

研究報告

非防湿断熱壁体を対象とした熱水分同時移動解析

Simulation on Heat and Moisture Transfer regarding Insulated Wall without Vapor Barrier

本間 義規 *1

Yoshinori HONMA

Keywords: Insulated Wall without Vapor Barrier, Heat and Moisture transfer, Moisture Capacity
非防湿壁体, 熱水分同時移動, 湿気容量

1.はじめに

寒冷地における断熱壁体は、一般にその両側で大きな温度差が生じるため、断熱層の室内側で防湿施工をし、水蒸気圧の高い室内空気が流入するのを防止することが必要である。また、通気層を設置し、壁内への雨水侵入や他部位からの水分移動、施工時の雨水による含水状態の解消を行う機能を有することも重要である。これらの設計ルールは、北海道における学官での研究蓄積とともに、国の省エネルギー基準、品確法に基づく住宅性能表示等にも仕様規定化され、全国的に適用されている。しかし、この設計ルールの大きな問題点は、防湿施工の確実性が施工者の工法理解度や施工の熟練度に大きく依存する点である。北海道での断熱気密化の過程においても、防湿層を断熱材外気側に施工する例が多数みられたが、これと同じことが今後全国的に生じる危険性を完全には否定できない。また、工業化された工法でも断熱の重要性があまり認識されていないためか、断熱気密施工は依然として人間の手作業に基づいており、その設計ルールを熟知していない作業者が適当な施工をすることによるリスクは到底ゼロにすることはできない状況にある。この状況を改善するためには、防湿の断点を生じさせない施工法の確立、もしくは防湿層に依存しない工法の開発が必要である。天井・屋根なども含めた断熱外皮内が常に乾燥化すること、すなわち、室内側が負圧になるような状況を作り出すことが重要であり、その意味で換気計画をも併せて考えるべき内容であること、また常に乾燥した外気が断熱外皮内を通過するような壁体構造とすること、などの工夫が求められる。

現在までに、こうした考え方を具現化する技術としてパッシブ換気システムやダイナミックインシュレーション技術が研究されている^{1), 2)}。ただし、これらのシステムもユーザーに依存する部分をゼロにはできず、その意味で曖昧な部分を残しており、必ずしもユビキタスな一般解とはなっていない。本検討では、こうした背景に基づき、比較的湿気容量の大きな材料を用いた非防湿壁体の実現可能性を熱水分同時移動解析によ

り検討したので、その結果について報告する。

2. 基礎理論

2.1 熱水分同時移動方程式

壁体内の水分状態を非定常的に予測するためには、水分移動に関する拡散方程式を解かなくてはならないが、水分移動に伴う潜熱移動が生じることから、熱移動に関する拡散方程式も連立して解くことが必要となる。水蒸気拡散領域（ハイグロスコピック領域）における基礎式（1次元）は松本³⁾らによって基礎理論が確立されており、次式で表される。

$$\text{水分収支} \quad (\Phi_0 \gamma' + \kappa) \frac{\partial X}{\partial t} - \nu \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda'_x \nabla^2 X \quad (1)$$

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

$$\text{境界条件(水分)} \quad -\lambda'_x \frac{\partial X}{\partial n} = \alpha'_x \cdot (X_o - X) \quad (3)$$

$$\text{境界条件(熱)} \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha \cdot (T_o - T) \quad (4)$$

ただし

- X : 絶対湿度 (kg/kgDA)
- T : 温度 (°C)
- Φ_0 : 空隙率 (m³/m³)
- γ' : 空気密度(kgDA/m³)
- λ'_x : 湿気伝導率(kg/ms(kg/kgDA))
- λ : 熱伝導率(W/mK)
- α : 熱伝達率(W/m²K)
- r : 相変化熱(J/kg)
- c : 質量比熱 (J/kgK)
- ρ : 密度(kg/m³)
- κ : 絶対湿度変化に対する含水率勾配(kg/m³(kg/kgDA))
- ν : 温度変化に対する含水率勾配(kg/m³K)
- α_x : 湿気伝達率(kg/m²s(kg/kgDA))

κ , ν は、前時間ステップの相対湿度を用いて平衡含水率曲線より新たな値を求める非線形な扱いとする。平衡含水率曲線は大澤らの提案式(5式)を用いて⁴⁾、非線形最小2乗法(Quasi-Newton法)により各係数を同定し、関数近似する。 κ , ν はこれを各々絶対湿度と温度で微分することにより得られる。

*1 生活科学科生活科学専攻助教

平衡含水率曲線の近似式(大澤式)

$$\Psi = A \cdot H \cdot e^{-B \cdot H} + C \cdot H + D \cdot (e^{E \cdot H} - 1) \quad (5)$$

κ の算出式

$$\kappa = \left. \frac{\partial \Psi}{\partial X} \right|_T = \frac{\partial \Psi}{\partial H} \cdot \left. \frac{\partial H}{\partial X} \right|_T = \frac{1}{X_s} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial H} \quad (6)$$

