

両面アルミクラフト紙貼付ウレタンボードを用いた付加断熱工法の 壁体内湿気性状解析

Study on hygrothermal behavior of insulated walls with additional urethane board on double sided aluminum kraft paper finish

本間義規*

Yoshinori HONMA

The purpose of this study is to understand the hygrothermal characteristics of thermal insulated walls to which urethane boards are added to wall components that use various external structural boards, and how weather conditions affect them. The results obtained in this study are as follows:

- In the case of the difference of the indoor/outdoor humidity ratios $\Delta X=5$ g/kg DA in the cold region (Iwamizawa, Hokkaido, Japan) in winter (December to March), the humidity became 98 % RH or higher at the boundary between glass wool and external structural board. Even in summer, it became 80% RH or more. However, in the range of 40-mm thermal insulation thickness, both urethane boards A and B required a thickness of 40 mm or more.
- In warm region (Miyazaki prefecture, Japan), the glass wool and external board boundary did not achieve 100% RH, and the higher the performance of the additional insulation, the lower the relative humidity at the glass wool/external structural board boundary in winter. In summer, the difference in the thermal insulation performance could not be clearly observed.
- From the simulation results, it was found that the relative humidity was the highest, when volcanic silicates fiber reinforced multi-layered board was used for external structural board. MDF, OSB, particleboard and plywood had large moisture capacity. Combining with a material with a higher moisture capacity might be considered as a method for improving the hygrothermal condition in the insulated wall cavity.

Keywords: Urethane Board, Walls with Additional Insulation, Heat and Moisture Transfer
ウレタンボード, 付加断熱工法, 熱水分同時移動

1. 研究目的

繊維系充填断熱壁体の外側に断熱材を付加することは、内部結露防止上のフェイルセーフとなり得る。しかし、非透湿層を有する硬質ウレタンフォーム等の利用は、逆に湿害を助長する可能性が懸念される。硬質ウレタンフォームは断熱性能が高い反面、製法上の理由から断熱材両面にフィルム等が付属することが多いからである。

本研究は、市場に流通している両面アルミクラフト紙付き硬質ウレタンフォーム断熱材2種を対象に、アルミクラフト紙および硬質ウレタンフォームの湿気物性を把握するとともに、当該材料を付加断熱工法に利用する場合の壁体内部熱湿気性状を数値シミュレーションにより把握することを目的とする。

2. 各種熱湿気物性値の把握

2.1 アルミクラフト紙の湿気伝導率測定

ウレタンボードの両面に貼り付けられるアルミクラフト紙は、アルミ層を有する複合材料である。一般に金属は非透湿部材であるが、薄いアルミニウム箔であれば透湿性を有することが知られている¹⁾ (アルミニウム箔の厚さが0.007 mm以上0.009 mm未満で5 g/m²・24 h以下²⁾)。そこで、写真1に示す透湿ボックス (5 mm厚アクリル+5 mm厚2液混合エポキシ樹脂層+5 mmアクリルの3層構造) を用いて、ドライカップ法にて湿気伝導率の把握を行った。

透湿試験は JIS, ISO の規格に準じて行った^{3)~4)}。透湿面積は250 mm×250 mmとし、無水塩化カルシウム500 g (相対湿度0%) をボックス内に入れ、Hi-Mic-2045 (日本精蠟) で封ろう、これを恒温恒湿槽 (23°C85%設定) 内に電子天秤 (AandD GX-4000) とともに設置し、1分

*宮城学院女子大学生活文化デザイン学科



写真1 恒温恒湿槽内の透湿ボックス

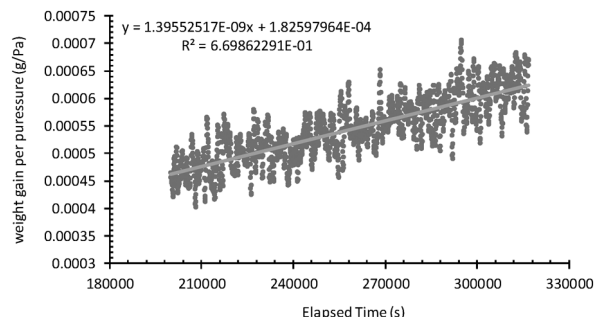


図1 透湿ボックスの質量変化

表1 アルミクラフト紙の透湿性能試験結果

試験体	透湿係数 (ng/m ² sPa)	透湿抵抗 (m ² sPa/ng)	湿気伝導率(kg/msPa)
アルミクラフト紙	22.328	0.0448	4.466 × 10 ⁻¹⁵

表2 実験に使用した飽和塩

飽和塩	文献値	実測平衡相対湿度
MgCl ₂ ·6H ₂ O	33 %	35.8%
Mg(NO ₃) ₂	54 %	54.6%
NaCl	76 %	77.9%
KCl	85 %	86.7%
H ₂ O	100 %	センサー測定外

間隔で質量測定を行った。恒温恒湿槽内の温湿度は Syscom SHTDL-3 (測定精度：温度±0.4℃@25℃, 相対湿度±1.8%, 測定分解能：温度0.01℃ 14 bit 湿度0.01%RH 12 bit) を用いて1分間隔で測定した。

実測した質量変化を水蒸気圧差 (Pa) で除した値 (g/Pa) を時系列軸 (秒) グラフにプロットすると、その回帰直線の傾きがアルミクラフト紙の透湿係数 (ng/m²sPa) となり、その逆数が透湿抵抗 (m²sPa/ng) となる。試験結果を図1に、透湿係数、透湿抵抗および湿気伝導率の算出結果 (湿気伝導率算出は材料厚を0.2 mm とする場合) を表1に示す。アルミクラフト紙は、クラフト紙を心材としてその両面にアルミ箔が貼り付けられた構成であるが、実測の結果、その透湿係数は22.328 ng/m²sPaであり、JIS Z1520に規定する0.007~0.009 mm のアルミニウム箔の透湿係数8.7 ng/m²sPa (JIS Z0208の結果を換算) よりも大きくなった。なお、この値はプラスチック系防湿フィルム A 種 (12.2 ng/m²sPa, 0.082 m²sPa/ng) よりも大きい。

2.2 アルミクラフト紙の平衡含水率測定

容量1Lの広口ガラス瓶 (蓋はプラスチック製) に表2に示す無機塩飽和水溶液 (JIS A 1475附属書4 溶解温度と溶解度に従い、無機飽和塩に湯を加えて調製した) と吊

るした試料、および温湿度計 (Syscom SHTDL-3, 測定精度：温度±0.4℃@25℃, 相対湿度±1.8%, 測定分解能：温度0.01℃ 14 bit 湿度0.01%RH 12 bit) を取り付け、23℃のインキュベーターの中に設置した。質量測定は約1日間隔で行い、24時間以上空けた計測で質量変化0.1%未満になった時点で平衡とみなし平衡含水率とした (図3)。

2.3 ウレタンボード2種の平衡含水率測定

硬質ウレタンフォーム2種類 (ウレタンボード A および B) の平衡含水率測定を行った。この2種類の違いは熱伝導率にあるが (Aはλ=0.021 W/(mK), Bはλ=0.018 W/(mK)), その差異はセル孔径と均質性にあり (Bの方が孔径が小さく均質)、湿気物性にも差があると考えられる。温湿度設定は23℃30%RH, 50%RH, 70%RH, 90%RHに設定、約1日毎に質量測定を行った。ただし、恒温恒湿槽の温湿度は、Onset HOBO UX-100-011 (精度±0.21℃, ±2.5%) を槽内に各2台設置し記録し、その平均値を槽内温湿度とした (写真3)。平衡に達したと判断した後、低温熱風乾燥機 (70℃) で乾燥させ絶対質量とした。結果を図5に示す。

