

川越市山車収蔵施設内の温湿度変化の実測と解析

石崎 武志・高見 雅三^{*}・古谷 太慈^{**}・ジョン, グルネワルド^{***}

1. はじめに

蔵は古くから、食糧を貯蔵したり、貴重なものを収蔵する施設として使われてきた。蔵の中の湿度は年間を通して比較的安定している。これは、壁材料として使われている土が高い調湿機能を持っているためである。現在では、文化財を保管する収蔵庫としても使われている。これまでに川越市の6箇所の山車収蔵施設で、年間を通じた温湿度の変化を測定し、温湿度の変化と山車収蔵施設の構造、壁面材料との関係を求めた。観測結果から山車収蔵施設の壁がコンクリートで作られている収蔵施設と、土で作られている収蔵施設の間で、年間を通じた湿度変化が大きく異なることが分かった¹⁾。これらの違いを定量的に評価するために、外気の温湿度変化による山車収蔵施設内の温湿度変化のシミュレーション解析を行った。この入力データとして、建物の換気回数が必要であるので、トレーサガス(SF₆)を用いて測定した。外気の湿度変動による山車収蔵施設内の湿度変動シミュレーション解析は、壁面の吸放湿性能を考慮しない場合と、壁面の吸放湿性能を考慮した場合の解析を行った。解析結果から、壁面の吸放湿性能を考慮した場合に、シミュレーション結果と実測結果が良く対応することが分かったので以下に報告する。

2. 川越市山車収蔵施設での観測

川越市の山車収蔵施設での環境調査は、郭町山車保管庫、志多町山車収蔵庫、仲町山車収蔵庫、松江町山車収蔵庫、幸町山車収蔵庫、喜多町山車収蔵庫の6カ所で行った¹⁾。

本報では、コンクリート壁の郭町山車保管庫と厚い土壁を持つ喜多町山車収蔵庫に関して解析を行ったので、それぞれの山車収蔵施設の大きさや構造、特徴に関して簡単に示す。

A. 郭町山車保管庫

鉄筋コンクリート、前面シャッター(南面)、

保管庫内の大きさ:幅3.5m、高さ7.45m、奥行き7m

温湿度ロガーの位置: A 1床から1.5m、A 2床から5m

特徴: 高さが7.45mと天井が高く、南面のシャッター部分の温度変化が大きい。

B. 喜多町山車収蔵庫

土壁、表面は漆喰仕上げ、床は土間叩きになっている。

収蔵庫内大きさ:幅4.5m、高さ4.8m、奥行き7.2m

温湿度ロガーの位置: F 1一階床から1.4m、F 2二階床から1.4mの高さ

特徴: 倉の周りが建物で囲まれている、天気の良い日は、時々窓を開け換気している。

郭町山車保管庫は、6基の山車が収蔵出来るようにコンクリート壁で仕切られている。この一つの部屋の模式図を図1に示す。図中に示した数字は、長さをmm単位で表したものである。

喜多町山車収蔵庫の模式図を図2に示す。

次に湿度変動の大きかった2002年6月の外気の温湿度変動(図3)、郭町山車保管庫(図4)、喜多町山車収蔵庫の1階、2階の温湿度変動を図5a)、図5b)に示す。図4を見ると、外気の

^{*}北海道地質研究所, ^{**}東京芸術大学大学院美術研究科文化財保存学専攻システム保存学, ^{***}ドレスデン工科大学

湿度が急激に下がった時に、それに対応して、収蔵庫内の湿度も変化しているのが分かる。一方、土倉内の温湿度変化である図5は、外気の湿度変化に対応して変化はしているものの、その変化が非常に小さいことが分かる。

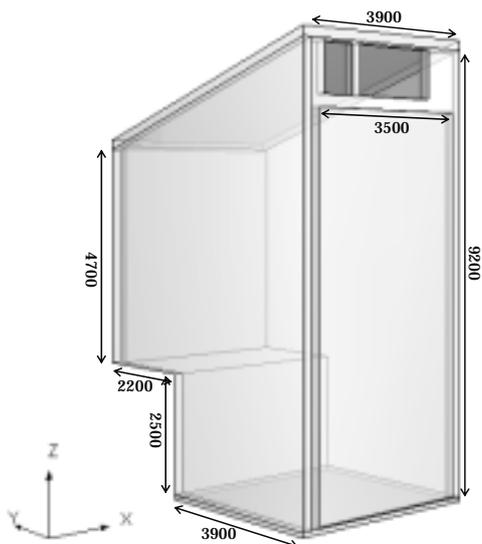


図1 郭町山車保管庫の1部屋の模式図(単位mm)

