

# 伝統的建材の熱湿気移動特性に関する研究

## —土壁を対象とした吸放湿過程に関する検討—

森山直哉<sup>1)</sup>, 高田暁<sup>1)</sup>  
<sup>1)</sup>神戸大学大学院工学研究科

### Heat and Moisture Transfer Properties of Japanese Traditional Building Materials Study on Hygroscopic Process of Mud Wall

Naoya MORIYAMA<sup>1)</sup>, Satoru TAKADA<sup>1)</sup>  
<sup>1)</sup>Graduate School of Engineering, Kobe University

**Abstract:** At present, quantitative studies on the hygroscopic performance of traditional building materials are insufficient. We have been measured the moisture properties of mud walls and found the dependence of water vapor permeability on relative humidity. In this study, by conducting an experiment on absorption process for mud wall, the application of hygroscopic heat and moisture transfer model with hygric properties measured by the authors was checked.

**Key words:** mud walls, Hygroscopic, water vapor permeability, temperature and humidity analysis, simultaneous heat and moisture transfer

**要旨:** 伝統的建材の吸放湿性能についての定量的な研究が不足しているのが現状である。著者らは、土壁の湿気物性値の測定を行ってきており、カップ法による湿気伝導率の測定結果が相対湿度に依存することを示している。本研究では、土壁について高含水率領域での吸放湿実験を行い、同条件の解析と比較することで、ハイグロスピックモデルの適用、物性値、特に湿気伝導率の妥当性を確認する。

**キーワード:** 土壁、吸放湿、湿気伝導率、温湿度解析、熱水分同時移動

## 1. はじめに

日本の伝統的建材の吸放湿性能に関わる物性値の定量的な評価としては、横林ら(2005)(2007)による土壁の湿気伝導率と平衡含水率の測定、斎藤ら(1957)による漆喰の湿気伝導率測定、宮野ら(2001)による土壁の吸放湿実験が行われてきており、著者ら(2013)は土壁と漆喰の平衡含水率測定を行った。しかし、依然として定量的な評価が不足しているのが現状である。著者らは、平衡含水率に加えて、土壁と漆喰に対してカップ法による湿気伝導率の測定を行ってきており、湿気伝導率に湿度依存性があることを示している。

工業的建材の普及に伴い、伝統的建材は減少傾向にある。そこで、古くから用いられてきた伝統的建材は日本の風土に合ったものであると考えられる。伝統的建材を実住宅に適用した際の温湿度性状を把握するためには、物性値の把握とハイグロスピックモデルを適用できるかどうかの確認をする必要がある。湿気伝導率は本来湿度に関わらず一定値として扱われている。本研究では吸放湿過程の非定常実験を行い、同条件での解析と比較し、ハイグロスピックモデルの適用と、

湿度への依存性を考慮した湿気伝導率の妥当性を確認する。

## 2. 土壁の湿気伝導率測定

### 2.1 測定方法

カップ法(日本建築学会, 2006)を用いて土壁の湿気伝導率測定を行った。試験体は長方形(30cm×40cm)に成形した。試験体の周囲はアルミテープで囲い、試験体とアルミテープの隙間をエポキシ樹脂系接着剤で塞ぎ、直方体形状のカップにセットした。この装置を電子天秤(エーアンドディ, GX400, 最小目盛り0.001g)に載せ、インキュベータ内に設置する。風防をカップの周囲に設けインキュベータ内の気流による影響を小さくする。実験直前の30分間、設定温湿度に制御されたインキュベータ内に装置にセットした状態で試験体を曝露し、養生を行った。測定開始後1分おきに24時間連続してカップ全体の質量を自動計測し、1時間毎の質量変化量が連続5回の移動平均の±5%以内となる時に定常とみなす。

表1 試験体の組成と物性値

|     |     | 土壁 1                                   | 土壁 2                                    |
|-----|-----|--|---|
| 組成  | 土   | 砂糖 20kg 用袋<br>1.5 袋小牧市産                | 0.005[m <sup>3</sup> ]33.625[kg]<br>淡路土 |
|     | 川砂  | 10ℓ バケツ 6 杯                            | 0.008[m <sup>3</sup> ]90.573[kg]<br>家島砂 |
|     | 藁スサ | バケツ 1 杯                                | 0.015[kg](もみすさ)                         |
|     | 水   | 18ℓ                                    | 3.5[m <sup>3</sup> ]3.5[kg]             |
| 密度  |     | 1671[kg/m <sup>3</sup> ]               | 1632[kg/m <sup>3</sup> ]                |
| 空隙率 |     | 0.415[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] | 0.408[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]  |
| 厚さ  |     | 10[mm]                                 | 10[mm]                                  |