ν の算出式

$$\begin{aligned} \nu &= \left. -\frac{\partial \Psi}{\partial T} \right|_X = -\frac{\partial \Psi}{\partial H} \cdot \left. \frac{\partial H}{\partial T} \right|_X \\ &= \kappa \cdot \frac{X}{X_s} \cdot \frac{dX_s}{dT} = \kappa \cdot H \cdot \frac{dX_s}{dT} \quad (7) \end{aligned}$$

2.2 一次元壁体の空間離散化手続き

基礎式に基づき、コンピュータ上で熱水分同時移動現象をシミュレートするためには、(1), (2)式で表される放物型偏微分方程式を線形代数方程式に近似する必要がある。本検討では、空間離散化にコントロールボリューム法⁵⁾を用いている。この方法は、熱容量項および湿気容量項を、格子点を中心とした有限体積(コントロールボリューム)部分で考慮し、その格子点を節点として熱収支および物質収支を考えるため、熱流束および物質流束の保存が保証されること、また境界部分も半コントロールボリュームとして扱うことで境界位置と節点と一致するため、表面の熱・物質収支が保存され、無理な近似を回避できるという利点がある。

時間に関しては陽解法、完全陰解法またはその両者の重みを0.5ずつに配分するCrank-Nicolson解法が一般的である。陽解法は、式を陽的に書き下すことができプログラミングは容易であるが、安定条件を満たすためには、空間分割で1mmオーダー、時間分割で0.1sec.オーダーが必要となるため、年周期単位のシミュレーションは例え1次元であっても計算負荷が大きい。その点、完全陰解法は行列式を解く必要が生じるが安定条件は厳しくなく(ただし精度的には時間分割に配慮が必要である)、時間分割間隔を比較的大きくすることが可能である(360sec.オーダー)。こうした点を考慮して、本検討では完全陰解法を採用している。

1次元拡散の場合の空間分割モデルを図1に示す。これを元に(1), (2)式を空間離散化したものが(8)~(13)式である。

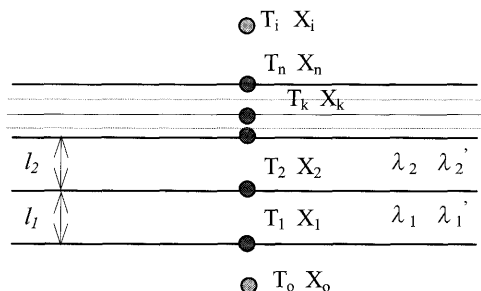


図1 1次元壁体における節点の設定

外気側境界

$$\begin{aligned} & -(\alpha'_o + A_1 + C_1)X_1^{P+1} + A_1X_2^{P+1} + D_1T_1^{P+1} \\ & = -C_1X_1^P + D_1T_1^P - \alpha'_oX_o^{P+1} \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & -(\alpha_o + B_1 + E_1)T_1^{P+1} + B_1T_2^{P+1} + F_1X_1^{P+1} \\ & = -E_1T_1^P + F_1X_1^P - \alpha_oT_o^{P+1} \quad (9) \end{aligned}$$

一般部(k 節点)

$$\begin{aligned} & -A_{k-1}X_{k-1}^{P+1} + (A_{k-1} + A_k + C_{k-1} + C_k)X_k^{P+1} \\ & - A_{k+1}X_{k+1}^{P+1} - (D_{k-1} + D_k)T_k^{P+1} \\ & = (C_{k-1} + C_k)X_k^P - (D_{k-1} + D_k)T_k^P \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & -B_{k-1}T_{k-1}^{P+1} + (B_{k-1} + B_k + E_{k-1} + E_k)T_k^{P+1} \\ & - E_{k+1}T_{k+1}^{P+1} - (F_{k-1} + F_k)X_k^{P+1} \\ & = (E_{k-1} + E_k)T_k^P - (F_{k-1} + F_k)X_k^P \quad (11) \end{aligned}$$

室内側境界

$$\begin{aligned} & -A_{n-1}X_{n-1}^{P+1} + (\alpha'_i + A_{n-1} + C_{n-1})X_n^{P+1} - D_{n-1}T_n^{P+1} \\ & = C_{n-1}X_n^P - D_1T_n^P + \alpha'_iX_i^{P+1} \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & -B_{n-1}T_{n-1}^{P+1} + (\alpha_i + B_{n-1} + E_{n-1})T_n^{P+1} - F_{n-1}X_n^{P+1} \\ & = -F_{n-1}X_n^P + E_{n-1}T_n^P + \alpha_iT_i^{P+1} \quad (13) \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned} A_n &= \frac{\lambda'_{xn}}{l_n} & B_n &= \frac{\lambda_n}{l_n} & C_n &= \frac{(\Phi_o \gamma' + \kappa)_n l_n}{2\Delta t} \\ D_n &= \frac{\nu_n l_n}{2\Delta t} & E_n &= \frac{(c\rho + r\nu)_n l_n}{2\Delta t} & F_n &= \frac{r\kappa_n l_n}{2\Delta t} \end{aligned}$$

と置いた。

なお、温度 T、絶対湿度 X の右下添え字は場所を、右上添え字は時間を表している。

以上に示したように、時間後退差分は P 時間の状態量をもとに、次時間ステップ (P+1 時間) の各節点のバランス式を立てることになる。これによって生じる未知節点の多元連立一次方程式(節点数が n の場合、熱と水分の2種類の節点があるため、行列の大きさは 2n x 2n になる)を解くことで(P+1)時間の壁体内部温度・湿度が逐次求められる。