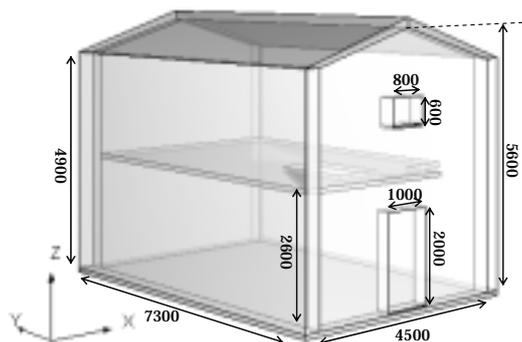


図2 喜多町山車収蔵庫の模式図(単位mm)

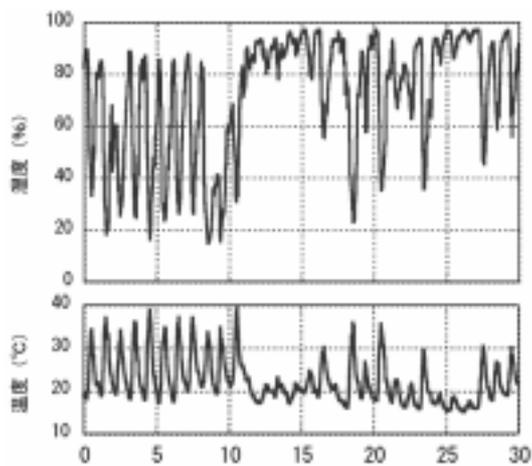


図3 川越市の外気の温湿度変化(2002年6月)

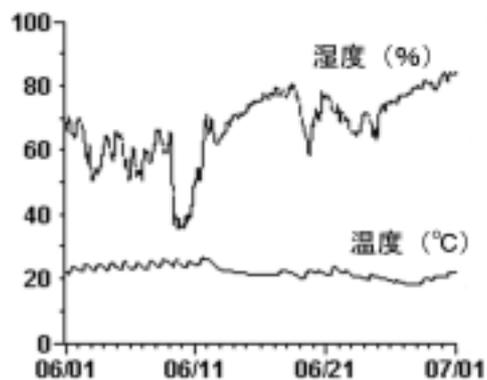


図4 郭町山車保管庫の温湿度変化(2002年6月)

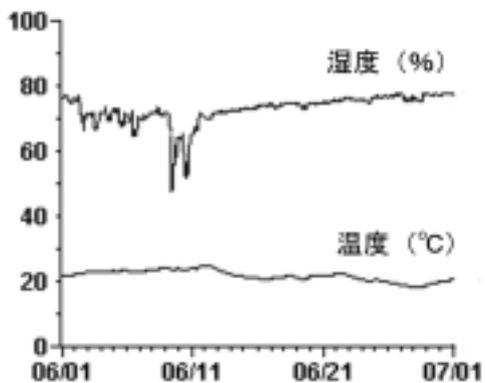


図 5 a) 喜多町山車保管庫 1 階の温湿度変化
(2002年6月)

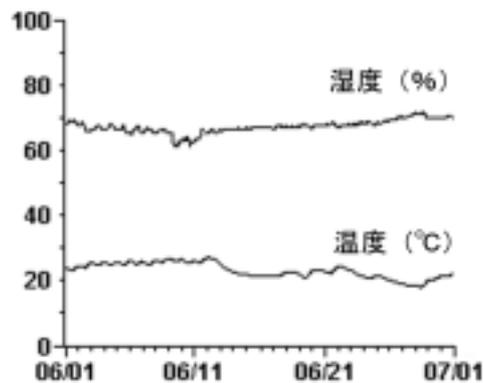


図 5 b) 喜多町山車保管庫 2 階の温湿度変化
(2002年6月)

