方向の温度差の勾配が低く抑えられると予測された。

図4に展示ケースの奥行き方向の中心で切った平面上での相対湿度のコンター図を示す。温度の場合と同様、展示ケース内ですべて一様ではないが、強制対流を行わなかった場合の相対湿度は、行った場合と比較して3%RH程度低くなると予測された。また高さ方向の相対湿度分布については、強制対流の有無にかかわらず大きな差異は現れないと予測された。

### 4. 考察

#### 4-1. 実測調査による展示ケース内の温湿度分布

従来の蛍光灯ベース照明との比較は行っていないが、熱切ガラスを介したLED照明の照射であっても、展示ケース内の温度は上昇することが分かった。展示にあたっての照明の調整においては、LED照明であっても蛍光灯やハロゲンライトでの照明と同様に、ケース内部の温度上昇に留意する必要がある。特に今回測定に使用した展示ケースでは、一般的に作品が展示されることが想定される高さ3m程度まで範囲においては温度差がほとんど見られなかったが、4.5m以上の高さから温度の上昇幅が大きくなっており、また照明までの距離が近づくことによる輻射熱による表面温度の上昇も考えられることから、展示ケースの高い位置まで作品を展

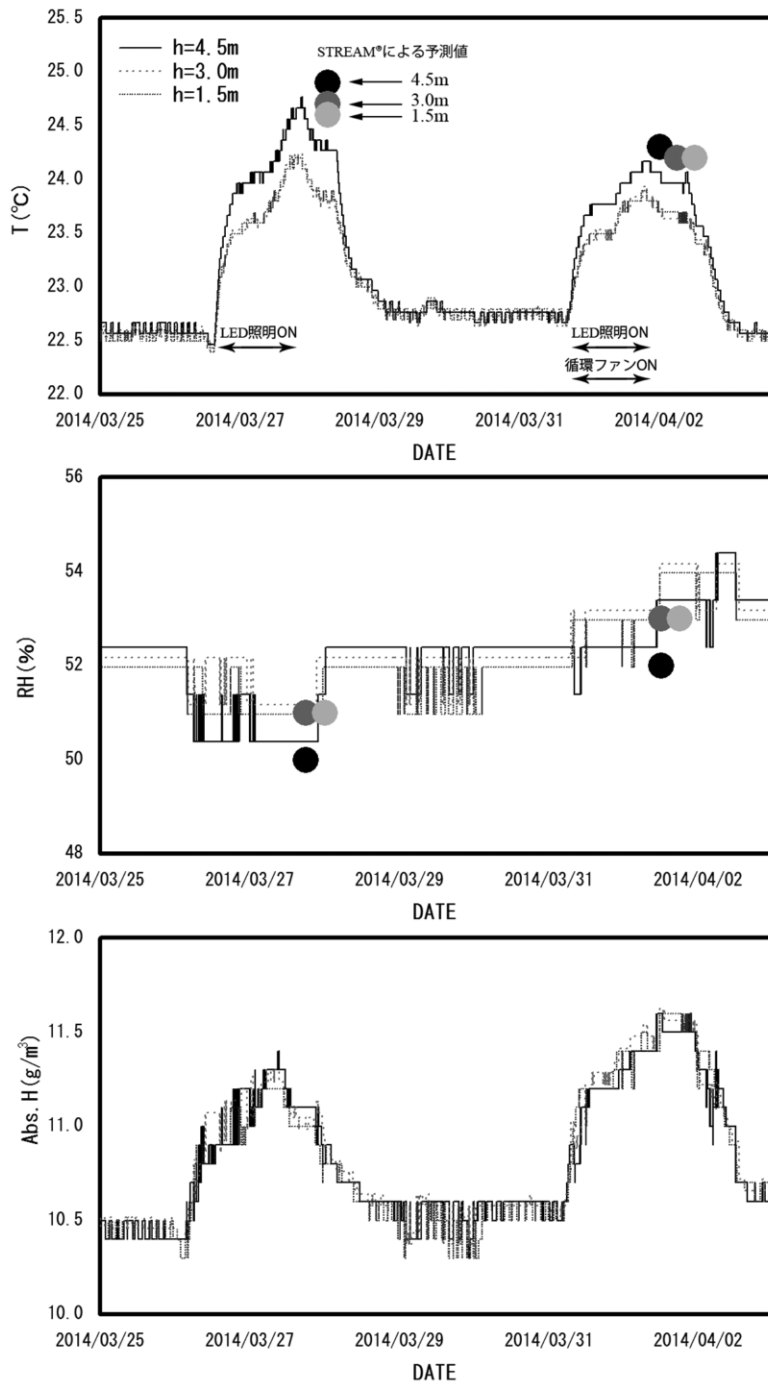


図2 温度（上段）、相対湿度（中段）の実測調査結果及び、これらから計算した絶対湿度（下段）のグラフ。温度・相対湿度の図中にある丸印はSTREAM<sup>®</sup>により計算された予測値。

示するような場合には、ベース照明の照度を低めに設定したうえで、展示ケース外からのスポットライトで照度を調整するなどの、照明手法による手立ても検討する必要があると考えられる。

また循環ファンによる強制対流により、高さ方向の温度差の勾配が少なくなることも分かった。設計意図の通り、循環ファンにより展示ケース上部の暖められた空気を下部へ送ることで温度分布が均一化したものと推定される。特に高さ4.5mを超えるような大型の軸物絵画などを展示する際の、高さ方向の温度差による影響を低減するには、循環ファンの稼働が有効であると考えられる。

循環ファンによる強制対流がない場合に相対湿度が低下したことについて、展示ケース内の温度上昇にともなう相対湿度の低下に対して、調湿剤による水分供給が十分でないことが原因であると推定される。これに対し強制対流がある場合には、温度上昇による相対湿度低下よりも、調湿剤からの水分供給による相対湿度上昇がこれを上回ったものと考えられる。これは絶対湿度の推移と整合するもので、循環ファンの強制対流により積極的に空気が調湿剤と接触することで、効率よく調湿されていると考えられる。