κ , ν は前時間ステップの温湿度から(6), (7)式を用いて算定することで、収束計算を回避している。

なお、連立方程式のソルバーには Gauss-Jordan 法を用いている。

2.3 通気層の扱い

木造断熱壁体は、壁内の水分状態を外気と同等の状態に保持するために通気層を設けることが一般的である。前述したように、これは防湿欠損が生じる際のフェイルセーフ的な役割を担うが、そのほかにも部材の

初期含水率や施工中の濡れ、雨水の壁内浸透などに対する乾燥化や日射受熱に伴う温度勾配によって生じる夏型結露防止など、さまざまな効果が期待できる。本検討では、こうした通気層の機能を図2に示すような室空間としてモデル化し、瞬時定常を仮定して通気層内温湿度を算出し、シミュレーションに反映させている(14, 15式参照)。

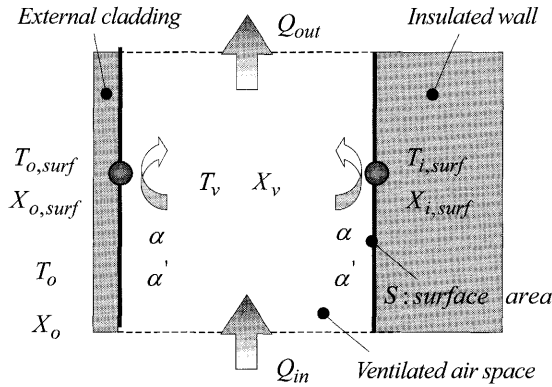


図2 通気層のモデル化

$$T_v = \frac{\alpha S(T_{o,surf} + T_{i,surf}) + c\rho_{out}Q_{in}T_o}{2\alpha S + c\rho_v Q_{out}} \quad (14)$$

$$X_v = \frac{\alpha' S(X_{o,surf} + X_{i,surf}) + \rho_{out}Q_{in}X_o}{2\alpha' S + \rho_v Q_{out}} \quad (15)$$

ここで、通気層内の表面温度・湿度は、断熱壁体および外装材の熱水分同時移動解析結果から与えられる。また、表面熱・湿気伝達率は、通気流量を通気断面積で除することにより通気層内の風速を求め、その結果を用いてユルゲスの式⁹⁾から対流熱伝達率を、ルイス式³⁾から湿気伝達率を求める。

通気流量は、単純2開口の場合 $Q_{in}=Q_{out}$ であり、これを Q とおくと、通気層入口・出口の αA (αA_{in} , αA_{out}) および入口と出口の圧力差 Δp を与えることにより16式で計算できる。圧力差は風圧および温度差で生じ、本検討では風圧係数として $C_{in}=0.1$, $C_{out}=-0.1$ としている。なお、通気層内表面の摩擦抵抗は無視した(場合によってはこれらの抵抗も考慮する必要がある)。

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha A_{in}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha A_{out}}\right)^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \Delta p \quad (16)$$

窓下など通気層の流路が複雑化するような部位や、複数開口のある小屋裏空間などと接続するような場合は、多数室問題として扱うと良いだろう。

3. 非防湿断熱壁体のシミュレーション検討

3.1 壁体の概要と構成材料物性値

非防湿壁体の熱水分状態を熱水分同時移動シミュレーションにより検討する。対象とする壁体は、ポリエ

チレンフィルム 0.2mm 厚を防湿層として設けるモデル(model-1)、model-1 から防湿層を除いた非防湿断熱壁体モデル(model-2)、軸間に木質繊維板を充填する非防湿壁体モデル(model-3)である。おのおのの壁体断面図を図3に示す。外装材および通気層を除いた断熱性能が $0.376W/m^2K$ になるように、model-3 では構造用合板の外側にグラスウール 32K14mm を付加している。