3. 換気回数の測定

山車収蔵施設の温湿度の解析を行うためには、外気との換気回数を求めることが必要である。ここでは、郭町山車保管庫と喜多町山車収蔵庫の換気回数の測定をトレーサーガス (SF_6) を用い以下の手順で行った。図 6 の通りに収蔵施設内に装置、配管を設置し、測定機器を立ち上げる。次に、3 方切替バルブを CTS ガス側に切り替え、キャリブレーション移行用スタンダード (CTS) ガスによる標準スペクトルの校正を行う。3 方切替バルブを収蔵施設側に切り替え、試験前の収蔵施設内 SF_6 濃度を FT-IR で測定する。次に SF_6 シリンダーから SF_6 を収蔵施設内に濃度が約 1ppm になるように封入する。供給量はあらかじめ展示ケース容積、 SF_6 供給流量、時間

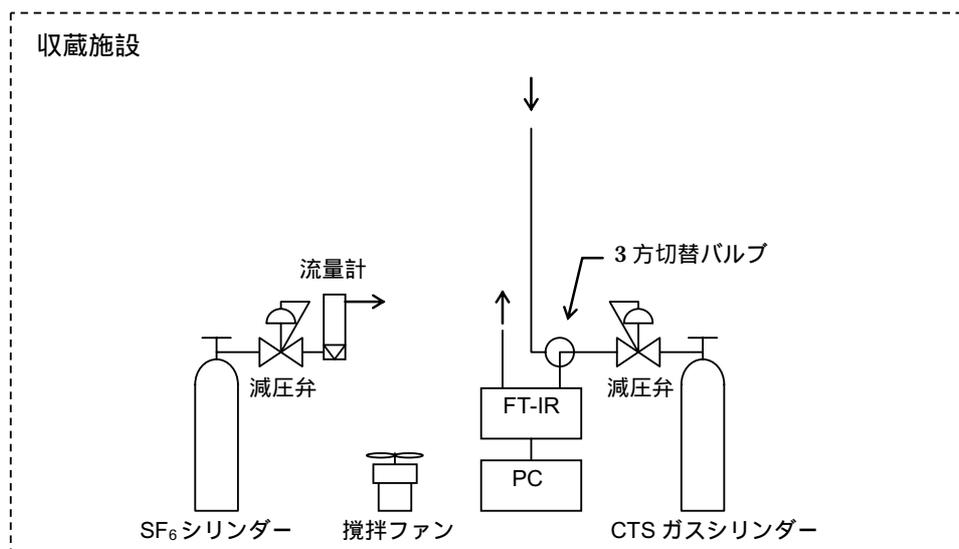


図 6 測定機器接続図

から計算する。この時に、あらかじめ風速の調整を行った攪拌ファンを作動させる。FT-IRによる連続測定を開始する。収蔵施設内の数箇所においてSF₆濃度を測定し収蔵施設内のSF₆濃度が均一に安定したことを確認し、安定した最初の測定結果を初期値とする。測定結果はFT-IRに接続したPCにて記録する。

収蔵施設内のSF₆濃度経時減衰を3時間以上記録する。記録されたトレーサーガスの濃度変化の例を図7に示す。測定終了時に再度収蔵施設内の数箇所SF₆濃度を測定し、濃度に偏りが無いことを確認し、SF₆濃度測定結果から次式により、自然換気回数を計算する。この様にして測定した換気回数を表1に示す。

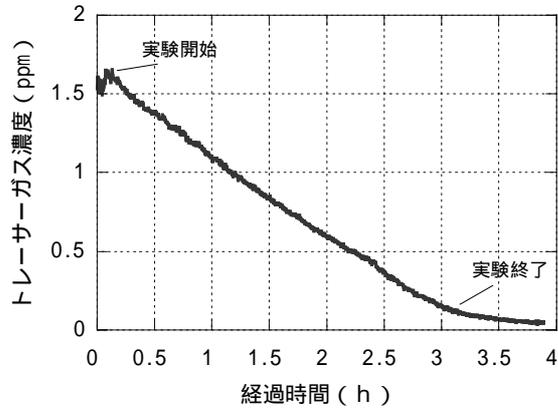


図7 トレーサーガス (SF₆) の濃度変化

$$Q = 2.303 \cdot (V / t \cdot \log_{10} [(C_s - C_0) / (C - C_0)])$$

ここで、C₀: 外気中のトレーサーガス濃度 (m³/m³)、C_s: 封入初期のケース内トレーサーガス濃度 (m³/m³)、C: t時間経過後のケース内トレーサーガス濃度 (m³/m³)、Q: 自然換気量 (m³/hr)、V: ケース内容積 (m³)

