

熊本城「細川家舟屋形」の保存環境に関する研究

石崎 武志・白石 靖幸*・肥塚 祐美子*

1. はじめに

文化財の展示・収蔵は、美術館・博物館の様に空調を用いて温湿度制御を行っている施設だけでなく、空調のない神社や仏閣などでも行われている。温湿度制御のない場合は、建築内部の温湿度が外気の温湿度変動を受けやすく、湿度が大きく変動し、乾燥により剥離が生じたり、結露が生じ、錆びやカビの発生などにより文化財が被害を受ける可能性がある。前報¹⁾では、熊本城天守閣内の重要文化財「細川家舟屋形」の現在の保存環境について測定、問題点を把握し、今後の展示環境改善のための方策の提案について報告した。本年3月に、提案に沿って、展示ケース内に調湿建材および断熱材が設置された。本研究では、展示ケース内の温熱環境の実測調査、熱・湿気回路網解析²⁾およびCFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を実施し、実測結果と比較することにより、これらの解析手法の有効性を確認すると共に、現在のケース内環境が改修によりどの程度改善されたかを把握する。また、その他の改善策に関しても数値シミュレーションを実施し、より良い保存環境の提案及び検証を行ったので以下に報告する。

2. 実測概要

2-1. 展示ケースの概要

熊本城の天守閣内(写真2の丸枠内)に設置されている展示ケースを写真1に示す。改修は平成17年3月に行われ、調湿建材A:3.6m³、調湿建材B:0.38m³、調湿建材C:2.3m³、断熱材:1.9m³をケース内の天井、床、壁、柱の表面に設置した。ケース断面図を図1に示す。



写真1 細川家舟屋形の展示ケース



写真2 熊本城全景
(円は、展示ケースの位置を示す。)

*北九州市立大学



図1 展示ケース断面図

2-2. 温湿度測定

改修工事前後の平成16年2月より平成17年9月まで、小型温湿度計（Onset社製，Hobo08）を用い、温湿度を30分毎に測定した。測定場所は、舟屋形1階、2階、屋根、ケース外の4点である。各設置場所を図1に示す。写真3は舟屋形1階に設置した温湿度計である。



写真3 舟屋形1階に設置した温湿度計

2-3. 換気量測定

平成17年9月13日の11:00から17:00の間、30分毎に換気量の測定を行った。測定機器はSK-001(コーナー札幌社製)を使用した。二酸化炭素をケース内に継続的に放出し、その放出量と測定濃度から展示ケース内の換気量を算出した(一定濃度法)。ケース内及び屋根裏空間の2点の換気量を計測した。定常に達した後の4時間の平均換気量は、展示ケース内が $190\text{m}^3/\text{h}$ 、屋根裏空間が $93\text{m}^3/\text{h}$ であった。写真4は換気量測定時の様子である。



写真4 換気量測定器

3. 熱・湿気回路解析の概要

3-1. 解析対象

図1に示す展示ケース及び屋根裏空間を解析対象とする。展示ケース及び屋根裏空間の構成部材を表1に示す。部材の名称は図1と対応している。また、各部材の熱物性及び湿気物性^{3,4)}を表2、表3にそれぞれ示す。ここで、調湿建材の湿気物性値に関しては、一部、建材メーカー

より提供して頂いた。表3において、調湿建材Cの湿気物性値は、入手できなかったため、調湿建材Aと同じと仮定した。

表1 展示ケース及び屋根裏空間の部材構成 (図1参照)

	改修前	改修後に追加されたもの
壁1	コンクリートブロック	調湿建材A
2F入り口扉	木材	調湿建材A
壁2	軽量コンクリート	—
壁3	軽量コンクリート	調湿建材B、木材
壁4	軽量コンクリート	調湿建材A
1階床	軽量コンクリート	調湿建材C
2階床	軽量コンクリート	—
天井1	合板	調湿建材A、断熱材
天井2	合板、軽量コンクリート、瓦	—
ガラス	ガラス	—
舟屋形	木材	—