#### 4-2. 展示ケースの運用

前述の通り循環ファンの稼働について、強制対流させた時の方が高さ方向の温度差は少ない傾向が見られ、また調湿された空気が効率良く展示ケース内に送られることから、照明点灯時にはできるだけ循環ファンを稼働させておくことが、展示作品への温度差による物理的なストレスなどを低減できると考えられる。また照明消灯による温度降下時についても、調湿空気の効率的な循環の観点から、消灯と同時に循環ファンを停止するのではなく、温度が定常状態に戻るまで循環ファンを稼働させ続けることが合理的であろう。なお循環ファンの吹出口からの気流(0.3m/s)は、掛け軸などがまったく揺れることがない風速であることは実際に軸物資料を設置して検証した。作品を展示した状態で循環ファンを稼働することによる、展示作品への物理的な影響は少ないものと考えられる。

また温度上昇、降下に要する時間について、強制対流の有無にかかわらず照明点灯からケース内の最高温度に達するまで時間は約9時間であった。また消灯後に展示ケース外の温度まで下がるまでに約11時間を要した。当該展示ケースが設置されている三重県総合博物館の企画展示室の開場時間は平日9時から17時(8時間)、土日祝9時から19時(10時間)であることから、開場時間内にほぼ最高温度まで達するものの、翌日の開場までには展示ケース外と同程度の温度まで降下し、翌日開場時まで熱がこもらないことが分かった。これらのことから本測定を行った展示ケースの運用としては、照明点灯と同時に循環ファンを稼働し、照明消灯後は少なくとも11時間程度は稼働させておくことが温湿度環境管理として望ましく、展示される資料の種類や状態によっては24時間稼働させておくこともありうると考えられる。

#### 4-3. 実測調査とCFDによる温度・湿度分布の比較

STREAM<sup>®</sup>を用いた解析により予測された温度の値を図3から読み取り、図2の実測調査結果の中で丸印として示した。全体として予測された温度よりも実測調査の方が0.5℃程度低くなっているが、これはCFDの初期条件が展示室の設定温度23℃であったのに対して、実測調査時の展示ケース内の定常状態がこの設定温度よりも0.5℃低い22.5℃であったためであると考えている。このことを考慮すればCFDの予測は妥当であると考えられる。また高さ方向の温度分布については、1.5mから3mまでの温度差よりも、3mから4.5mまでの差の方が大きくなることが予測できている。これらのことからSTREAM<sup>®</sup>による解析を用いた温度分布の予測