2.4 躯体外側の構造面材の平衡含水率曲線

シミュレーション検討に用いる各種面材 (火山性ガラス



写真2 絶乾時インキュベーター内

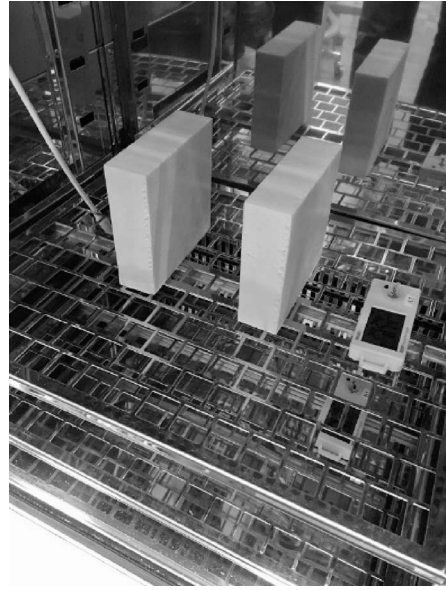


写真3 ウレタンボード2種の平衡含水率測定

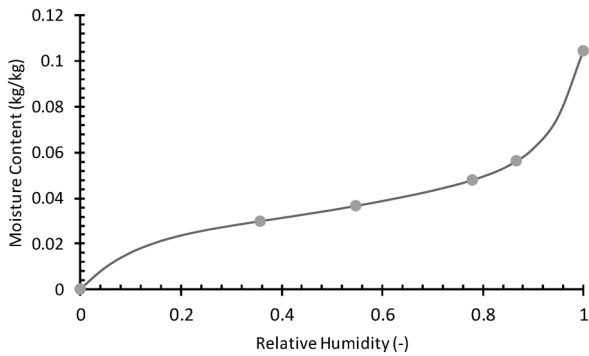


図3 アルミクラフト紙の平衡含水率曲線

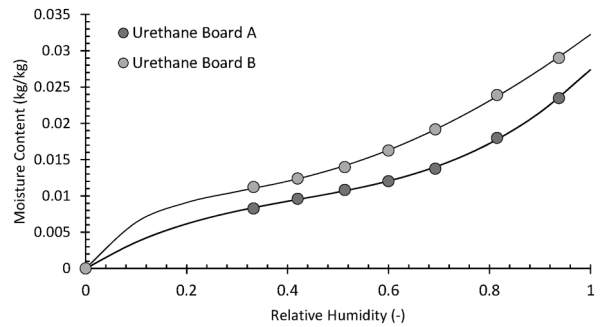


図5 ウレタンボード2種の平衡含水率曲線

質複層板、MDF、パーミキュライトボード、OSB、パーティクルボード、構造用合板の6種の平衡含水率曲線(図6)は、文献値データ^{6),7)}を用いて関数近似化を行った(1式)。また、構造面材とともに、アルミクラフト紙、ウレタンボードも併せて算出した1式の係数を表3に示す。ボードAよりボードBの平衡含水率が全般に大きい。これら2種ともIUPAC分類法¹⁰⁾のⅡ型もしくはⅢ型(多分子吸着に適用される物理吸着等温線)に近い形状となる。

$$\Psi = a \cdot H \cdot e^{bH} + c \cdot H + d \cdot (e^{eH} - 1) \quad (1)$$

ただし、 Ψ : 平衡質量含水率 (kg/kg)、 H : 相対湿度 (0-1)

アルミクラフト紙の平衡含水率は、紙類(コピー用紙の平衡含水率曲線⁹⁾)に近い。また、IUPACの分類法におけるⅡ型(BET型、多分子層を形成する物理吸着等温線)に分類されると推定される。

構造面材として6種類の建材(火山性ガラス質複層板、MDF、OSB、パーミキュライトボード、パーティクル

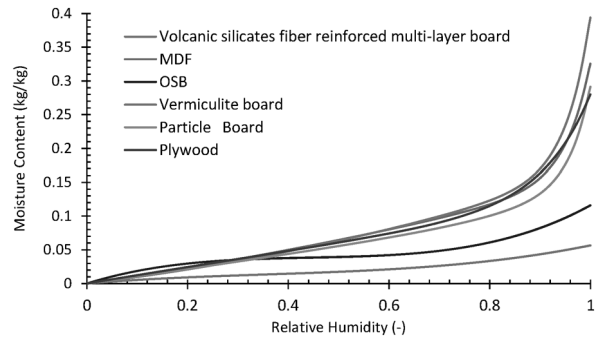


図6 各種面材の平衡含水率曲線

ボード、構造用合板)の平衡含水率曲線は、木質系であるMDF、OSB、パーティクルボード、構造用合板はIUPACのⅢ型に分類され、非木質系の火山性ガラス質複層板、パーミキュライトボードはⅡ型に分類される。火山性ガラス質複層板は木質系に比べ、0.2倍(質量比)、パーミキュライトボードは0.5倍(質量比)の湿気容量となることがわかった。

表3 各種材料の平衡含水率曲線・近似関数(1式)の係数一覧

	a	b	c	d	e
Aluminum Kraft Paper	0.1749574	-5.28158	0.0568939	3.20E-09	16.49426
Urethane board A	0.601449	-0.3650339	-1.280523	1.7816114	0.4053063
Urethane board B	0.084687	-5.051348	-1.9599035	91.695689	0.021487
Volcanic silicates fiber reinforced multi-layer board	-39.53943	-0.0490861	22.50804	-71.00238	-0.240789
MDF	3.465975	0.012856	-3.359186	4.17E-10	19.84905
Vemiculite board	0.6494026	-0.9593489	-0.561729	0.0748075	1.907066
OSB	3.478726	0.021066	-3.388474	2.21E-10	20.76358
Particle Board	0.000352	4.831978	0.1074205	3.64E-12	24.37211
Plywood	0.00693117	-5.185256	0.1195733	4.14E-06	10.56381

3. 数値シミュレーションに基づく熱湿気性状解析

3.1 数値解析概要

3.1.1 材料内の熱水分同時移動

通気層を有する付加断熱工法の断熱・防露性能を把握するため、ハイグロスコピック領域における1次元非定常熱水分同時移動として解析を行った。本モデルは液水移動領域を扱わないが、結露判断に対しては危険側の判断となるため妥当である。

基礎式・境界条件を(2)~(5)式に示す。なお、平衡含水率変化を線形で扱う方法(つまり κ , ν を一定値で扱う方法)は精度的に劣るため、本検討では平衡含水率曲線を微分し、材料内の相対湿度に応じてタイムステップごとに逐次更新しながら計算する非線形な方法を採用した¹¹⁾。

$$(\Phi_0\gamma' + \kappa) \frac{\partial X}{\partial t} - \nu \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \nabla^2 X \quad (2)$$

$$-r\kappa \frac{\partial X}{\partial t} + (c\rho + r\nu) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T \quad (3)$$

$$-\lambda_x \frac{\partial X}{\partial x} = \alpha_x \cdot (X_o - X) \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \cdot (T_o - T) \quad (5)$$