表2 主要部材の熱物性値

部材	比熱 (kJ/kg K)	比重 (kg/m ³)	熱伝導率 (W/mK)
調湿建材A	0.75	500	0.072
調湿建材B	0.92	1200	0.30
調湿建材C	0.75	1600	0.072
断熱材	0.75	220	0.047
コンクリートブロック	10.5	1500	0.54
軽量コンクリート	1.00	1600	0.78
木材	1.3	600	0.18
合板	1.3	550	0.18
瓦	0.75	2500	0.78
ガラス	0.75	2500	0.78

表3 主要部材の湿気物性値

部材	湿気伝導率 (kg/ms(kg/kg))	空隙率	κ (kg/m ³ (kg/kg))	ν (kg/m ³ K)
調湿建材A	0.072	0.6	590000	480
調湿建材B	1.6x10 ⁻⁶	0.53	400	2.00
調湿建材C	調湿建材Aと同じと仮定			

3-2. 解析手法

熱・湿気回路網解析は、建築環境の空間を離散化手法により、熱容量節点系によりモデル化し、異なる節点間の伝導、放射、対流伝達、移流や貫流などのすべての熱移動形態を一般化コンダクタンスと呼ぶ一種の係数で表現し、その節点方程式を解くことにより、建築空間内の温度や湿度分布等を求める解析手法である²⁾。

本解析には、含水率が低く液相水分の移動が小さい。ハイグロスコピック領域に対応した κ - ν モデル(以下の2つの方程式)を適用した⁵⁾。

水蒸気の拡散方程式

$$\left| k \psi_{air} 2 \rho \frac{\partial X}{\partial t} \right|_{\frac{\partial X}{\partial x}} \left| \frac{\partial X}{\partial x} \right| 2 \tau \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

熱の拡散方程式

$$\left| C \psi 2 L \tau \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{\frac{\partial T}{\partial x}} \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right| 2 L \rho \frac{\partial X}{\partial t} \quad (2)$$

ただし k : 空隙率 [m^3/m^3], ρ : 空気密度 [kg/m^3], X : 絶対湿度 [kg/kg'], ここで, kg/kg' の単位は、建築環境工学の分野で使われているもので、単位乾燥空気量あたりの水分量を示している, λ' : 建材の湿気伝導率 [$kg/ms(kg/kg')$], T : 温度 [K], C : 建材の比熱 [J/kgK], ρ : 建材密度 [kg/m^3], λ : 建材の熱伝導率 [W/mK], L : 蒸発潜熱 [J/kgK], x : 位置 [m], t : 時間 [s] である。 κ , ν は建材の吸放湿特性を表すパラメーターであり、吸放湿量 f [kg/kg'] とは(3)式のように表される。

$$\rho \left| \psi \frac{\partial f}{\partial X} \right| 4 \tau \left| \psi \frac{\partial f}{\partial T} \right| \quad (3)$$

3-3. 解析条件

①屋外条件：2004年3月～9月，2005年3月～8月の実測データを用いた。日射量等のデータは気象庁気象統計情報のデータ⁶⁾を用いた。また，図1の展示ケース外における実測データも境界条件として用いた。

②室内条件：照明発熱は蛍光灯とスポットライトを使用しており，それぞれ発熱量は40Wと50Wである。使用数はカバー付き蛍光灯18本，スポットライト4個であり，全体で920Wを使用している。点灯時間は9：00～18：00の7時間であり，毎日点灯している。対流熱伝達率及び湿気伝達率はそれぞれ $9.3W/m^2K$ 及び $0.00925kg/m^2s(kg/kg')$ を用いた。

③建物条件：ケース内全体の容積約 $580m^3$ ，屋根裏部分の容積約 $335m^3$ である。また，主要部材の物性値を表2，3に示す。

④外気導入量：2-3の換気量の実測値を用いた。

3-4. 解析ケース

解析ケースは表4に示す8ケースとした。CASE1（調湿材なし），CASE2（調湿材あり）は改修前後の実際の状態を対象としたものである。CASE3（調湿材なし）は改修後の気象データを用い，改修前の展示ケースを対象として解析を行ったものである。その他，換気量，ガラスの断熱性能，照明機器に関するケーススタディを実施している。