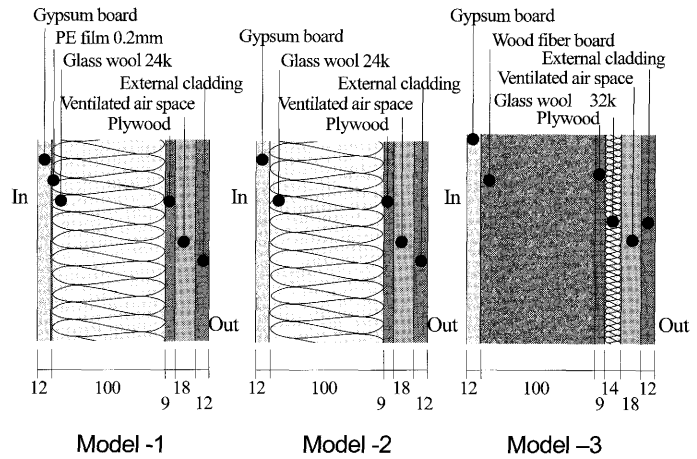


図3 シミュレーション壁体断面図

表1 構成材料の熱湿気物性値

	密度 ρ (kg/m ³)	比熱 c (J/kgK)	熱伝導率 λ (J/msK)	湿気伝導率 (kg/ms(kg/kgDA))	空隙率 ϕ (m ³ /m ³)
Gypsum Board	700	870	0.24	3.54E-06	0.7
wood fiber board	310	1032	0.046	4.61E-06	0.773
Ply wood	500	1880	0.113	3.07E-07	0.22
Glass wool	24.32	840	0.03944	2.00E-05	0.99
PE film	664.61	1470	0.046	2.13E-10	0
	A	B	C	D	E
Gypsum board	0.348459	5.56549	0.0632888	2.19043E-11	21.1522
wood fiber board	1.78834	0.0037257	-1.59648	2.27439E-12	25.5388
Ply wood	10.1261	0.219716	-12.796	3.74115	0.843734
Glass wool	0.854862	0.372153	-1.54789	1.53261	0.496018
PE film	0	0	0	0	0

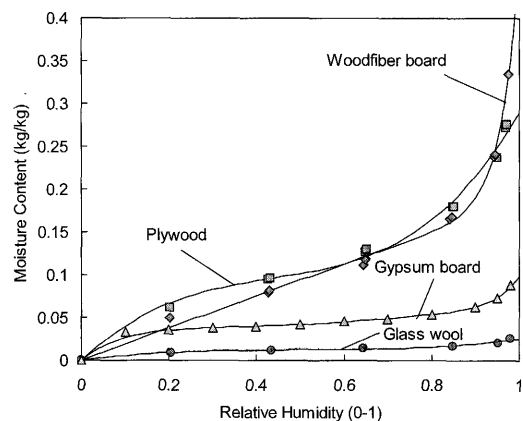


図4 材料の平衡含水率曲線

構成材料の熱湿気物性値を表1に示す。なお、表1中の下段A, B, C, D, Eは平衡含水率曲線(5)式の係数である。実測値と近似曲線とで平衡含水率曲線を描いたものが図4である。

3.2 計算条件と対象部位

境界条件は壁体内外ともに第 3 種境界条件とする (17~20 式)。

室内の温度は(21)式に示すように年周期の正弦曲線と与える。また室内絶対湿度は、実測より求めた室内外湿度差を参考にして外気絶対湿度+4.0 g/kgDA とする⁷⁾。外気側の温度条件は、壁面への日射および夜間放射を考慮し、日射吸収率 0.9, 外装材表面の放射率 0.9, 地表面反射率 0.3 とする。外気絶対湿度は気象データの値を用いる。

気象データは拡張アメダス気象データの盛岡標準年⁸⁾を用いることとし、2 年間の計算を行い、初期条件の影響のなくなる 2 年目の結果を用いて考察を行う。

材料分割は、表面および異種材料境界で 2~4mm 程度となるような非等分分割を行っている。分割数は model-1 で 14 分割, model-2 で 13 分割, model-3 で 18 分割である。また計算時間分割は全てのモデルにおいて 0.1h とした。

なお、対象壁面は夏型結露の生じやすい西側壁面と、低温化しやすい北側壁面を解析対象とする。

$$\alpha_i = 15.5 (W / m^2 K) \quad (17)$$

$$\alpha_i' = 0.0097 (kg / m^2 s (kg / kgDA)) \quad (18)$$

$$\alpha_o = 27.2 (W / m^2 K) \quad (19)$$

$$\alpha_o' = 0.021 (kg / m^2 s (kg / kgDA)) \quad (20)$$

$$T_i = 25.0 + 5.0 \times \cos\left(\frac{2\pi(\text{day} - 212)}{365}\right) (^\circ\text{C}) \quad (21)$$

$$X_i = X_o + 4.0 (g / kgDA) \quad (22)$$

4. シミュレーション結果

4.1 防湿層付き GW 壁体 (model-1) の結果

図 5~7 に model-1 の断熱材内側節点 (PE フィルムとグラスウールの境界: GW-in と略記) と断熱材外側節点 (グラスウールと構造用合板: GW-out と略記) の温湿度年間変動 (日平均) を示す。

温度をみると、GW-in は西面も北面もほとんど変わらないが、GW-out は西側壁面が北側壁面よりも夏期に温度変動が大きい。これは西日の影響である。そのため、GW-out-W は温度勾配による水分移動により夏期の絶対湿度変動が大きくなる。相対湿度は、8、9月に年間で最も高くなり、北側で 80%RH 程度、西側で 75%RH 程度となる。図 8、9 に 1 月および 8 月の相対湿度変動 (1 時間インターバル値) を示す。冬期は防湿層 (PE フィルム) があることで西側・北側壁面とも断熱材内側 (GW-in) で 70%RH を下回っている。夏は断熱材室内側の相対湿度変動が大きくなっていて、西側壁面で 100%になる日もあるが、継続的に結露状態にはなっていない。断熱材外気側は安定した相対湿度の推移をしており、通気層の効果が伺える。