記号： T ：温度(°C)， X ：絶対湿度(g/kgDA)， λ ：熱伝導率(W/mK)， λ_x ：湿気伝導率(g/msPa)， c ：比熱(J/kgK)， ρ ：密度(kg/m³)， r ：潜熱(J/kg)， Ψ ：容積含水率(kg/m³)， H ：相対湿度(-)， κ ：絶対湿度変化に対する含水率変化率(kg/m³(kg/kgDA))， ν ：温度変化に対する含水率変化率(kg/m³K)， ϕ_o ：材料空隙率(-)， γ' ：空気密度(kg/m³)， α ：総合熱伝達率(W/m²K)， α_x ：湿気伝達率(g/m²sPa)

3.1.2 通気層内の通気量算定

検討対象とする断熱壁体は、通気層付きを前提とする。通気層風量は一定値で扱うことが多い。しかし、実際は外部風の風圧変動や浮力換気の影響を受けることから、一定

値とはならない。ISO15099ではAir gapの通気量計算法を定めており¹²⁾、この考え方に準じながら通気量計算法を構築する。

通気層内の換気駆動力は浮力 ΔP_T と風圧力 ΔP_W であり、これら圧力と経路の摩擦損失 ΔP_{HP} 、通気出入口の形状抵抗損失 $\Delta P_{Z,in}$ 、 $\Delta P_{Z,out}$ との差が動圧 ΔP_B となるから、圧力平衡として(6)式が成立する。

$$\Delta P_B + \Delta P_{HP} + \Delta P_Z = \Delta P_T + \Delta P_W \quad (6)$$

$$\text{動圧 (Pa)} : \Delta P_B = \frac{\rho}{2} v^2 \quad (7)$$

$$\text{摩擦損失 (Pa)} : \Delta P_{HP} = \lambda \frac{L_H}{D_{eq}} \cdot \frac{\rho}{2} v^2 \quad (8)$$

$$\text{摩擦抵抗係数 } \lambda : \lambda = \frac{X}{\text{Re}} = \frac{X\nu}{vD_{eq}} \quad (9)$$

ただし、 $X=64$ (円管)~ 96 (平行2平面)

$$\text{出入口形状抵抗損失 (Pa)} : \Delta P_Z = (Z_{in} + Z_{out}) \cdot \frac{\rho}{2} v^2 \quad (10)$$

$$\text{入口形状抵抗係数} : Z_{out} = \left(\frac{1}{0.6 \cdot S_{ratio,out}} - 1 \right)^2 \quad (11)$$

$$\text{出口形状抵抗損失} : Z_{in} = \left(\frac{1}{0.6 \cdot S_{ratio,in}} - 1 \right)^2 \quad (12)$$

$$\text{等価直径} : D_{eq} = \frac{4S_s}{L_r} \quad (13)$$

以上より、通気層内風速は(14)式で求めることができる。

$$v = \sqrt{\frac{2 \times |\Delta P_T + \Delta P_W|}{1 + Z_{in} + Z_{out} + \lambda \frac{L_H}{D_{eq}}}} \quad (14)$$

記号： ρ ：空気密度(kg/m³)， v ：通気層風速(m/s)， ν ：空気動粘性係数(1.5×10^{-4} m²/s)， $S_{ratio,in}$ ： $(S_{ratio,out})$ ：通気入口(出口)のを見つけ面積に対する実面積の割合(N.D.)， D_{eq} ：等価直径(m)， S_s ：通気断面積(m²)， L_r ：通気断面の周囲長さ(m)

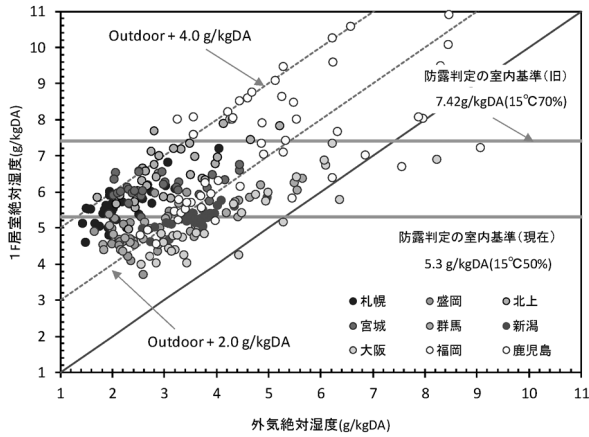


図7 外気絶対湿度と室内絶対湿度の関係

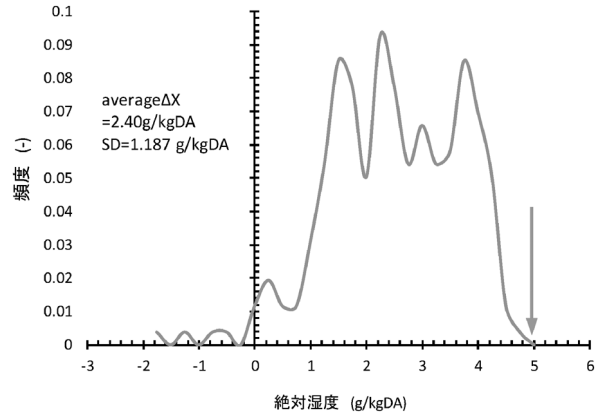


図8 ΔXの頻度分布

通気層内が層流の場合、一般に Hagen-Poiseuille 流れで近似できることが知られている。摩擦抵抗係数 λ は断面形状によって異なり、平行 2 平面の場合、レイノルズ数を Re として $\lambda = 96/Re$ で表現される。なお、 Re 数は通気風速の関数であるため数値計算上は収束計算が必要となるが、今回は前時間ステップの風速を用いることにした。

3.1.3 通気層内の放射・対流伝熱および熱水分収支

排湿層内の放射対流伝熱は、これらを分離して扱う。熱水分収支は簡易的に 1 質点系として扱う。収支式を (15)、(16) 式に示す。

$$T_{vent} = \frac{\alpha_{cv} L_W \cdot L_H (T_{o, surf} + T_{i, surf}) + c \rho_{out} Q_v T_o}{2\alpha_{cv} L_W \cdot L_H + c \rho_v Q_v} \quad (15)$$

$$X_{vent} = \frac{\alpha'_x L_W \cdot L_H (X_{o, surf} + X_{i, surf}) + \rho_{out} Q_v X_o}{2\alpha'_x L_W \cdot L_H + \rho_v Q_v} \quad (16)$$

記号： T_{vent} ：排湿層温度 (°C)， X_{vent} ：排湿層絶対湿度 (g/kgDA)， T_{surf} ：排湿層内の表面温度 (°C， o ：外気側， i ：室内側)， X_{surf} ：排湿層内の表面絶対湿度 (g/kgDA， o ：外気側， i ：室内側)， α_{cv} ：対流熱伝達率 (W/m²K)， α'_x ：湿気伝達率 (g/m²sPa)， Q_v ：排湿層風量 (m³/s)， L_W ：検討対象とする排湿層幅 (m)， L_H ：排湿層高さ (m)