表4 解析ケース

解析ケース	期間	調湿建材の有無	換気量	ガラス熱伝導率 (W/mK)	照明発熱 (W)
CASE1	2004	無	1	0.78	920
CASE2	2005	有	1	0.78	920
CASE3	2005	無	1	0.78	920
CASE4-1	2005	有	1/2	0.78	920
CASE4-2	2005	有	1/5	0.78	920
CASE4-3	2005	有	1/10	0.78	920
CASE5	2005	有	1	0.071	920
CASE6	2005	有	1	0.78	230

4. 実測結果及び熱・湿気回路網の解析結果

4-1. 改修前後の比較及び予測精度の検証

2004年及び2005年の実測結果を図2～7に示す。また、同条件での熱・湿気回路網解析の結果(CASE 1, 2)も併せて示す。ただし、回路網の解析結果に関しては展示ケース内の温湿度の結果のみ示してある。気象条件が異なるため、一概には判断できないが、図2と図3を比較すると図3の夏期は図2に比べ、ややケース内の変動が小さいことがわかる。これらの図で、左の図の横軸は、6月1日から30日まで、右の図は、8月1日から30日までを示している。図4と5の絶対湿度、図6と7の相対湿度では、更に変動が小さく抑えられている。特に改修後の6月の相対湿度は概ね50～60%となっており、梅雨時に顕著な調湿効果が確認できる。熱・湿気回路網解析の予測精度に関して、CASE 1（調湿材なし）の場合、概ね実測とほぼ同じ傾向を再現することができた。CASE 2（調湿材あり）では、絶対湿度及び相対湿度に関して6月末に多少の差が生じている。ハイグロスコピック領域の簡易なモデルではあるが、熱・湿気性状を概ね捉えていると言える。従って、以後このモデルを用いて解析を行った。

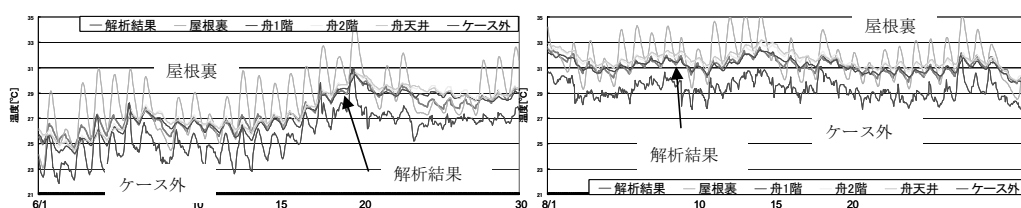


図2 CASE 1 温度分布(左：6月，右：8月)

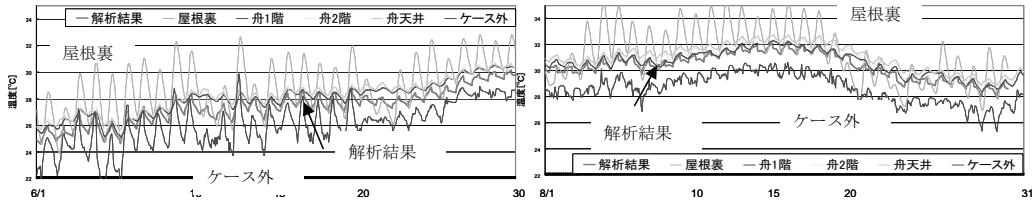


図3 CASE 2 温度分布(左: 6月, 右: 8月)

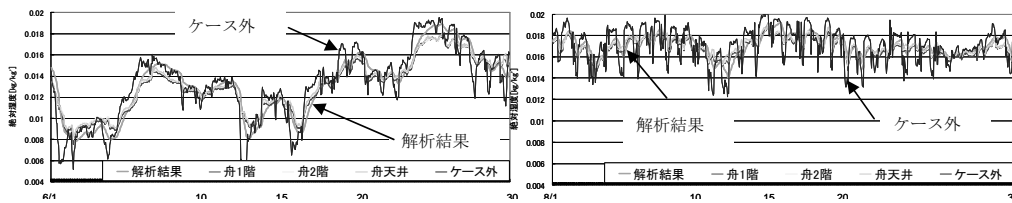


図4 CASE 1 絶対湿度分布(左: 6月, 右: 8月)