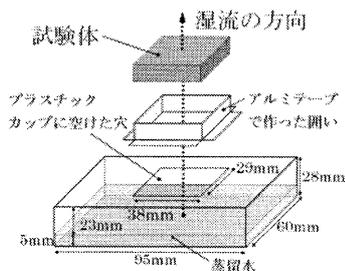


図1 湿気伝導率測定装置概念図

カップ法は、試験体の両側に湿度差を設け、試験体内部に湿流を作り、定常状態になった時の湿流から湿気伝導率を算出する方法であり、定常状態の湿流の式(1)に基づいている。ここでは、湿流の一次元性が成立することを仮定し、試験体両側の湿気伝達抵抗を無視する。測定する際の湿度条件を以下の表2に示す。

$$\frac{Q'}{S} = \frac{\lambda'}{l} (X_1 - X_2) \quad \dots(1)$$

記号  $Q'$ :湿流[kg/h]  $\lambda'$ :湿気伝導率[kg/m/h/(kg/kg<sup>3</sup>)]  
 $X$ :絶対湿度[kg/kg<sup>3</sup>]  $l$ :試料厚さ[m]  $S$ :透湿面積[m<sup>2</sup>]  
 添え字 1:高湿側 2:低湿側

表2 湿気伝導率を測定する相対湿度条件 (23°C)

| インキュベータ<br>設定湿度(%) | 50               | 30            | 50            | 80            |
|--------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|
| 試験体内推定<br>湿度(%)    | 30               | 65            | 75            | 90            |
| カップの中身             | LiCl(11%)<br>飽和塩 | 蒸留水<br>(100%) | 蒸留水<br>(100%) | 蒸留水<br>(100%) |
| 湿流の向き※)            | -                | +             | +             | +             |

※)カップ内から曝露空気側への湿流を正とする

## 2.2 測定結果と考察

図2に測定結果を示す。土壁2については材料内湿度の大きい方が大きな湿気伝導率を示しているが、土壁1では材料内湿度が30%の時に65%の時よりわずかに高い値を示している。材料内の吸着水が少なくなり、空隙が大きくなった可能性が考えられるが、同一試料の測定幅を考慮すると、有意な差ではなく、今後検討

が必要である。また、材料内湿度90%の高湿度域においては他の湿度より有意に高い値を示している。高湿度域では材料内に多くの水分が吸着しているものと推測されるが、蒸気移動だけではなく、液水の移動も関係していることが一因と考えられる。

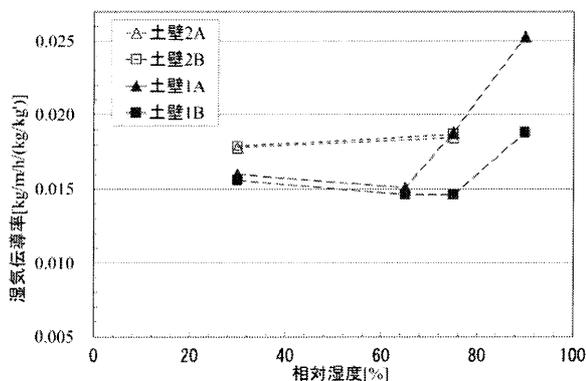


図2 湿気伝導率測定結果

## 3. 土壁の吸放湿過程に対するハイグロスコピックモデルの可能性の確認

### 3.1 非定常実験

土壁1の試験体を(30mm×40mm×10mm)に成形し、一番面積が広い30mm×40mmの透湿面以外は図3のようにエポキシ樹脂接着剤とアルミテープで断湿する。そして、試験体を図4のようにインキュベータ内に設置した電子天秤で床下秤量を行った。試験体を相対湿度90%で養生した後、50%にステップ変化させる実験と、50%で養生した後、90%にステップ変化させる実験の非定常過程の質量変化を観測する実験を行う。