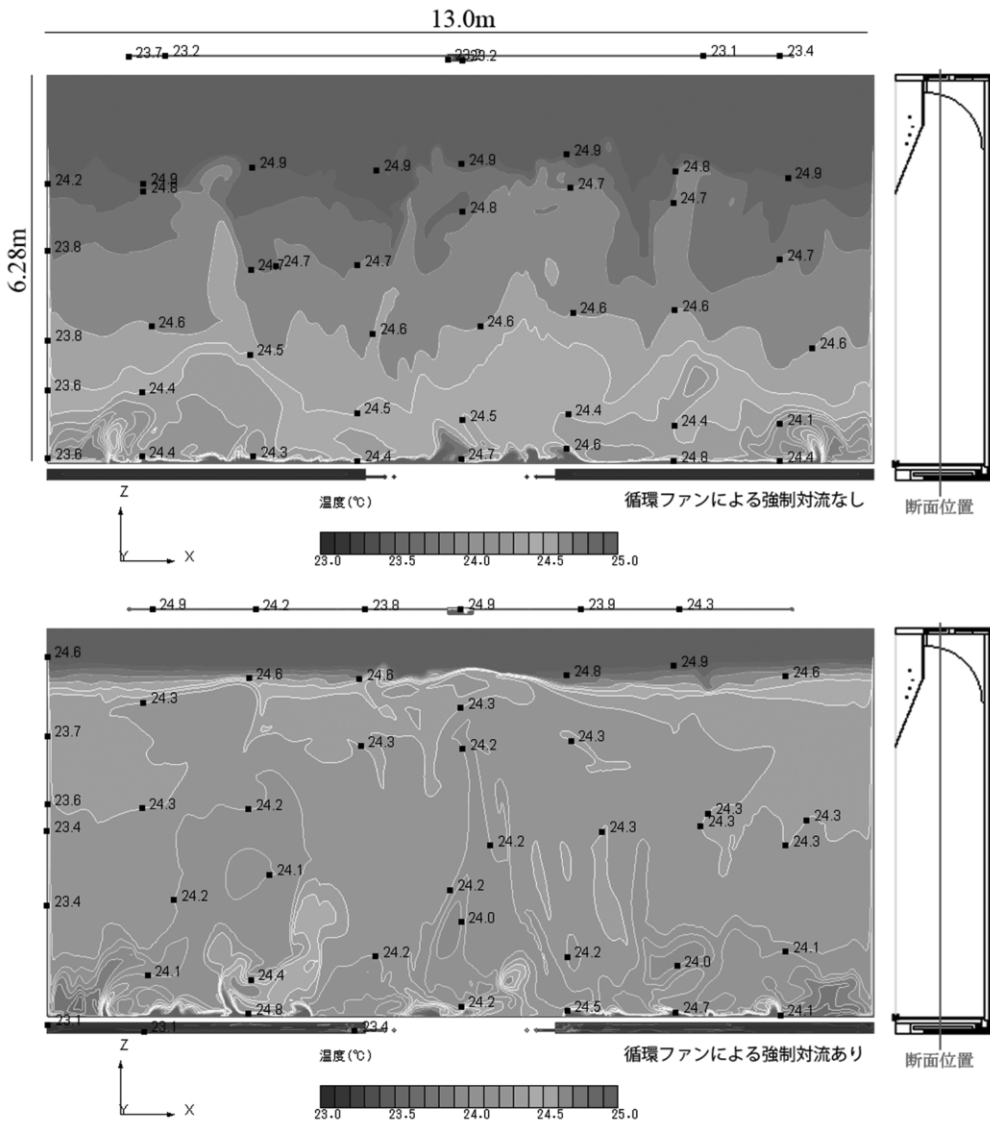


図3 CFDによる温度のコンター図。上段は循環ファンによる強制対流がない場合、下段は強制対流がある場合。

は、実測を概ね再現していると考えられる。

また相対湿度についても、温度と同様に図2中で丸印として示した。温度が実測よりも高く計算されたため、これに伴い相対湿度は実測値よりも若干低湿度に計算されているがその差は1%RH以下であり、特に強制対流がない場合には相対湿度が低下し、強制対流がある場合には相対湿度が上昇することや、上下方向の湿度分布などについて、概ね実測値の相対湿度分布を再現していると考えられる。