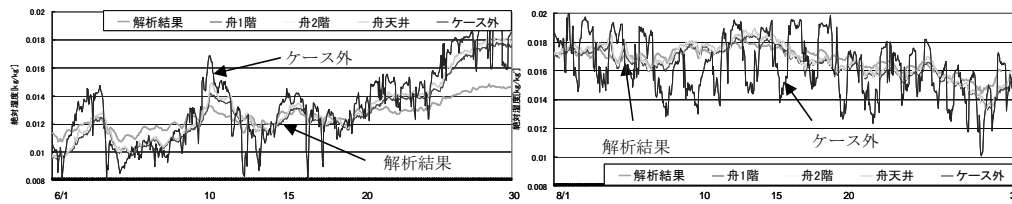


図5 CASE 2 絶対湿度分布(左: 6月, 右: 8月)

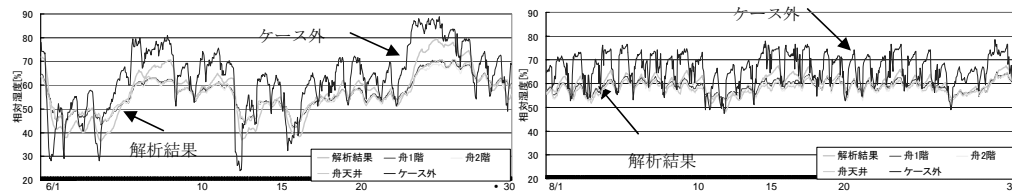


図6 CASE 1 相対湿度分布(左: 6月, 右: 8月)

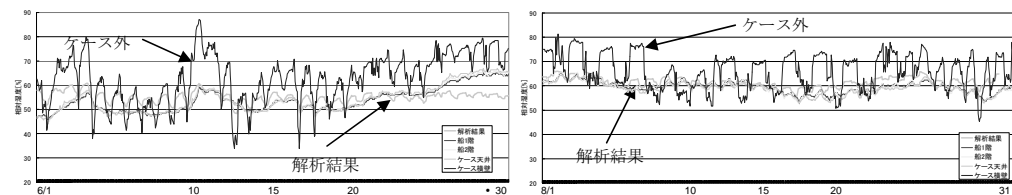


図7 CASE 2 相対湿度分布(左: 6月, 右: 8月)

4-2. 調湿建材と断熱材の効果：CASE 2 と 3 の比較

CASE 2（調湿材あり）及びCASE 3（調湿材なし）の結果を図8, 9, 10に示す。図中の「調湿有」のデータはCASE 2, 「調湿なし」のデータはCASE 3の解析結果である。両ケースとも2005年の気象データを用いている。温度(図8)は、全体的に、断熱材を設置しているCASE 2の方が低くなっており、湿度に関しても、絶対湿度(図9), 相対湿度(図10)共に、明らかにCASE 2の方が、変動が小さい。調湿建材の導入効果が確認できる。

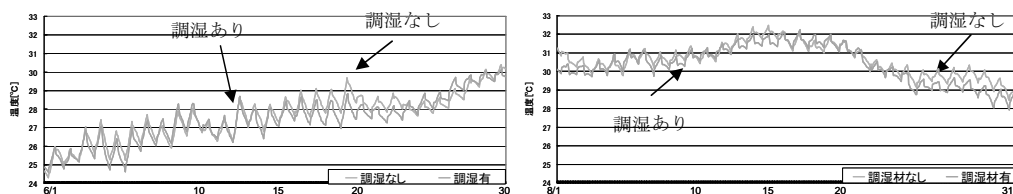


図8 CASE 2とCASE 3の温度比較(左：6月, 右：8月)

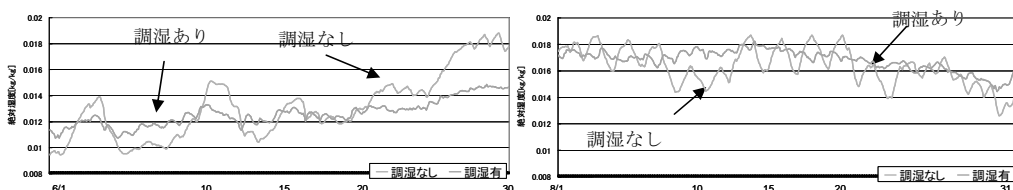


図9 CASE 2とCASE 3の絶対湿度比較(左：6月, 右：8月)