3.1.4 室内側境界条件の設定

室内温湿度条件は日射入射のある室内を想定して (17)～(19) 式で与える。また、室内絶対湿度は、外気絶対湿度を基準にして ΔX (g/kgDA) だけ高いものとする。今回は $\Delta X = +5$ g/kgDA で与えた。 $\Delta X = +5$ g/kgDA とする根拠は、全国での室内外温湿度実測結果がベースにある (図 7)。図 8 に全国の住宅で実測した室内外絶対湿度差を示す。このデータはきれいな正規分布にはなっていないが、最大値は $+5$ g/kgDA 程度であることがわかる。また、仮にこれが正規分布に従うとすると 5% 有為水準の上側値は $\mu + 2SD = 4.774$ g/kgDA となり、 $+5$ g/kgDA は

5% の有意水準以下に相当する。以上より、 $\Delta X = +5$ g/kgDA は安全側の判断になるので、この条件を基本に検討を進める。

$$T = 23.0 + 4.0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi(DAY-212)}{365}\right) + 3.0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi(Time-14)}{24}\right) + \Delta T_{Jsun} \quad (17)$$

$$\Delta T_{Jsun} = J \cdot S_{window} \cdot \tau / (12558 \cdot VOL) \quad (18)$$

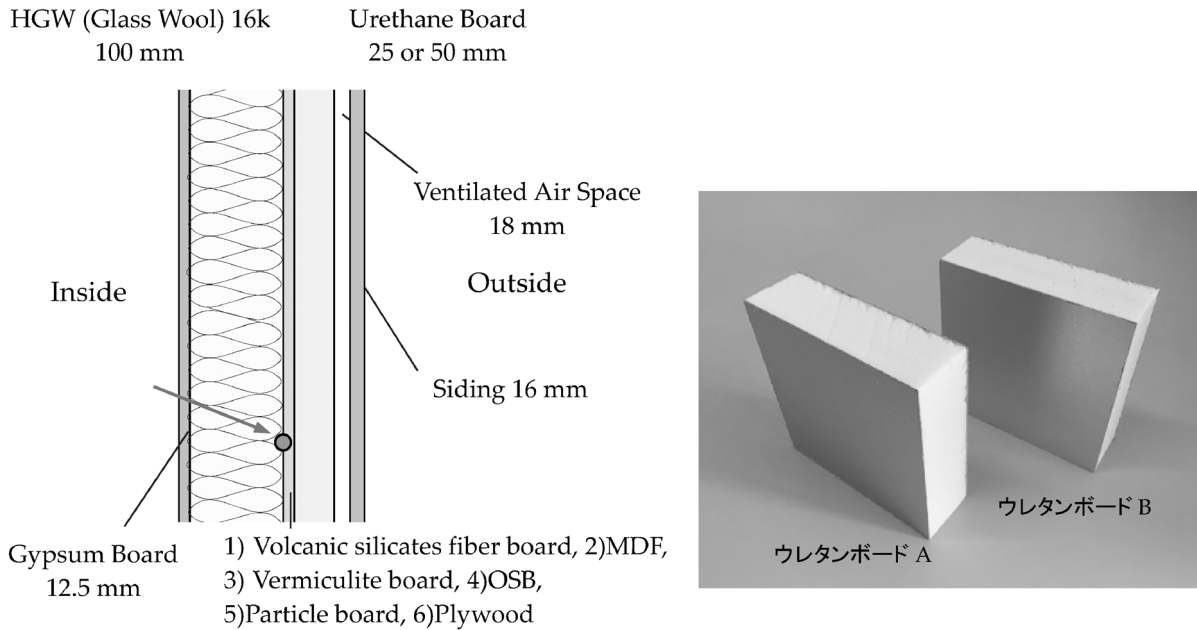
$$X_{room} = X_{out} + 5 \text{ (g/kgDA)} \quad (20)$$

記号： J ：日射量 (W/m²)， VOL ：室容積 (m³)，12558 J/m³K：空気・家具等の熱容量の合計， τ ：分割時間 (s)， S_{window} ：窓面積 (m²)， X_h ：絶対湿度の増分 (g/kgDA)， DAY ：1 月 1 日からの通算日， $time$ ：時刻

3.2 計算モデルおよび計算条件

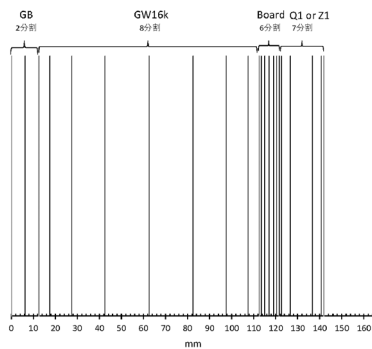
計算モデルとして、繊維系断熱 (HG W16k100 mm) 充填木造壁体の外側に付加断熱材 (ウレタンボード A, B) を設置する仕様を検討する (図 9a)。断熱厚は 20 mm, 30 mm, 40 mm の 3 水準とする。通気層内の長波長放射率 ϵ は両面とも 0.9、外装材表面の日射反射率は 0.2、通気層出入口流量係数 α はともに 0.5 とする。なお、防湿層施工の不備を想定して、防湿上、最も危険側となる防湿層なし (非防湿壁体) として検討を進める。

構成材料の熱湿気物性値を表 4-1、4-2 に示す。計算対象地域は、省エネ地域区分 2 地域の代表地点である岩見沢と 7 地域の代表地点である宮崎とした (表 5)。岩見沢は札幌などを含む寒冷地の代表地点であり、宮崎は断熱基準が定められている最南端の地域の代表地点である。この他にもいくつか気候的に特徴のある地域は存在するが、代表的なこの 2 地点を対象とすることで日本における当該仕様のおおよその特徴を把握することが可能である。なお気象データには、EA 気象データ標準年を用いた¹³⁾。空間離散化はコントロールボリューム法 (断熱躯体 23 分割、

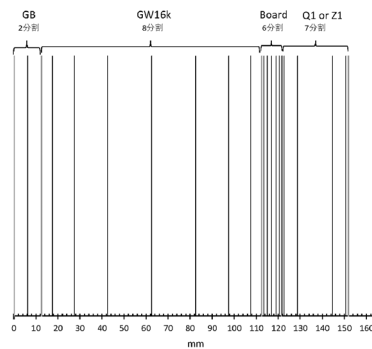


a) モデル断面

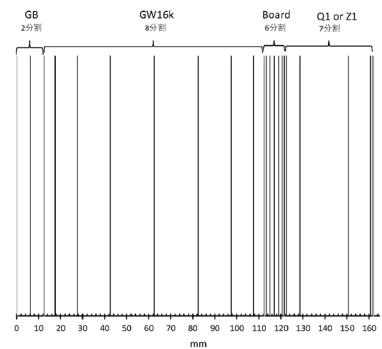
b) 両面アルミクラフト紙付き硬質ウレタンボード



c) 合板_ウレタンボード A_20mm の断熱壁体空間分割図



d) 合板_ウレタンボード A_30mm の断熱壁体空間分割図



e) 合板_ウレタンボード A_40mm の断熱壁体空間分割図

図9 計算モデル

表 4-1 構成材料の熱湿気物性値一覧

	密度 kg/m ³	比熱 J/(kgK)	熱伝導率 W/(mK)	湿気伝導率 kg/ms(kg/kgDA)	空隙率 m ³ /m ³
Urethane board A	32.7	1470	0.021	1.34E-06	0.003
Urethane board B	40.1	1470	0.018	3.54E-07	0.003
Aluminum Kraft Paper	882.11	1470	0.06	7.20E-13	0.001
Volcanic silicates fiber board	16	840	0.038	2.00E-05	0.99
MDF	732	879	0.13	1.31E-06	0.7
Vermiculite board	350	1032	0.12	6.38E-07	0.773
OSB	1050	840	0.24	1.38E-06	0.7
Particle Board	555	1880	0.101	9.58E-07	0.6
Plywood	695	1880	0.15	1.65E-06	0.48
Urethane board A	500	1880	0.113	3.07E-07	0.22
Gypsum Board	700	870	0.24	3.54E-06	0.7
External Siding	1000	840	0.2	1.51E-06	0.417