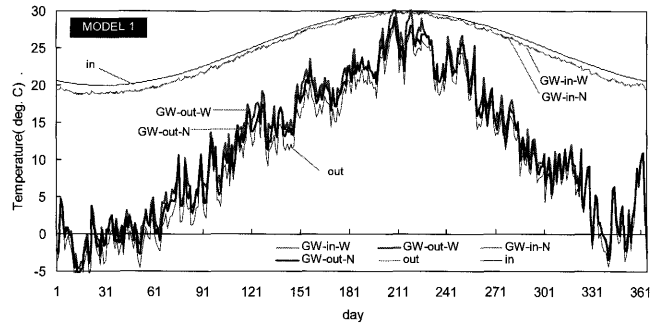


図 5 model-1 壁体の年間温度変動 (日平均)

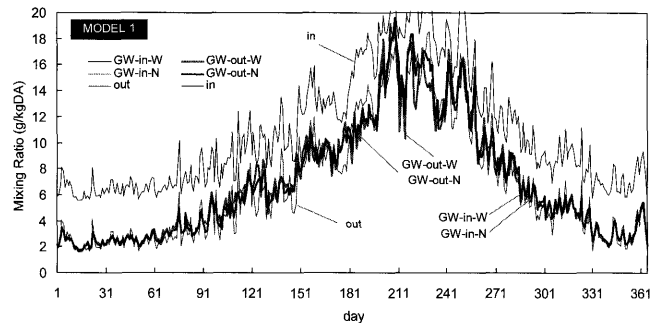


図 6 model-1 壁体の年間絶対湿度変動 (日平均)

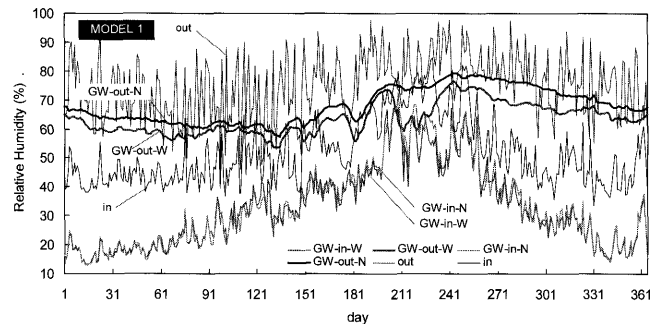


図 7 model-1 壁体の年間相対湿度変動 (日平均)

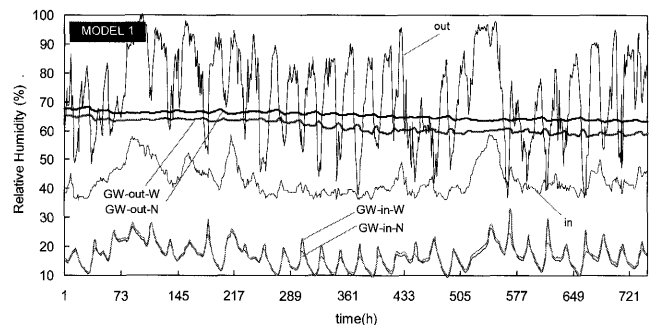


図 8 model-1 壁体の 1 月相対湿度変動 (1h)

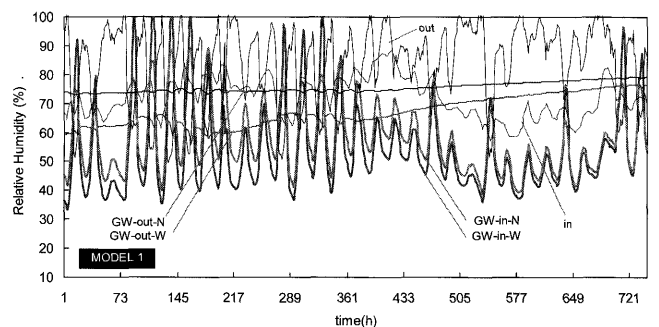


図 9 model-1 壁体の 8 月相対湿度変動 (1h)

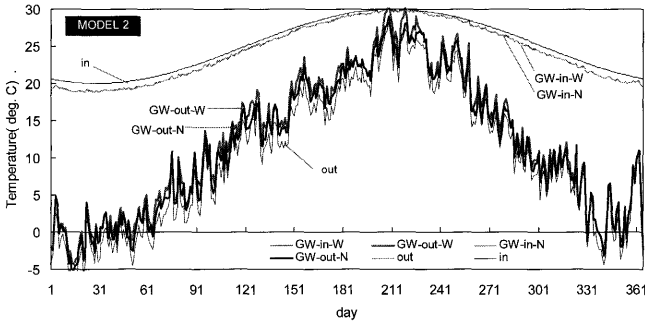


図10 model-2 壁体の年間温度変動 (日平均)

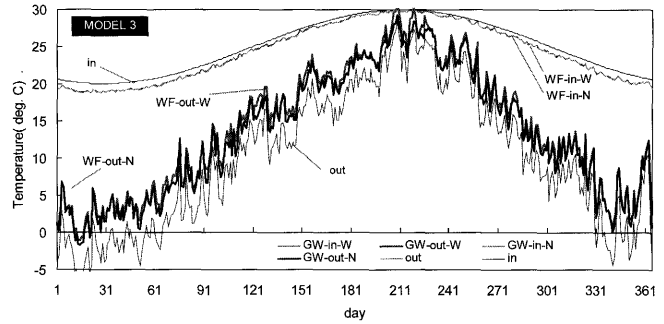


図15 model-3 壁体の年間温度変動 (日平均)