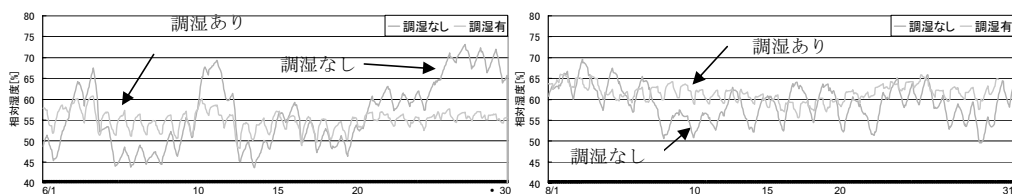


図10 CASE 2とCASE 3の相対湿度比較(左：6月, 右：8月)

4-3. 気密性能(換気量)：CASE 2 とCASE 4-1～3の比較

換気量を変化させた場合の結果を図11, 12に記す。図中のデータはそれぞれ、換気量1がCASE 2, 換気量1/2がCASE 4-1, 換気量1/5がCASE 4-2, 換気量1/10がCASE 4-3である。温度に関しては、換気量の差異が室温に与える影響は小さく、ケース間でほとんど差は無い。一方、相対湿度に関しては換気量を1/2以下にすると、湿度も低下し、全体的に5~10%程度低くシフトする。これは、換気量が小さくなるとケース外の湿度変化の影響を受けにくくなるためと考えられる。換気量1/2の場合(CASE 4-1), 換気量1(CASE 2)に近い結果となり、換気量1/10の場合(CASE 4-3), 換気量1/5(CASE 4-2)とほぼ同じ結果となった。従って、ケースの気密性を高める場合、現状の1/5の換気量となる性能で十分であることが分かる。

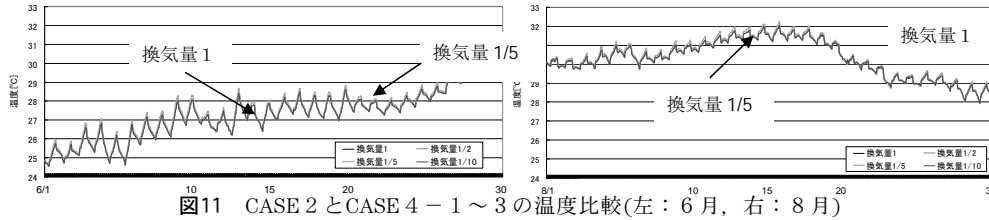


図11 CASE 2とCASE 4-1～3の温度比較(左：6月，右：8月)

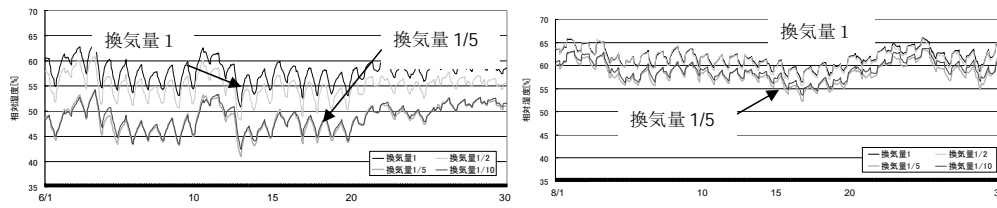


図12 CASE 2とCASE 4-1～3の相対湿度比較(左6月，右8月)

4-4. ガラスの断熱性能:CASE 2と5の比較

展示ケースのガラスの断熱性を向上させた場合の結果を図13, 14に記す。図中の「ガラス」はCASE 2の通常のシングルガラスを用いた場合, 「ペアガラス」はCASE 5を示す。CASE 2及びCASE 5であまり差は見られなかった。ペアガラスを導入することにより8月に温度変動が若干小さくなっているものの, 他のケースに比べ, 温湿度変動の抑制効果はあまり確認できなかった。この点, ガラス部の熱貫流よりも他の部位(例えば, 天井等)の貫流や換気等が室内温湿度変動へ与える影響が大きいためと考えられる。