表 4-2 石こうボード，サイディングの平衡含水率曲線・関数近似係数

	平衡含水率曲線				
	a	b	c	d	e
Gypsum Board	0.348459	5.56549	0.0632888	2.19E-11	21.1522
External Siding	-9.81E-02	-4.07851	3.66E-02	3.13E-02	5.27525

表 5 計算地点

アメダス地点番号	地名	北緯 N	東経 E	HDD18	記号
59	岩見沢	43.212	141.785	3968	IW
794	宮崎	31.938	131.413	1240	MZ

分割幅0.1~20 mm，外装材8分割，分割幅2 mm）で（図9c), d), e)), 時間後退差分とする（分割時間0.10 hour）。初期条件は，すべての節点において10°C50%とする。シミュレーション期間は2年とし，1年目を助走期間として2年目の結果で考察した。

3.3 シミュレーション結果

3.3.1 構造用合板を面材とする壁体内の温度・相対湿度・絶対湿度年間プロファイル

(1) 岩見沢における構造用合板・非防湿断熱壁体の結果

図10に構造用合板面材を用いた非防湿壁体の相対湿度（RH）プロファイルを示す。各月1日の日平均値をプロットしてある。a)~c) がウレタンボード A, d)~f) がウレタンボード B の結果である。室内側 RH が最も高くなるのは9月（仕様によらず約75%RH），最も低くなるのは4月（仕様によらず約50%RH）であるが，グラスウールと構造用合板の境界面は12~3月でほぼ100%RHとなる（図11）。付加断熱材内部は，季節変動があるもののウレタンボード A20 mm 以外は相対湿度が低く，とくにウレタンボード Bはその傾向が顕著である。アルミクラフト紙の透湿抵抗の影響である。

(2) 宮崎における構造用合板・非防湿断熱壁体の結果

図12に宮崎における構造用合板・非防湿壁体の相対湿度プロファイルを示す。夏期は室内側石膏ボード表面の相対湿度が90%を超える状態になっている。通常の生活状態であれば，エアコンによる成り行き除湿や窓開け行動による通風によって外気絶対湿度に近い状況になるはずであるが，シミュレーション結果はそれよりも高い。通年において内外絶対湿度差 $\Delta X = +5 \text{ g/kgDA}$ としているためである（すなわち，夏期はより厳しい条件になっている）。岩見沢との違いは，グラスウール・構造用合板境界の相対湿度が100%になる期間がゼロになる点にある。つまり，地理的に南下するほど外気温が高くなるので，防露上の課題は少なくなる傾向にあるといえる。

図13に，ウレタンボード A, B の断熱厚み毎にプロットした1月と8月のグラスウール・構造用合板境界の相対湿度変動を示す。1月は断熱性能毎の差異が明確だが（ウ

レタンボード A20 mm とウレタンボード B40 mm とでは約6%の差が生じている），8月は断熱材の違いが明確ではない。岩見沢の結果とは明らかに異なる性状が見て取れる。

3.3.2 各種外気側構造面材の比較(岩見沢・ウレタンボード A 20 mm の場合)

6種類の面材（火山性ガラス質積層板，MDF，パーミキュライトボード，OSB，パーティクルボード，構造用合板）の相対湿度プロファイル（岩見沢）を比較する（図14）。面材内で放物線状の相対湿度プロファイルを示すのが火山性ガラス質積層板を除く5種類であり，特にMDF，構造用合板でその傾向が強く，パーミキュライトボードで弱い（この意味では火山性ガラス質積層板とパーミキュライトボードは似たようなプロファイルとなっている）。ウレタンボード A 内の相対湿度プロファイルは，火山性ガラス質積層板，パーミキュライトボード，OSB の3種が比較的高湿域に推移し，MDF，パーティクルボード，構造用合板の3種は低湿域-中湿域で推移する傾向にある。この違いは面材の熱湿気物性とその複合影響に起因するものと考えられる。具体的には，構造面材・アルミクラフト紙間境界の相対湿度の違い，面材の熱性能の違いによる温度勾配湿流量の差異，平衡含水率勾配（いわゆる κ , ν ）の影響，初期条件の影響，気象データの特性，室内湿度発生量（ ΔX ）等のファクターが考えられる。

3.3.3 アルミクラフト紙の影響

ウレタンボード A, B の両面にアルミクラフト紙を貼付していること自体が，ウレタンボード内部の湿度性状に影響を及ぼしている。また，断熱壁体のトータル湿度防止性能にも影響を及ぼすことはこれまでの解析結果から明らかである。そこで，アルミクラフト紙を取り除いた場合の解析を行ってみた。対象とする面材は火山性ガラス質積層板（面材自体の湿気拡散率が小さく，高湿を保つ仕様）とし，内部で低湿度化するウレタンボード A 40 mm を採り上げる。対象地域は岩見沢である。相対湿度プロファイルの結果を図15, 16に示す。