表1 郭町山車保管庫、喜多町山車収蔵庫の自然換気回数の測定結果

試験対象	測定初期SF ₆ 濃度 [ppm]	測定終了時SF ₆ 濃度 [ppm]	測定時間 [h]	外気SF ₆ 濃度 [ppm]	ファン	自然換気回数 [time/day]
郭町山車保管庫	1.6	0.1	3.25	0	有	20.5
喜多町収蔵庫1F	2.0	0.6	4	0	有	7.2
喜多町収蔵庫2F	2.1	1.1	4	0	有	3.9

4. 山車収蔵施設の温湿度解析

山車収蔵施設内部の温湿度解析は、壁面の吸放湿特性を考慮しない場合と壁面の吸放湿特性を考慮した場合の2ケースで行った。解析対象としては、コンクリート壁の郭町山車保管庫、厚い土壁を持つ喜多町山車収蔵庫の2つのケースで行った。

4-1. 壁面の吸放湿特性を考慮しない解析

解析には、3次元CFD (熱流体解析) プログラムとしてクレイドル社製ストリームを用いた。解析に用いた入力条件は、以下の通りである。

1) 郭町山車保管庫

解析領域サイズ：4100mm×6500mm×9500mm（図1のx, y, zに対応）

壁材：鉄筋コンクリート（厚み200mm），前面シャッター（厚み80mmでモデル化）

実際のシャッターの厚みは1.6mmだが，50倍の80mmとして解析した。そのため，厚み方向の熱伝導率は50倍の値を用いている（熱伝導率の異方性を利用）。さらに，体積が50倍となっているため，熱容量を合わせるために密度を1/50とした。

補遺：シャッターの隙間から外気が流入すると考えられるが，その隙間は未知のため50mmと仮定して解析を行った。また，計算に使用した材料の物性値は表2に示す。

表2 解析に用いた物性値

流体：空気（300K）		土壁	
密度	= 1.205kg/m ³	密度	= 1710 kg/m ³
粘性係数	$\mu = 1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$	比熱	$C_p = 880 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
定圧比熱	$C_p = 1006 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$	熱伝導率	= 0.6 J/m ² ·s·K
体膨張率	= $3.5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	瓦	
熱伝導率	= 0.0256J/m ² ·s·K	密度	= 2000 kg/m ³
シャッター		比熱	$C_p = 753 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
密度	= 7900kg/m ³	熱伝導率	= 1.03 J/m ² ·s·K
比熱	$C_p = 1924 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$	地面	
熱伝導率	=33 J/m ² ·s·K	密度	= 1710 kg/m ³
コンクリート		比熱	$C_p = 880 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
密度	= 2310kg/m ³	熱伝導率	= 0.6 J/m ² ·s·K
比熱	$C_p = 879 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$		
熱伝導率	= 1.5 J/m ² ·s·K		

2) 喜多町山車収蔵庫

解析領域サイズ：5200mm×8000mm×5800mm

壁材：土壁（厚み350mm）

屋根：瓦（厚み100mm）

その他：1階，2階にある扉の隙間から外気が流入流出すると考えられるが，その隙間は未知のため50mmと仮定して解析を行った。また，計算に使用した材料の物性値は表2の通りである。

非定常解析では一定時間間隔600秒で，30日間（2592000秒）解析する。ここでは，定常解析であらかじめ流れ場を計算しておき，非定常解析では定常解を用いて流れ場は一定であると仮定し，温度と湿度のみ解析した。

計算結果を図8，図9に示す。図8に示した郭町山車保管庫内湿度の計算結果は，図4に示した実測値と近い変動になっているが，計算結果の方がより変動が大きいのことが分かる。また，図9に示した喜多町山車収蔵庫内湿度の計算値は，図5に示した実測値より変動が大きくなっている。これらの結果は，計算に壁面の吸放湿特性を考慮していないためと考えられる。