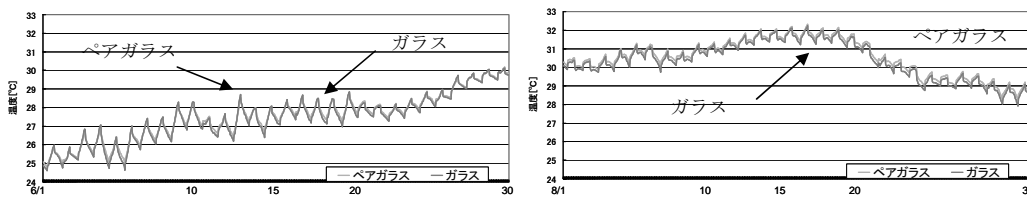


図13 CASE 2 (ガラス)とCASE 5 (ペアガラス)の温度比較(左：6月，右：8月)

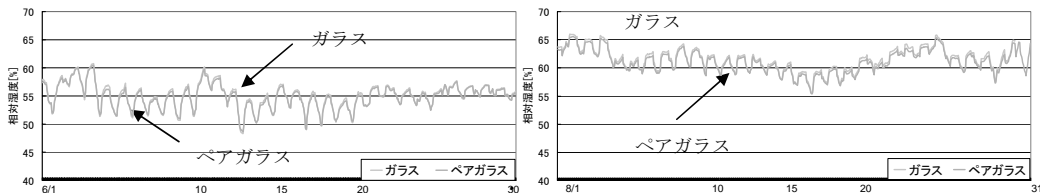


図14 CASE 2 (ガラス)とCASE 5 (ペアガラス)の相対湿度比較(左：6月，右：8月)

4-5. 照明効果の比較:CASE 2と6の比較

照明にLEDを使用して展示ケース内の発熱量を低減させた場合の解析を行った⁷⁾。CASE 2及びCASE 6の結果の比較を図15, 16に示す。図中のデータはそれぞれ蛍光灯がCASE 2, LEDがCASE 6に対応する。差異は夏期の場合に顕著に現れており, LEDを導入することにより, 温度変動が小さくなるだけでなく, 全体的に1℃以上温度が低下している。

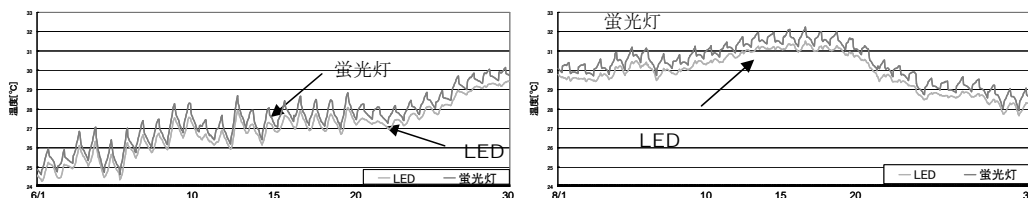


図15 CASE 2 (蛍光灯)とCASE 6 (LED)の温度比較(左:6月, 右:8月)

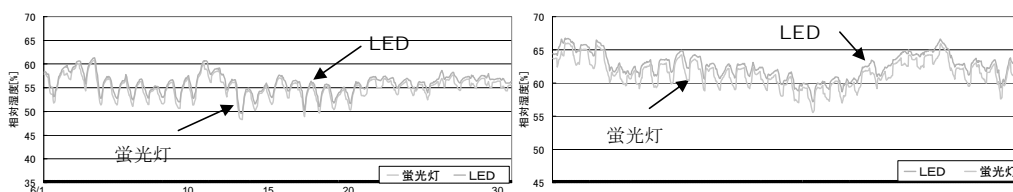


図16 CASE 2 (蛍光灯)とCASE 6 (LED)の相対湿度比較(左:6月, 右:8月)

5. CFD解析による検討

実測により展示ケース内において上下温湿度分布が生じていることが確認された。このため, 熱・湿気回路網解析より算出した展示ケース内各表面の温・湿度を境界条件として与え, CFD解析により展示ケース内の温・湿度分布を評価する。用いたCFD解析モデルを図17に示す。照明発熱に関しては, 実際に照明が設置されている箇所に照明機器に対応した発熱条件を与えた。解析ケースは, 熱・湿気回路網解析結果を考慮し, 表4中のCASE 2, 3, 6の3ケースを対象とし, 各ケースそれぞれ, 6月の梅雨期及び8月の夏季の日中12時と夜間21時の温・湿度分布を算出した。結果については, 梅雨期の夜間及び夏期日中について示す。