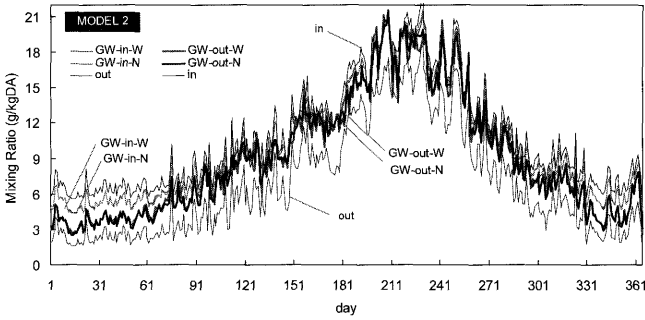


図11 model-2 壁体の年間絶対湿度変動 (日平均)

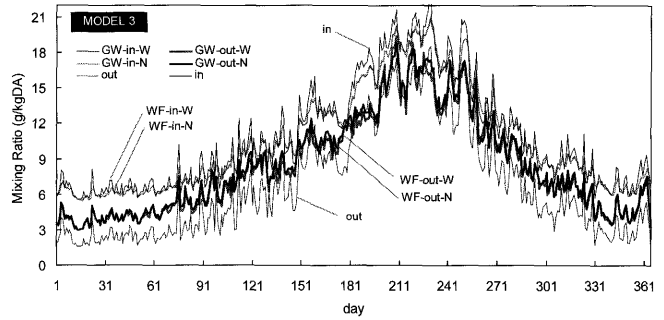


図16 model-3 壁体の年間絶対湿度変動 (日平均)

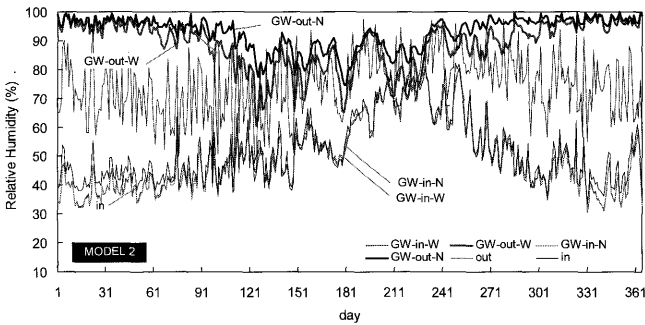


図12 model-2 壁体の年間相対湿度変動 (日平均)

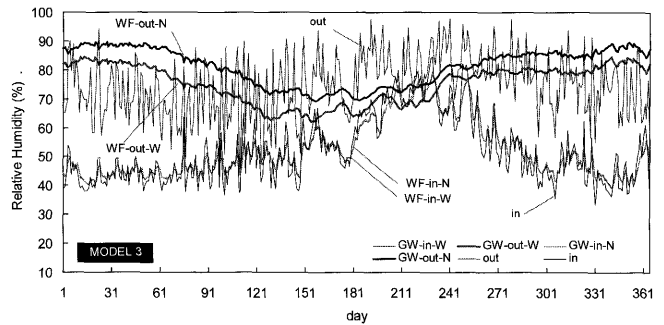


図17 model-3 壁体の年間相対湿度変動 (日平均)

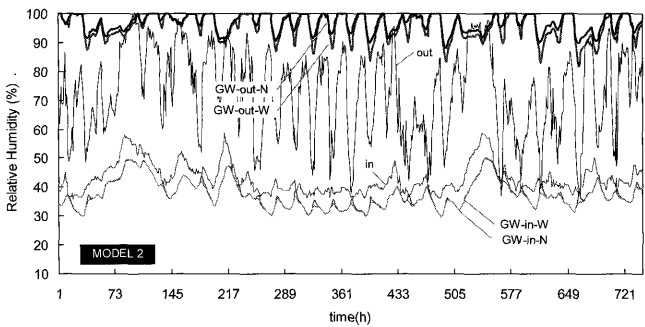


図13 model-2 壁体の1月相対湿度変動 (1h)

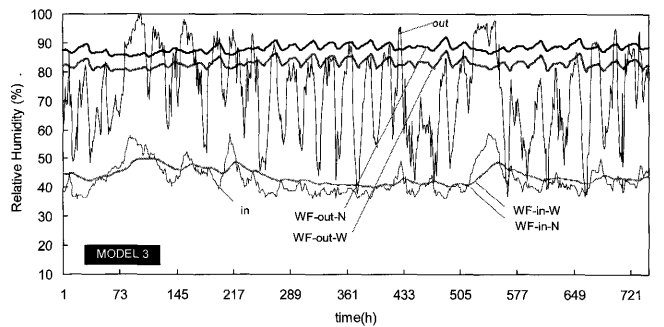


図18 model-3 壁体の1月相対湿度変動 (1h)