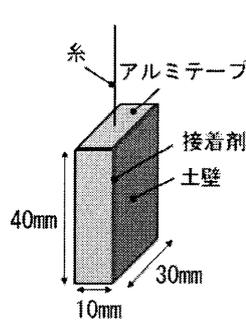


図3 試験体作成概念図

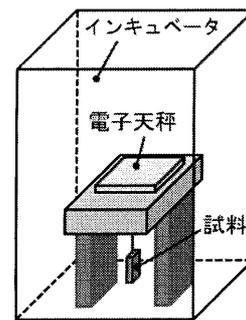


図4 実験概念図

### 3.2 非定常解析

3.1の実験をハイグロスコピック(蒸気拡散支配)領域の熱水分同時移動方程式を用いて懐石する。土壁1の試験体の物性値は表1のものに加えて表3のものを用いる。平衡含水率曲線は既報(2013)で測定した値に、湿気伝導率曲線は図2の土壁1A,Bの測定結果を平均したものにそれぞれ基づいている。本報では、湿気伝導率

が近似曲線に基づいて変動する場合と、土壁 1B の相対湿度が 65%の湿気伝導率 0.0149[kg/m・h・(kg/kg')]一定の場合の 2種類を計算した。計算間隔は 0.01[s]とした。解析モデルを図 7 に示す。

試験体の熱水分同時移動方程式を式(3)-(7)に、境界条件式を式(8)-(11)に示す。また、解析に用いた条件を表 4 に示す。インキュベータ内空気の温湿度は、実測値(図 9, 11)を入力した。

$$-\gamma\kappa \frac{\partial X}{\partial t} + (c\rho + r\nu) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \dots (3)$$

$$(\phi\rho_a + \kappa) \frac{\partial X}{\partial t} - \nu \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda' \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \dots (4)$$

$$\kappa = \rho_i \left( \frac{\partial F}{\partial X} \right)_\theta, \nu = -\rho_i \left( \frac{\partial F}{\partial \theta} \right)_X, F = F(\theta, X) \dots (5,6,7)$$

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_s = a(\theta_i - \theta_s), \quad -\lambda' \frac{\partial X}{\partial x} \Big|_s = a'(X_i - X_s) \dots (8,9)$$

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_r = a(\theta_r - \theta_i), \quad -\lambda' \frac{\partial X}{\partial x} \Big|_r = a'(X_r - X_i) \dots (10,11)$$

記号

- $\rho$  : 密度[kg/m<sup>3</sup>]  $c$  : 比熱[J/kg/K]  $\gamma$  : 相変化熱[J/kg]
- $\theta$  : 温度[°C]  $t$  : 時間[s]  $a$  : 総合熱伝達率[W/m<sup>2</sup>/K]
- $a'$  : 湿気伝達率[kg/m<sup>2</sup>/s/(kg/kg')]  $\lambda$  : 熱伝導率[W/m/K]
- $\kappa$  : 湿気容量[kg/m<sup>3</sup>/(kg/kg')]  $\nu$  : 湿気容量[kg/m<sup>3</sup>/K]
- $\lambda'$  : 湿気伝導率[kg/m/s/(kg/kg')]  $F$  : 平衡含水率[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]
- $x$  : 座標[m]  $\phi$  : 空隙率[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]  $X$  : 絶対湿度[kg/kg']

添え字

$a$ : 空気  $i$ : 室空気  $l$ : 水  $s$ : 曝露表面  $r$ : 曝露表面(反対側)

3.3 結果

本来、質量変化の実験値を質量含水率に変換して計算値と比べるべきであるが、ここでは質量の実験値と含水率の計算値の相対的挙動比較する。図 8 と図 10 に実験値と解析値の比較を示す。図 8 を見ると、実験値の方が解析値より早い応答を示している。また、湿気伝導率に湿度依存を与えた場合、湿気伝導率を一定で与えた場合と比較して平均含水率は早い応答を示す。図 10 を見ると実験値が解析値より早い応答を示している。これらの原因として、湿気伝達率、熱伝達率の与え方にも依存している可能性がある。

解析結果はそれぞれの場合について湿気伝導率の湿度依存性を考慮した際に湿度依存ありの方が両者とも湿度依存なしの場合と比べて質量含水率の応答が早かったが、大きな差は得られなかった。