以上のことから、今回設定した諸条件を用いたSTREAM®による温度分布、相対湿度分布の予測は、実際の温湿度分布の傾向を概ね再現できたと考えられる。

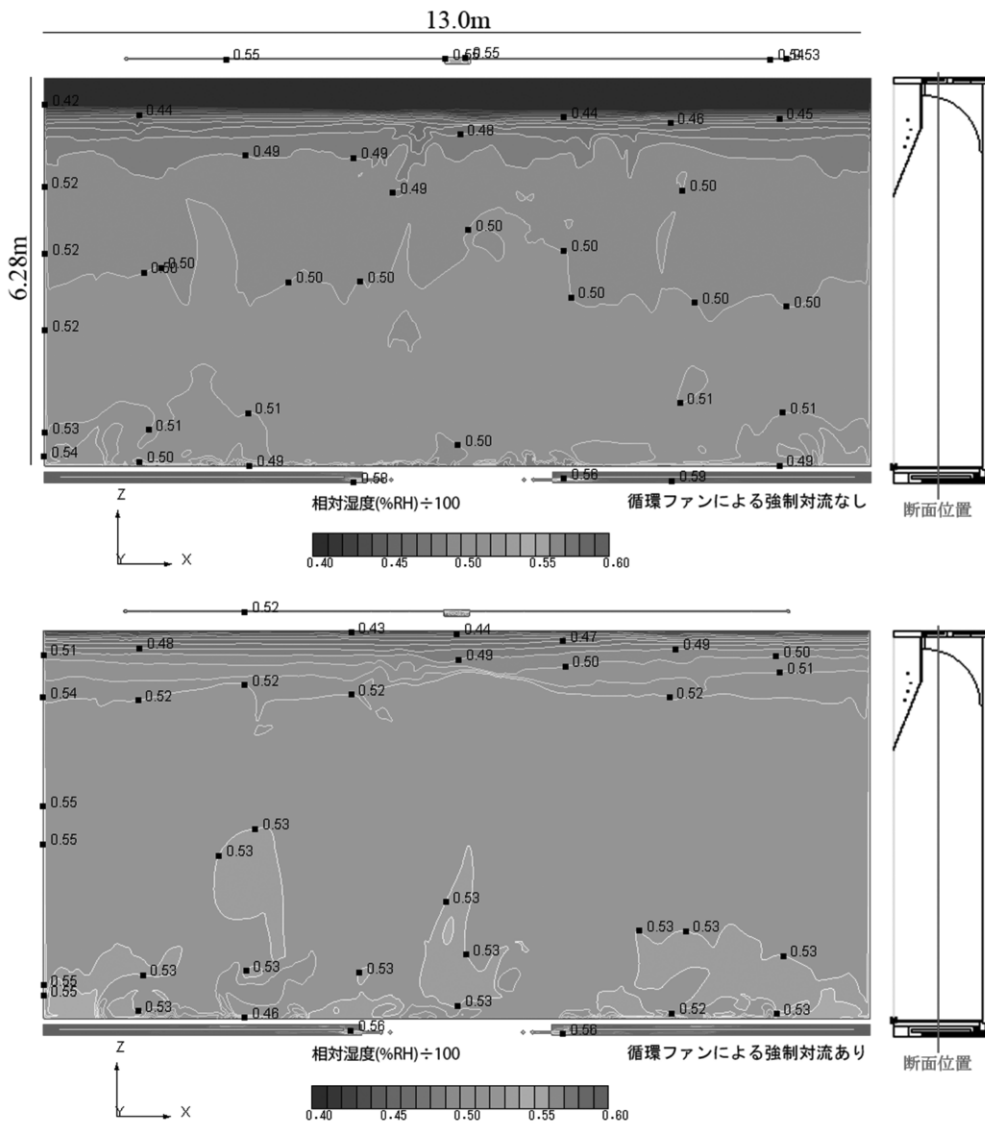


図4 CFDによる相対湿度のコンター図。上段は循環ファンによる強制対流がない場合、下段は強制対流がある場合。図中数値は相対湿度(%RH)を100で除したもの。

今後新たな展示ケース製作や、既存展示ケースの改修を行う際にCFDを導入することは有効であると判断される。熱切ガラス部分の断熱性能や、風量、吹出口スリット断面積・形状、設置位置などを調整し、展示ケース内の温湿度分布を均一化できる設計や仕様の決定に応用することが期待される。