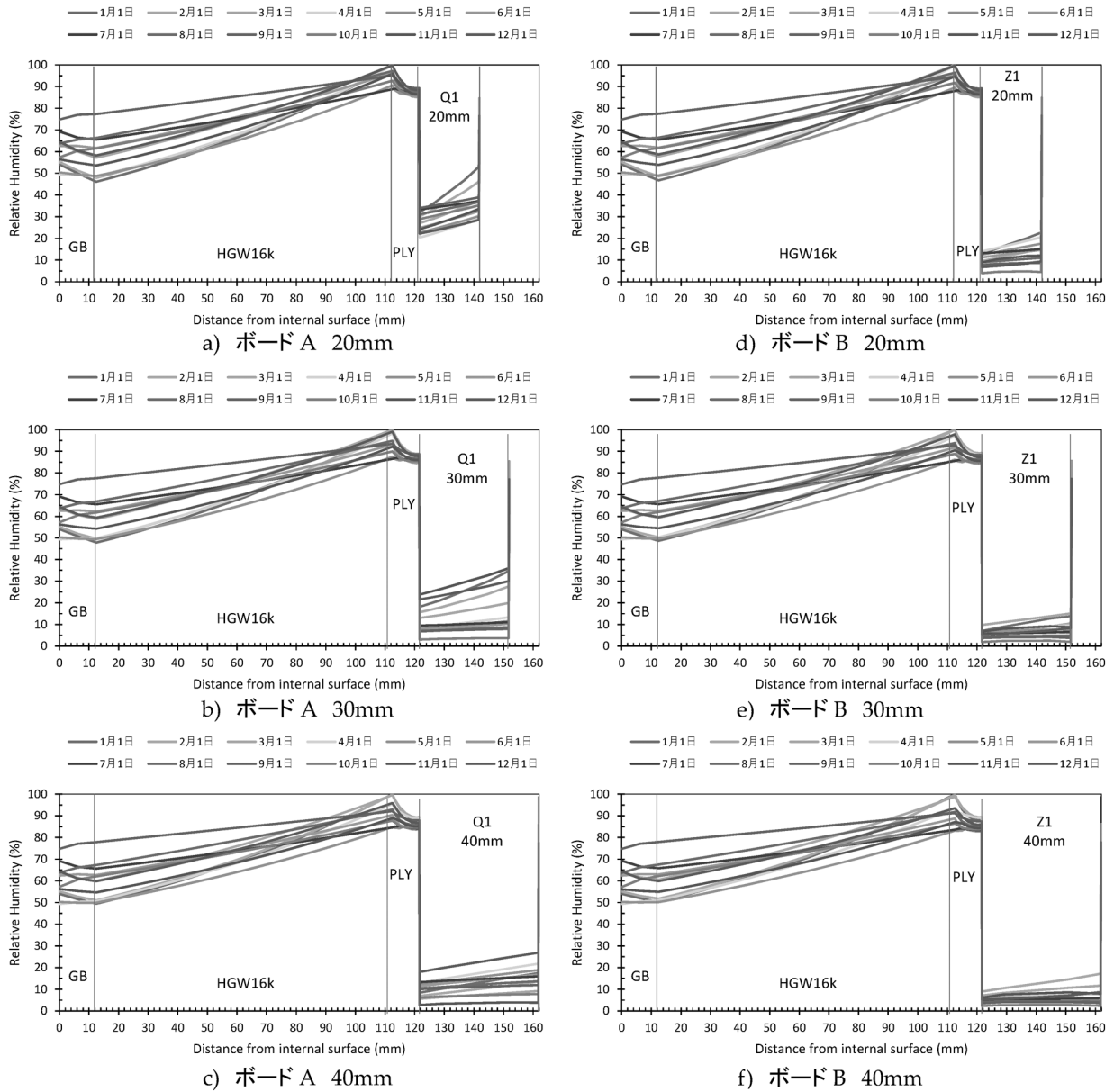
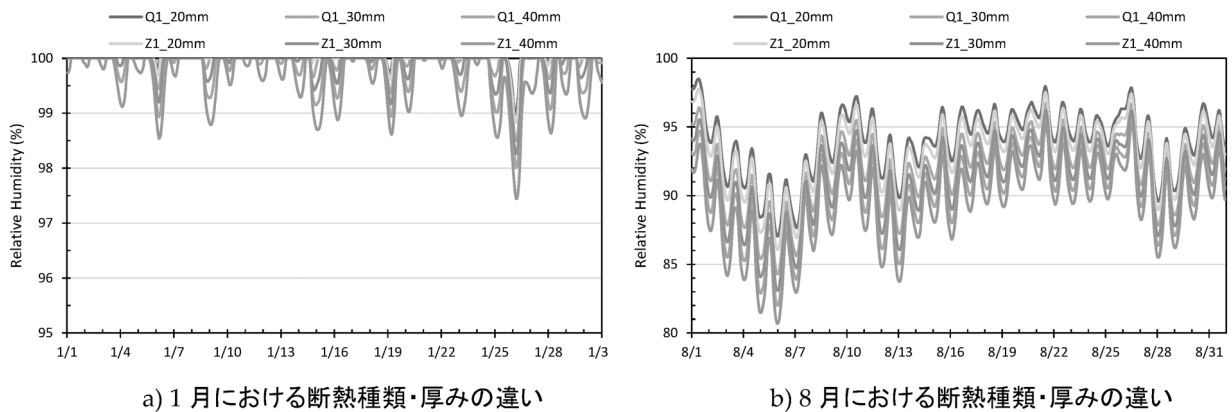


図10 非防湿壁体の相対湿度プロファイル (構造用合板・岩見沢)



a) 1月における断熱種類・厚みの違い

b) 8月における断熱種類・厚みの違い

図11 GW-面材境界部の相対湿度変動 (岩見沢, 構造用合板, 非防湿)

両面アルミクラフト紙貼付ウレタンボードを用いた付加断熱工法の壁体内湿気性状解析（本間）

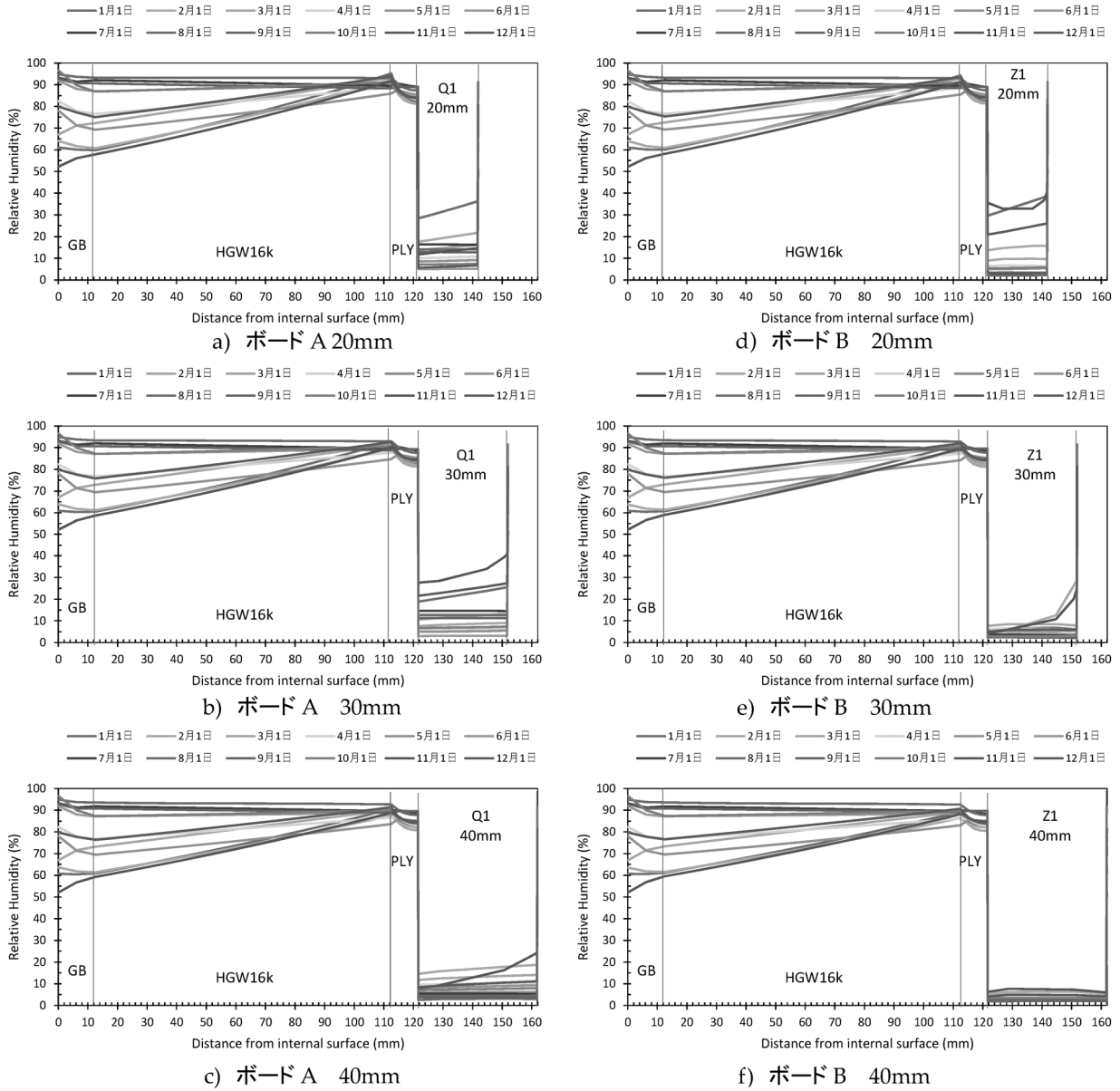
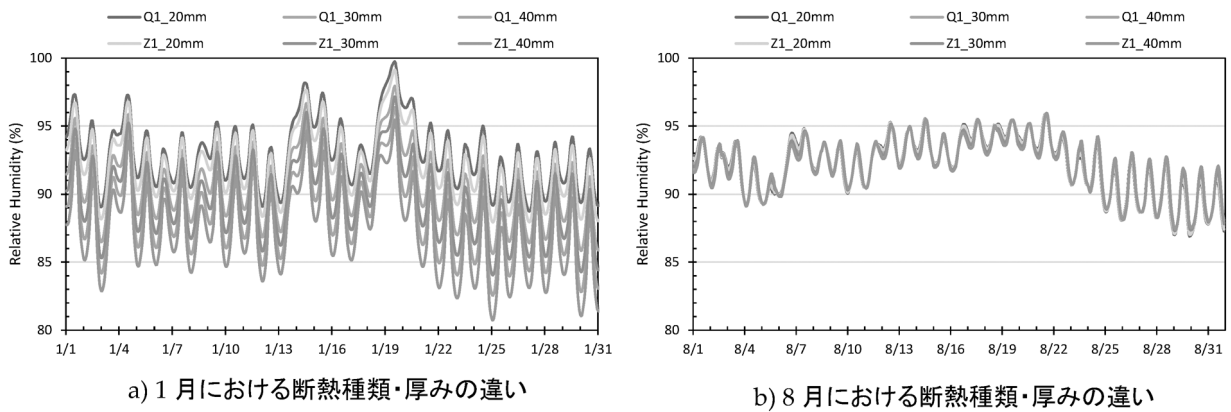