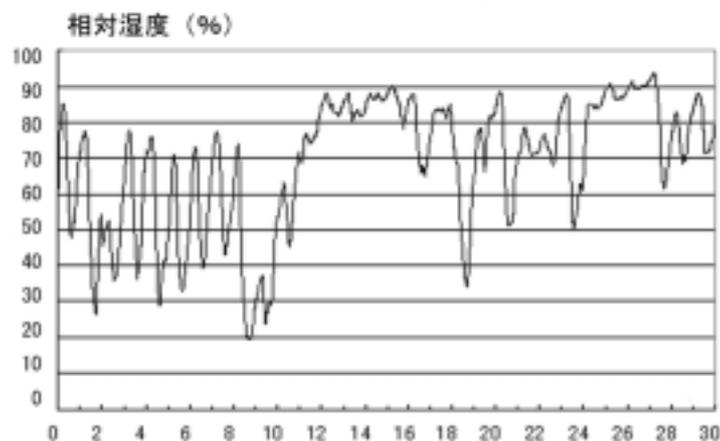


図8 郭町山車保管庫の湿度変動の計算結果



図9 喜多町山車収蔵庫の湿度変動の計算結果

4 - 2 . 壁面の吸放湿特性を考慮した解析

解析には、壁面の吸放湿性能を考慮できるドレスデン工科大学のグルネワルドらの開発した多孔質体内の熱水分移動解析プログラム (Delphin4.4) を用いた²⁾。計算に用いた土壁の湿気伝達率, 湿気抵抗率, 平衡含水率の値は, 日本建築学会建築工事標準仕様書に基づき, 荒木田土を用いて作成した中塗り土による測定値である³⁾。また, コンクリートの物性値はドレスデン工科大学で作成された建築材料データベースの値を用いて計算を行った。計算に必要な換気回数は, 郭町山車保管庫で, 20.5回/日, 喜多町収蔵庫で, 1階と2階の平均値5.6回/日の値を用いた。

郭町山車保管庫の湿度の計算結果を実測結果と共に図10に, 喜多町山車収蔵庫の湿度の計算結果を図11に示す。図10では, 計算結果が実測結果に良く一致しているのが分かる。これは, 換気回数の影響だけではなく, コンクリート自体の吸放湿特性も考慮されているため, 図8の計算結果より実測結果に近くなったと考えられる。また, 図11において, 計算結果は実測値より細かく変動したが, 外気の湿度変動による影響が小さいという点は実測値に対応している。