#### 4-4. 温度分布の要因のCFDによる検証

前述のとおり、STREAM®による温湿度分布の予測が概ね実測調査を再現できたことを踏まえ、この結果を用いて文化財等の展示において最も懸念される高さ方向の温湿度分布の要因



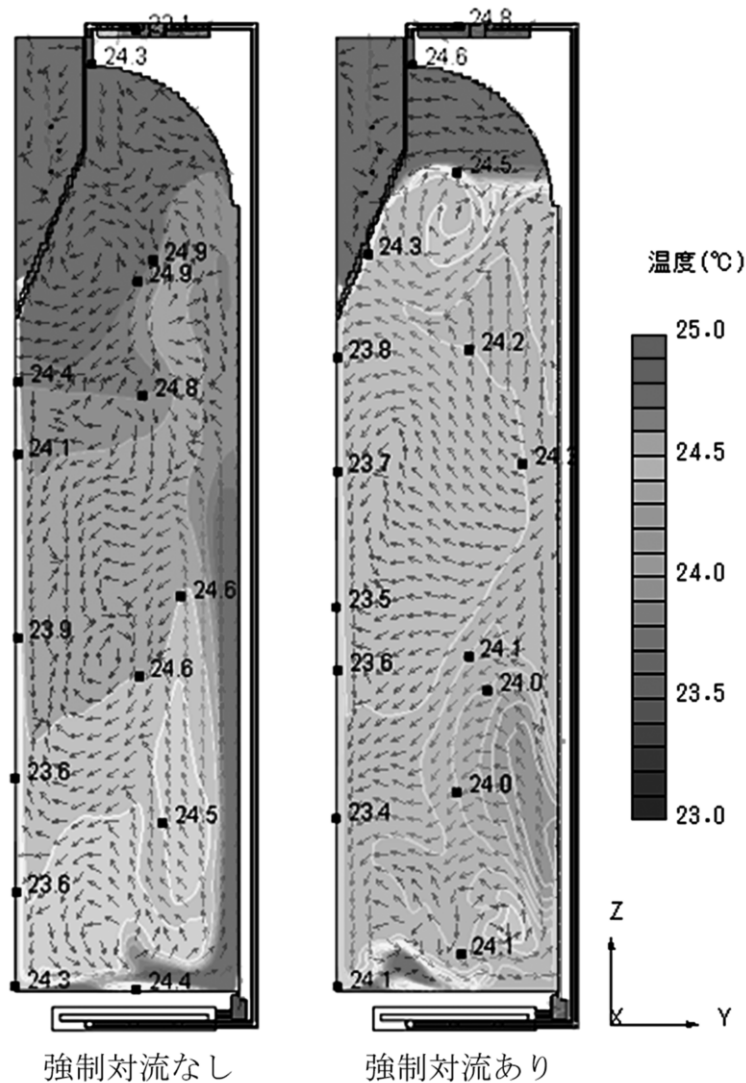


図5 展示ケース中央における温度コンター図と気流方向(矢印)。左側が循環ファンによる強制対流なしの場合、右側が強制対流ありの場合。

について検証を行った。

図5に展示ケースの中央における奥行方向の断面について、温度のコンター図と気流方向を示す図を重ねたものを示す。右側の循環ファンによる強制対流がある場合、上部熱源である熱切ガラス面で加熱され比重が軽くなった空気は天井に向かって上昇し、最頂部の吸込口へ流れている様子が分かる。また熱切ガラス面には温度の低い空気が接触する気流が見て取れる。これに対して左側の強制対流なしの場合、熱切ガラス面から天井にかけて乱流が見られ、高い温度の空気が再度熱切ガラス面へ向かい、上部に熱がこもる様子が見て取れる。このことが実測調査において床からの高さ4.5mでの温度が高くなった要因であると考えられる。

この展示ケース内の温度上昇は、上部LED照明を熱源としたものであることから、熱切ガラ

ス部分の断熱性能や照明器具設置空間の排熱機構の向上など、文化財を展示するエアタイト空間外の構造改善や、乱流が発生しにくいケース形状の検討などにより、上部の温度上昇は低減できるものと考えられる。