図12 非防湿壁体の相対湿度プロファイル（構造用合板・宮崎）



a) 1月における断熱種類・厚みの違い

b) 8月における断熱種類・厚みの違い

図13 GW-面材境界の相対湿度変動（宮崎，構造用合板，非防湿）

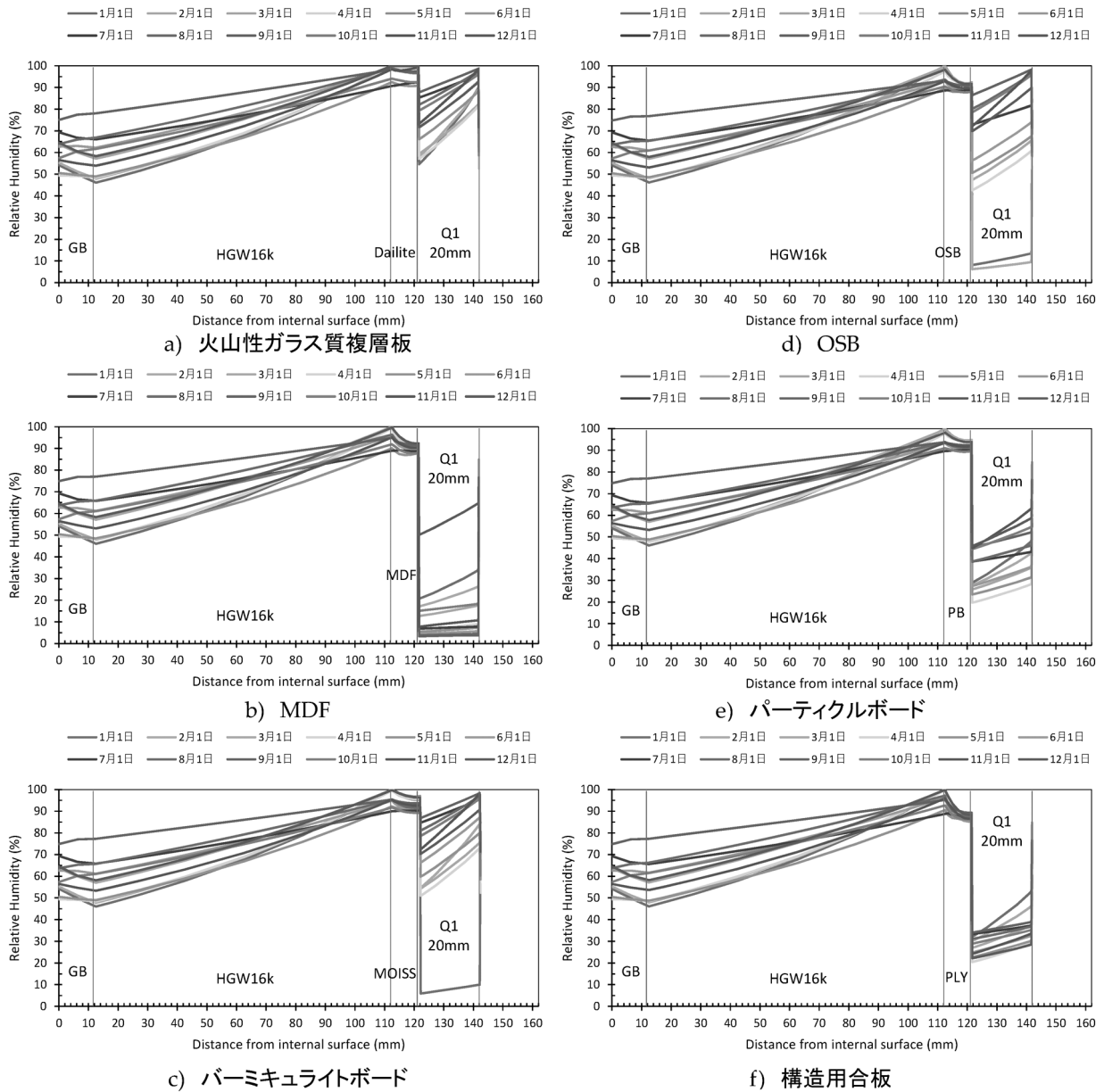


図14 異なる構造面材の相対湿度プロファイル (岩見沢・ウレタンボード A_20 mm)

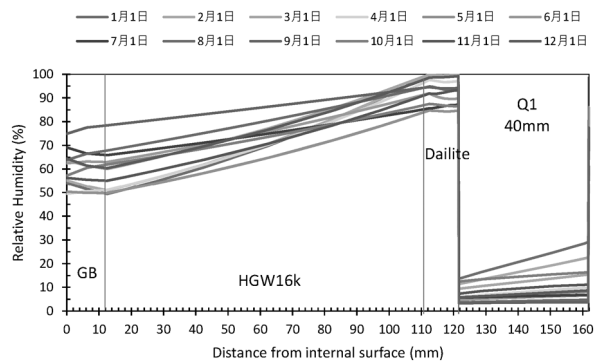


図15 火山性ガラス質複層板・相対湿度プロファイル (岩見沢・ウレタンボード A_40 mm アルミクラフトあり)