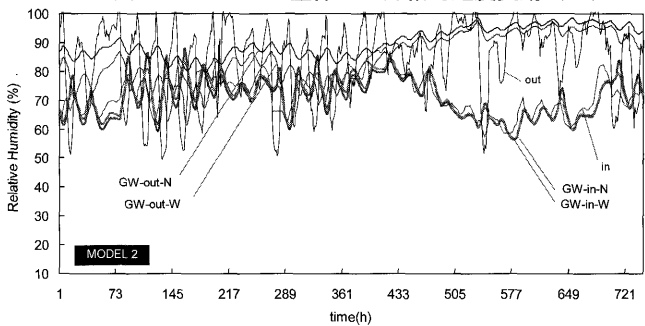


図14 model-2 壁体の8月相対湿度変動 (1h)

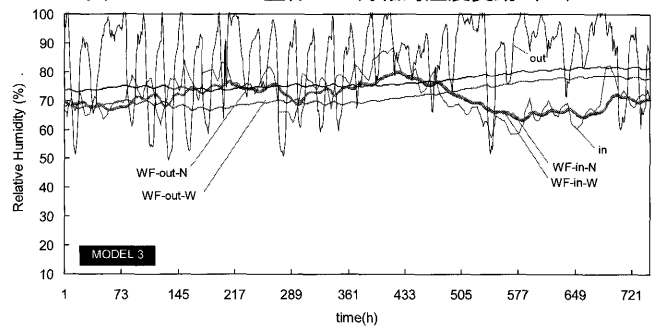


図19 model-3 壁体の8月相対湿度変動 (1h)

4.2 防湿層なし GW 壁体 (model-2) の結果

図 10～12 は model-2 の年間温湿度変動のグラフである。model-2 は model-1 壁体の防湿層 (ポリエチレンフィルム 0.2mm) を取り除いた以外は model-1 と同様の層構成を持つ非防湿壁体である。

温度変化は model-1 とほぼ同様に推移しているが、絶対湿度は model-1 に比べて日平均で 2g/kgDA ほど高くなっており、室内からの水分移動により高湿化が生じている。相対湿度変化をみると 10 月～3 月の冬期間は、日平均でも 95%RH を超えており、結露被害が生じる危険性が高い。12～1 月は GW-out 温度が氷点下になる日もあることから、結露・結氷し、水分蓄積が進む可能性も推測される。

図 13 は 1 月の相対湿度変動 (1 時間インターバル) を示している。西面・北面とも GW-out 部分は 90～100% で変動しており、結露被害の危険性が高い。

図 14 は 8 月の相対湿度変動 (1 時間インターバル) である。防湿層ありの model-1 と比べて、断熱材室内側の相対湿度は高くても 90%RH を超えておらず、夏型結露の発生の危険性はないことがわかる。

4.3 防湿層なし木質繊維板壁体 (model-3) の結果

図 15～17 は軸間に木質繊維板を充填したモデル (model-3) の年間温湿度変動 (日平均) のグラフである。温度変化をみると (図 15), GW ボード付加断熱があるため、冬期の木質繊維板外気側の温度は他のモデルに比べて高く推移する。

また木質繊維板室内側 (WF-in) 絶対湿度は、室内絶対湿度に近く、木質繊維板外気側 (WF-out) の絶対湿度は室内側絶対湿度と外気絶対湿度のほぼ中間程度の値になっている (図 16)。これは、木質繊維板の湿気容量により、室内側から木質繊維板外側への湿気拡散量が低減していることを示している。この点は湿気容量の小さい GW とは大きく異なる。しかしながら、湿気拡散がゼロではないため、冬期の木質繊維板外気側の相対湿度は比較的高めに推移する (80～90%)。特に北側壁面が西側壁面よりも相対湿度が高めになっているが、これは北側壁体温度が西側よりもやや低温で推移することに起因している。1 月の相対湿度変動 (1 時間インターバルデータ, 図 18) をみても、このことがよくわかる。図 19 は 8 月の相対湿度変動 (1 時間インターバルデータ) を示しているが、木質繊維板室内側 (WF-in) の相対湿度は高々 80%RH 強程度であり、夏型結露の心配はない。

4.4 各壁体断面の温度分布

図 20～22 に各モデル壁体の月毎 (各月 1 日 0:00) の断面温度分布を示す。ここでは、北側壁体の結果のみを示す。日射受熱のない夜間の結果なので、全ての月において外気側への温度勾配が生じている。また、