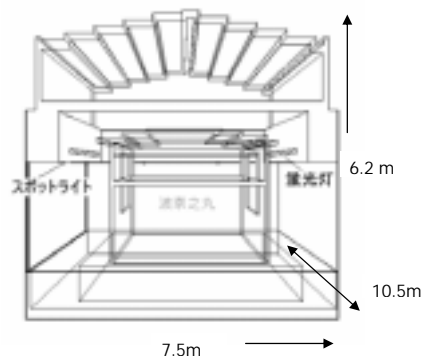


図17 CFD解析モデル(展示ケース内)

5-1. 鉛直温度分布

図18に示す通り、改修後も梅雨期、夏季共に昼夜問わず温度差1℃以内ではあるが上下温度分布が形成されており、実測、CFD解析結果の双方で確認できる。

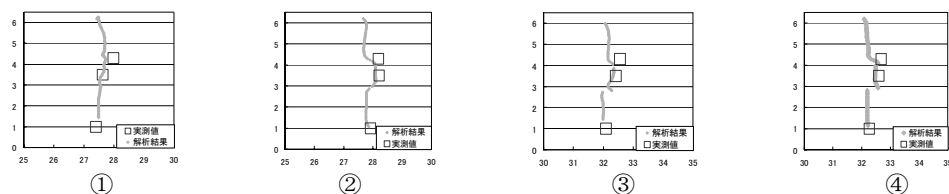


図18 CASE 2 舟屋形の中心位置での鉛直温度分布
(①：梅雨期日中、②：梅雨期夜間、③：夏季日中、④：夏季夜間)

5-2. 梅雨期の解析

梅雨期の解析結果を図19、図20にそれぞれ示す。夜間では断熱材を設置していないCASE 3 (調湿なし) で上部に熱だまりが生じている (図19)。CASE 2 (調湿あり) とCASE 3の湿度分布を比較すると、日中はCASE 3が、夜間はCASE 2が高くなっていた。これにより、CASE 2の方の湿度変動が抑制されており、調湿建材の導入効果がCFD解析からも確認できる。また、昼夜問わず、LEDを導入することにより、展示ケース内の平均温度が低下し、相対湿度が若干ではあるが上昇する。



図19 梅雨時の温度分布(左：CASE 3 中央：CASE 2 右：CASE 6 / 6月15日21時)



図20 梅雨時の湿度分布(左：CASE 3 中央：CASE 2 右：CASE 6 / 6月15日21時)

5-3. 夏季の解析

夏季の解析結果を図21、図22にそれぞれ示す。CASE 3では、日中、照明発熱及び天井面からの貫流熱の影響により、展示ケース内の上部に熱だまりが発生している。照明近傍で高温域が形成されており、照明発熱が、展示ケース内の温度場に大きな影響を与えていることが確認

できる(図21)。CASE 2とCASE 3の湿度分布を比較すると特に日中において、調湿建材の導入の効果を確認できる(図22)。梅雨期の場合と同様にLEDの導入により、展示ケース内の平均温度が低下し、相対湿度が上昇する。

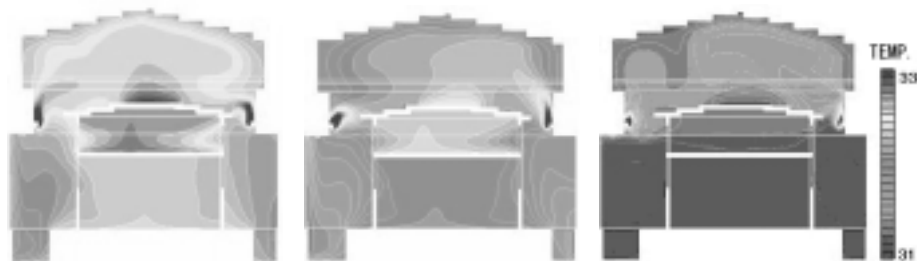


図21 夏季時の温度分布(左：CASE 3 中央：CASE 2 右：CASE 6 / 8月15日12時)