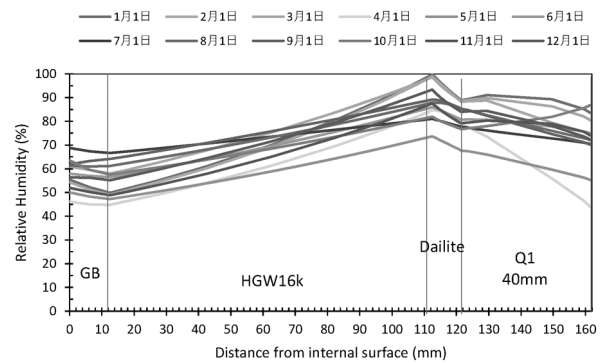


図16 火山性ガラス質複層板・相対湿度プロファイル (岩見沢・ウレタンボード A_40 mm アルミクラフトなし)

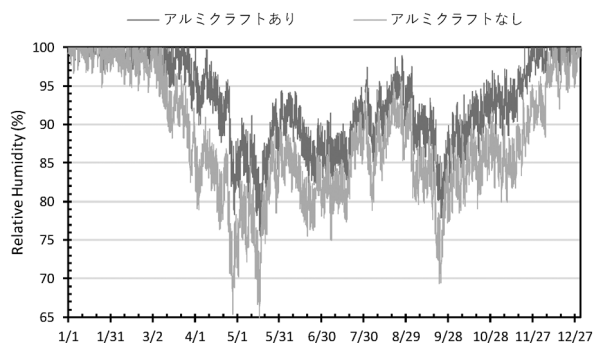


図17 アルミクラフト紙有無によるGW・面材境界部の相対湿度変動（岩見沢・ウレタンボード A_40 mm）

アルミクラフト紙が付属する仕様では、ウレタンボード A 内の相対湿度は冬期に10~30%RH、夏期に10%RH 以下という非常に乾燥した状態になるのに対し、アルミクラフト紙を取り除いた仕様では、冬期80~90%RH 程度、夏期40~80%RH 程度になる。さらに火山性ガラス質複層板内部の相対湿度も低下し（図16）、グラスウール・構造面材境界の相対湿度もアルミクラフト紙あり：年平均92.8%RH に対し、アルミクラフト紙なし：年平均87.7%RH と約5%RH 程度の改善になる（図17）。もしも製品改良の余地があるのなら、アルミクラフト紙の透湿性能を向上させることで湿害防止効果を高めることができるだろう。

4. まとめ

断熱改修もしくは防湿層が不備な新築断熱壁体に対して、付加断熱材としてアキレスボードを使用することを想定し、①各種面材使用時の壁体内熱湿気性状の把握、②地域・気象条件が当該壁体に及ぼす影響、を把握することを目的に熱水分同時移動シミュレーションを行った。得られた結果は以下の通りである。

- ・室内外絶対湿度差 $\Delta X = 5 \text{ g/kgDA}$ の場合、寒冷地（岩見沢）の冬期（12~3月）はグラスウール・構造面材境界で98%RH 以上の高湿化状態となる。夏期においても80%RH 以上になる。断熱性能が高くなるほど当該部分の相対湿度は低下するが、基本的に断熱厚40 mm までの範囲では、防湿層なし仕様は困難である。ウレタンボード A, B とも40 mm 以上の厚みが必要である。
- ・温暖地（宮崎）では、グラスウール・面材境界は100%RH にはならず、付加断熱材の性能が高いほど、冬期はグラスウール・面材境界の相対湿度は低下する。夏期は、日射の影響等が考えられるが、通気層壁体であるため熱的影響が緩和されており、断熱性能の差は確認できない。
- ・火山性ガラス質複層板、MDF、パーミキュライトボード、OSB、パーティクルボード、構造用合板の6種類の面材で実施したシミュレーション結果をみると、非木質系材料である火山性ガラス質複層板の湿気容量が

小さく、かつグラスウール・構造面材境界の相対湿度が最も高くなることがわかった。すなわち、今回のような使用方法にあまり適する構造面材とはいえない。MDF、OSB、パーティクルボード、構造用合板は湿気容量効果がみられる。より湿気容量の大きな材料と複合化することも高湿化改善の手法として考えられよう。

・ウレタンボード両面のアルミクラフト紙を取り除いた状態でシミュレーションした結果、岩見沢・火山性ガラス質複層板・ウレタンボード A 40 mm の仕様で、年平均5%RH 程度改善できることが明らかとなった。製品の材料構成上可能であるなら、一定程度以上の透湿性能を確保できると湿度環境は改善できる可能性がある。

謝辞

本研究は、アキレス株式会社からの受託研究「高性能硬質ウレタンフォーム断熱材を用いる充填付加断熱壁体の熱湿気性状に関する研究」（2018~2019）により得られた成果の一部をまとめたものである。ここに記して謝意を表する。

引用・参考文献

- 1) JIS Z1520-1990 はり合せアルミニウムはく、2015年確認、日本規格協会
- 2) JIS Z0208-1976 防湿包装材料の透湿性試験方法（カップ法）、日本規格協会
- 3) ISO 12572-2016 (E) Hygrothermal Performance of Building Materials and Products—Determination of water vapor transmission properties に準拠
- 4) JIS A6930-2008 住宅用プラスチック系防湿フィルム、日本規格協会
- 5) JIS A6111-2004 透湿防水シート、日本規格協会
- 6) 福田恭彬・赤尾勝・山崎淳司：次世代型建築内装材—MOISS、粘土科学第44巻第3号、118-123、2005
- 7) 松岡大介・鈴木修一：軒裏換気方式における冬期の小屋裏温湿度の解析、温暖地における木造住宅の小屋裏温湿度形成に関する研究その3、日本建築学会環境系論文集 第81巻 第725号、581-588、2016年7月
- 8) 大澤徹夫・土川忠浩・水谷章夫：多孔質建築材料内の局所非平衡性に関する研究、第7報 平衡容積含水率曲線と湿気容量の実験式、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、299-300、1996年10月
- 9) 谷本潤・萩島理・片山忠久・南雲基予子：室内熱湿気環境の高精度予測に資する紙類の吸放湿特性に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.79、1-9、2000.10
- 10) F. Rouquerol, J. Rouquerol and K. Sing, “Adsorption by Powder & Porous Solid”, Academic Press, London, (1999). Pure Appl. Chem. 2015; 87 (9-10):

1051-1069

- 11) 本間義規：非防湿断熱壁体を対象とした熱水分同時移動解析，岩手県立大学盛岡短期大学部研究論集第8号，33-40，2006年3月
- 12) ISO15099 Thermal performance of windows, doors and shading devices—Detailed calculations, 2003
- 13) 拡張アメダス気象データ (EA 気象データ)，株式会社 気象データシステム
- 14) 日本規格協会 JIS A6930-1997 住宅用プラスチック系防湿フィルム (2008確認)
- 15) 本間義規・絵内正道・福島明・鈴木大隆：居室・外気からの空気移動が基礎断熱した床下温湿度環境に与える影響，日本建築学会計画系論文集 第548号，23-30，2001. 10
- 16) 本間義規・銚井修一・福島明：吸放湿性建築材料の実用的湿気物性同定に関する基礎的検討，日本建築学会計画系論文集 第513号，31-37，1996. 11
- 17) 佐藤彰治・絵内正道・本間義規：濃霧発生地域におけるサンルーム付き住宅の有効性について その2 簡易的なサンルームを付設した既存住宅の夏期の調温調湿効果，日本建築学会環境系論文集 第625号，313-320，2008.03