表 3 土壁 1 の計算に用いた物性値

|                            |   |
|----------------------------|---|
| 熱伝導率                       | 0.233   |
| 湿気伝導率<br>[kg/m/h/(kg/kg')] | $h < 0.7400$  |
|                            | $4.0475 \times 10^{-2} \times h^2 - 4.0503 \times 10^{-2} \times h + 2.4308 \times 10^{-2}$ |
| 平衡含水率<br>[kg/kg]           | $h \geq 0.7400$   |
|                            | $-2.52e-2/(h-1.10e0)+9.50e-3$   |
| 平衡含水率<br>[kg/kg]           | $h < 0.4885$  |
|                            | $-3.63 \times 10^{-3}/(h+3.25 \times 10^{-1})+1.11 \times 10^{-3}$                          |
| 平衡含水率<br>[kg/kg]           | $h \geq 0.4885$   |
|                            | $-1.84 \times 10^{-3}/(h-1.07)+3.50 \times 10^{-3}$   |

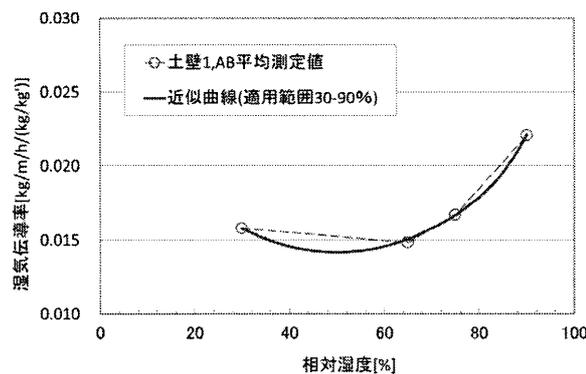


図 5 計算に用いた湿気伝導率曲線

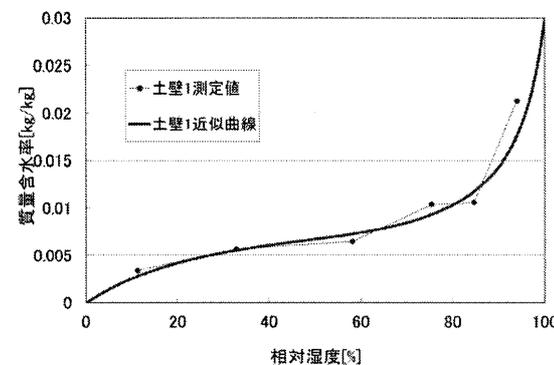


図 6 計算に用いた平衡含水率曲線

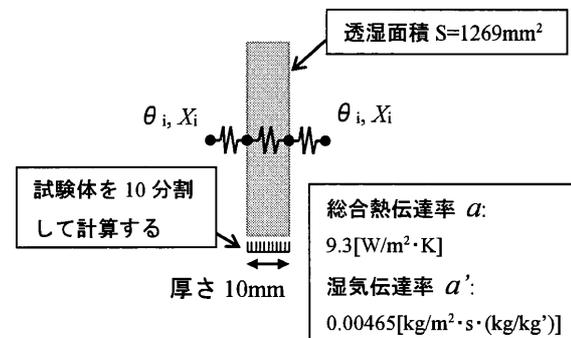


図 7 解析モデル概念図

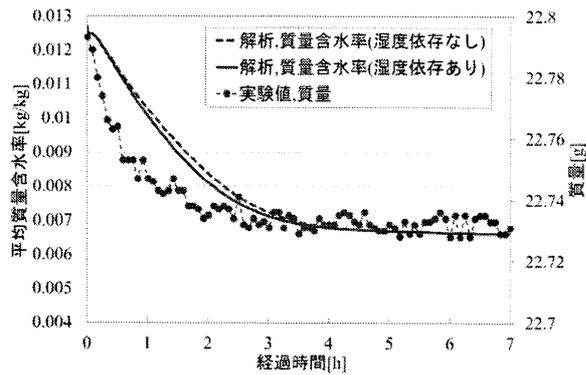


図8 実験と解析の比較 (23°C90%→50%)