図22 夏季時の湿度分布(左：CASE 3 中央：CASE 2 右：CASE 6 / 8月15日12時)

6. まとめ

熊本城「細川家舟屋形」の展示ケース内の実測調査、熱・湿気回路網解析及びCFD解析を行い、以下の知見を得た。

- 1) 2005年の改修工事は、CASE 1 (調湿建材なし)、CASE 2 (調湿建材あり) 及びCASE 3 (調湿建材なし)の結果により効果があったといえる。特に相対湿度に関する効果は大きく、調湿建材及び断熱材導入の意義があったと言える。
- 2) 今回、熱・湿気回路網解析に用いたモデル(ハイグロスコピック領域の熱・水分同時移動方程式)により、実用上問題なく、展示ケース内の温湿度変化を再現できる。
- 3) その他の改修案として、展示ケースの気密性能を向上させ、換気量を低減させることにより、湿度変動を抑制できる。
- 4) LEDを導入することにより、展示ケース内の温度上昇及び変動を抑制できる。
- 5) 冬季の実測及び数値シミュレーション、より高精度な熱水分同時移動モデルの導入、物性値の更なる整備に関しては、今後の検討課題である。

謝辞

熱・湿気回路網解析は、(株)清水建設・技術研究所の奥山博康博士より提供して頂いたNETS(熱・湿気・換気回路網ソフトウェア)により実施させて頂きました。日本インシュレーション株式会社の若木和雄様より調湿建材及び断熱材の熱・湿気物性データを提供して頂きました。熊本市立熊本博物館の石原健矩様には、実測時の対応、資料提供等で甚大なご協力を頂きまし

た。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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号，107-112（2004）
- 2) 奥山博康：熱・換気回路網計算プログラムNETS，伝熱WGシンポジウム「最近の建築電熱シミュレーションと設計ツール」日本建築学会・熱環境小委員会・伝熱ワーキンググループ，63-70，（1998）.
- 3) 田中俊六，武田仁，足立哲夫，土屋喬雄：『建築環境工学改訂2版』，井上書院(2004).
- 4) 日本建築学会：『建築材料の熱・空気・湿気物性値』，丸善(2001).
- 5) 松本衛：建築壁体における熱・水分の同時移動及び水分蓄積に関する研究博士論文(1978)
- 6) 気象庁気象統計情報HP (2005)<http://www.data.kishou.go.jp/index.htm>
- 7) LED照明推進協議会 (2005) <http://www.led.or.jp>

キーワード：熊本城(Kumamoto Castle)；展示環境(environmental condition for exhibition)；温湿度 (temperature and humidity)；調湿材 (humidity buffer board)；熱・湿気回路網解析(thermal and moisture network analysis)；CFD解析 (CFD analysis)

Study of the Environmental Condition around a Cabin of the Hosokawa Family's Ship in Kumamoto Castle

Takeshi ISHIZAKI, Yasuyuki SHIRAISHI* and Yumiko KOIZUKA*

A cabin of the Hosokawa family's ship is exhibited in the donjon of Kumamoto Castle, which is located in the center of Kumamoto city. The Hosokawa family's ship was built in 1839. The cabin part of the ship was moved into the donjon in 1962 for exhibition. The cabin was subjected to large humidity changes due to outside climate change, and a part of the metal plates in the ceiling rusted and the screen paintings were partly damaged. Based on a detailed study of the humidity and temperature condition inside the case, it was proposed to install humidity buffer boards around the wall, floor and ceiling to reduce the inside humidity change. The purpose of this study is to evaluate this protective measure with measured results and simulations. At first, the validity of simulation models of a thermal and moisture network analysis software and CFD (Computational Fluid Dynamics) software was evaluated by comparison between the measured results and simulated ones. Comparison between the measured humidity and temperature changes and simulated ones corresponded well, and it showed the validity of these simulation models for this case. The measured temperature and humidity changes inside the case before and after the installation of the humidity buffer boards and simulation results showed that this protective measure was quite effective. Further simulations were performed when the present light was substituted with LED or the present glass was changed to pair glass. These simulation results showed that the use of LED was quite effective but the use of pair glass was not. As a conclusion, these simulation techniques are useful in evaluating the effectiveness of protective measures for the conservation of cultural properties.

*The University of Kitakyushu