これは、土壁の吸放湿特性をモデルに組み込むことによって土の大きな調湿効果を表すことができたためと考えられる。

計算値の変動の原因に関しては、物性値を測定するために作成した土壁試料が実際のものとは異なるためと考えられるが、今後の課題である。

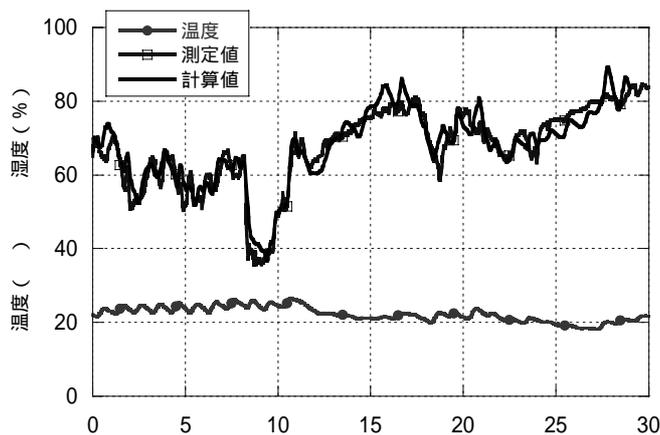


図10 郭町山車保管庫の湿度変動の計算結果

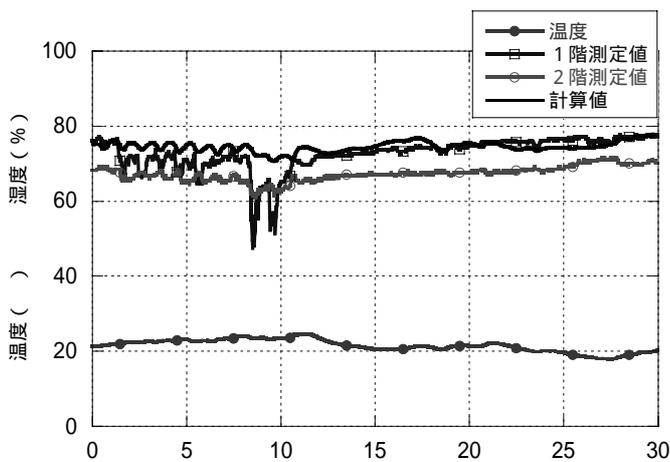


図11 喜多町山車収蔵庫の湿度変動の計算結果

5.まとめ

川越市の山車収蔵施設で行った温湿度測定結果により、内部の湿度変動が、倉の構造、壁の材質などにより大きくことが分かった。この違いを、建造物内部の温湿度を解析するプログラムにより解析した。入力条件として、建物の換気回数のデータが必要であったので、トレーサーガス（SF₆）による測定を行った。解析は、壁面の吸放湿特性を考慮しない場合と壁面の吸放湿特性を考慮した場合の2ケースで行った。壁面の吸放湿特性を考慮しない場合は、気流解析ソフト（クレイドル社製Stream 5）で解析を行い、壁面の吸放湿特性を考慮した

場合は、ドレスデン工科大学で開発した建築材料中の熱水分移動解析ソフト (Delphin 4.4) で解析を行った。解析結果から、壁面の吸放湿性能を考慮した計算結果が実測値と良く対応することが分かった。今後は、入力に用いる水分特性、不飽和透水係数などの物性値の測定やより複雑な構造を持つ文化財収蔵施設についても温湿度解析手法の検討を行っていく予定である。

謝辞

今回の調査では、各山車収蔵施設の管理の方々には調査の便宜を図っていただいた。また川越市文化財保護課の田中敦子さんをはじめ文化財保護課の方々には、調査にご協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 石崎武志, 孫喜山: 川越市山車収蔵施設の環境調査, 保存科学, 43, 43-55 (2003)
- 2) John Grunewald, Numerical simulation program DIM3.1 for coupled heat, air, salt and moisture transport, Proceedings of the "10. Bauklimatisches Symposium", S 181 - 191, TU Dresden, 1999.
- 3) 古谷太慈, 土壁の水分特性と倉内の湿度安定性, 東京芸術大学修士論文, 2005.
- 4) Grunewald J., R. Plagge, M. Bomberg 2001. *Introduction to material characterisation for input to HAM-models*. ICBEST 2001 Conference, Ottawa, Canada

キーワード: 倉 (storage house) ; 土壁 (earthen wall) ; 調湿性 (humidity buffer effect) ; 換気回数 (ventilation rate) ; 数値解析 (numerical simulation)

Measurement of Humidity Changes in Storage Houses for Floats (*Dashi*) in Kawagoe and Their Analysis

Takeshi ISHIZAKI, Masazo TAKAMI^{*}, Taiji FURUYA^{**}
and John GRUNEWALD^{***}

In Asian countries, traditional fireproof storage houses with earthen walls have been widely used for keeping food since the 6th century. Because of the high capacity of earthen walls to absorb moisture, humidity inside a storage house is kept relatively constant throughout the year. Until now, such storage houses have been used for keeping important cultural properties since it is quite important to avoid large variations of humidity around important objects. This paper reports on the changes of temperature and humidity as well as on the measurement of ventilation rate in different types of storage houses in Kawagoe city. The authors also performed a numerical simulation of humidity changes due to outside humidity change using CFD software (Stream) developed by Cradle Co., Ltd. and numerical simulation program (Delphin 4.4) developed by TU Dresden. The authors compared the simulated humidity changes and measured ones. Comparison showed that the calculated humidity changes agreed well with the measured values when the humidity buffering effect of the earthen walls was taken into account. This shows the effectiveness of earthen walls in buffering humidity in the storage house, quantitatively.

^{*}Geological Survey of Hokkaido, ^{**}Graduate School of Conservation for Cultural Property, Tokyo National University of Fine Arts and Music, ^{***}Technical University of Dresden