## 5. まとめ

三重県総合博物館の大型壁付展示ケースについて、LED照明点灯時の温湿度分布、循環ファンと調湿剤の効果について実測調査を行った。その結果LED照明のみの展示ケースであっても温度上昇が見られ、蛍光灯やハロゲンライトによる照明と同様に、ケースの仕様や展示運用について注意が必要であることが分かった。また調湿剤と循環ファンの導入は高さ方向の温湿度分布の均一化に有効であることが分かった。

CFDによる温湿度分布の予測を行った。STREAM<sup>®</sup>により展示ケース内の温湿度分布を概ね予測でき、また高さ方向の温度分布の要因を推定することができた。展示ケースの設計や仕様の決定に応用することが期待される。

## 参考文献

- 1) 半沢重信：『博物館建築—博物館・美術館・資料館の空間計画』、鹿島出版会（1991）
- 2) 三浦定俊，佐野千絵，木川りか：『文化財保存環境学』、朝倉書店（2004）
- 3) 独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所編：『文化財の保存環境』、中央公論美術出版（2011）
- 4) 登石健三，三浦定俊：モナリザ展示に際しての温湿度調整，保存科学，**14**，1-7（1975）
- 5) 石崎武志：重要文化財「細川家波奈之丸舟屋形」の保存環境調査，保存科学，**43**，107-112（2004）
- 6) 犬塚将英，鳥越俊行，石崎武志，本田光子：九州国立博物館の壁付展示ケースにおける換気回数，温度，相対湿度の測定，保存科学，**44**，83-96（2005）
- 7) 石崎武志，白石靖幸，肥塚祐美子：熊本城「細川家舟屋形」の保存環境に関する研究，保存科学，**45**，227-240（2006）
- 8) 犬塚将英，福西大輔，石崎武志：熊本城「細川家舟屋形」の保存環境調査，保存科学，**48**，147-152（2009）
- 9) 三浦定俊：環境システムとしての展示ケース，保存科学，**21**，55-59（1982）
- 10) 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）
- 11) 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』，**2**，25-40（2010）
- 12) 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』，**2**，41-54（2010）

キーワード：保存環境 (conservation environment)；展示ケース (exhibition case)；LED照明 (LED light)；温湿度分布 (distribution of temperature and humidity)；熱流体解析 (CFD, Computational Fluid Dynamics)

## Study on the Distribution of Temperature and Humidity in Exhibition Cases Equipped with LED Light Devices

Hajime MABUCHI\*, Nobuyoshi HISAOKA\*<sup>2</sup>,  
Yoshinori HAYASHI\*<sup>2</sup> and Masahide INUZUKA

In the present study, the distribution of temperature and relative humidity inside one of the exhibition cases in the temporary exhibition room of Mie Prefectural Museum due to heat generated from LED lighting devices was measured and their 3D distribution was estimated by computational fluid dynamics (CFD). The effects of installed silica gel humidity conditioner and air circulation system were observed from the measurements, and the main factors of the distribution of temperature were evaluated from the results of CFD.

As a result of measurements, it was found that the temperature inside the exhibition case was higher when there was no forced air circulation than when there was. The temperature at 4.5m from floor level was especially high in both circumstances, but with forced air circulation the gradient of temperature distribution was lower in the direction of the height. As to the gradient of relative humidity distribution, no considerable difference was found between the two circumstances. However, the absolute humidity increased more with forced air circulation. It can be presumed that the air controlled with humidity conditioner was delivered more efficiently.

Estimations of temperature and humidity distribution by CFD were nearly the same as the results of measurements. From these estimated temperature distribution and air direction by CFD, turbulence of heated air and re-heating were observed at a high position on the exhibition case, and it can be presumed that these phenomena were the main factors for temperature increase when there was no forced air circulation.

Even though LED light generates less heat than incandescent or fluorescent light, the temperature inside exhibition case will increase. So we need to be continually careful when setting display lights. Also, for efficient humidity control, it is better that the air inside exhibition case be circulated all the time.

---

\*Independent Administrative Institution, National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo; Mie Prefectural Museum

\*<sup>2</sup>OKAMURA CORPORATION