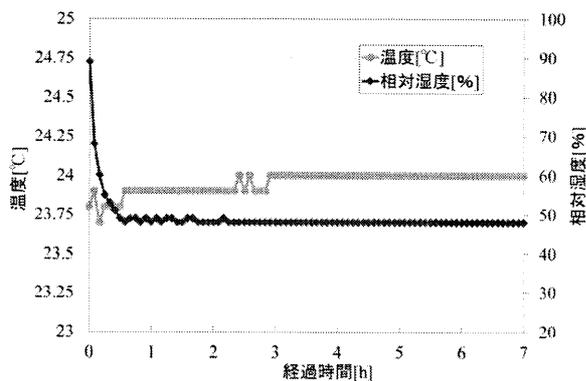


図9 試料周辺温湿度 (23°C90%→50%)

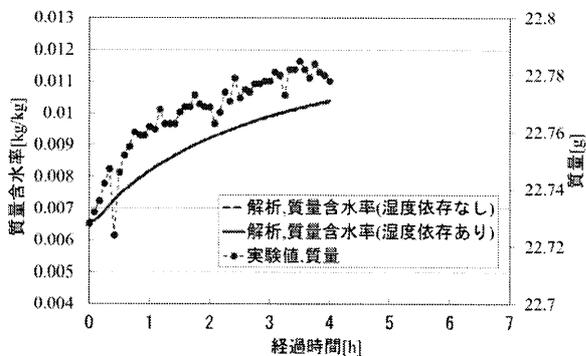


図10 実験と解析の比較 (23°C50%→90%)

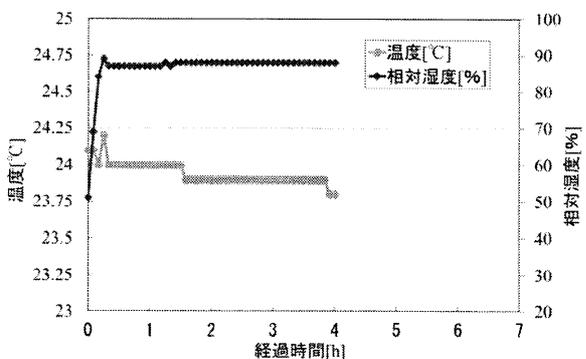


図11 試料周辺温湿度 (23°C50%→90%)

## 5. まとめ

土壁の湿気伝導率を、カップ法で測定し、測定結果が相対湿度に依存することを示した。また、土壁について高含水率領域での吸放湿実験を行い、同条件の解析と比較することで、ハイグロスコピックモデルの適用、物性値、特に湿気伝導率の妥当性を確認した。

**謝辞** 愛知産業大学・宇野勇治准教授と太田昌宏准教授からは土壁 1 の試験体を、大阪工業大学・佐藤真奈美准教授と横林修造氏からは土壁 2 の試験体を提供頂いた。記して謝意を表する。

## 6. 文献

横林修造, 佐藤真奈美 2005. 兵庫県産左官材料の湿気特性に関する考察 第1報 平衡含水率関係及び湿気伝導率測定. 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.293-296

横林修造, 佐藤真奈美 2007. 兵庫県産左官材料の熱・湿気特性に関する考察 第3報 物性値測定及び数値解析による断熱・吸放湿性能の検討. 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.121-124

斎藤平蔵 1957. 建築材料の透湿性に関する実験的研究 (第2報 一般材料の透湿抵抗). 日本建築学会論文報告集, 第57号, pp.145-148

宮野則彦, 神谷清仁, 水谷章夫, 宮野秋彦 2001. 土壁および土質系調湿建材の吸放湿特性について (建築材料の吸放湿に関する実験的研究 その4). 日本建築学会東海支部研究報告集, 第39号, pp.521-524

高田暁, 宇野勇次, 大田昌宏 2013. 土壁の吸放湿特性に関する研究 平衡含水率曲線の測定と居室の温湿度解析. 日本建築学会近畿支部研究報告集 (環境系), 第53号, pp.177-180

日本建築学会 2006. 湿気物性に関する測定規準・同解説, 日本建築学会環境基準 pp.45-52

### <連絡先>

連絡先氏名: 森山直哉

住所: 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1

所属: 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻

E-mail アドレス: 141t065t@stu.kobe-u.ac.jp