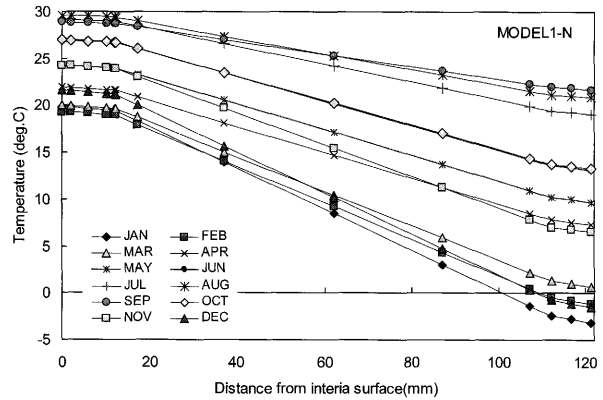


図 20 model-1 壁体断面の温度分布

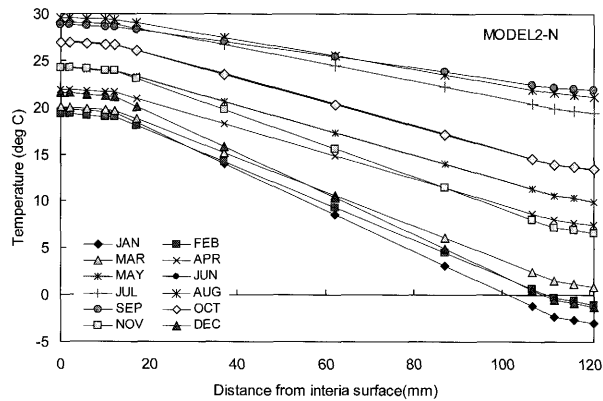


図 21 model-2 壁体断面の温度分布

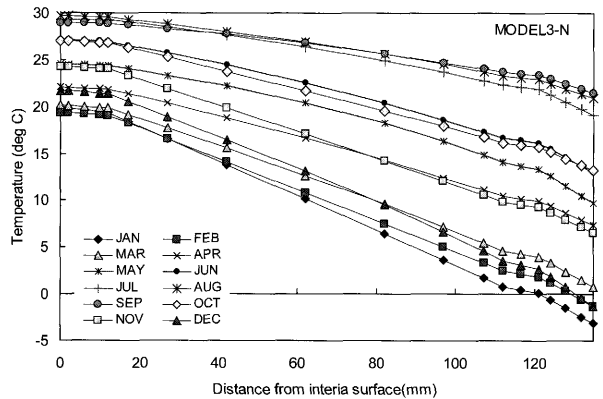


図 22 model-3 壁体断面の温度分布

室内側壁表面温度は、各モデルの断熱性能が同一なので、当然ながらほぼ等温になっており、壁体モデル間の差異はない。model-3 壁体は GW ボードを付加断熱しているため、構造用合板部分の温度勾配が緩くなっていることがわかる。

4.5 各壁体断面の絶対湿度分布

図 23～25 に各モデル壁体の月毎 (各月 1 日 0:00) の断面絶対湿度分布 (北側壁体のみ) を示す。

図 23 は防湿層付き壁体であり、防湿層の両側で明確な絶対湿度差が生じていること、また断熱層 (GW) 内は絶対湿度差が生じていないことがわかる。GW は湿気伝導性が高く、かつ湿気容量の小さな材料である

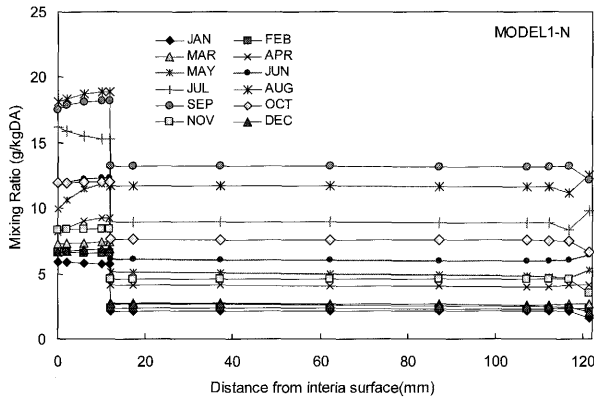


図 23 model-1 壁体断面の絶対湿度分布

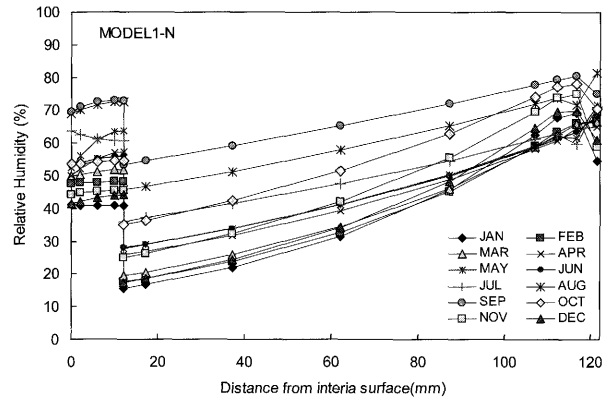


図 26 model-1 壁体断面の相対湿度分布

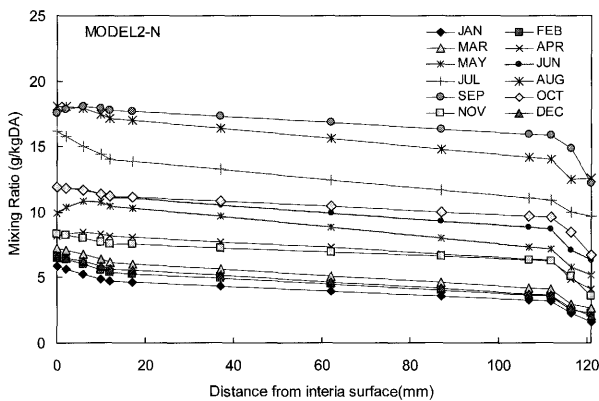


図 24 model-2 壁体断面の絶対湿度分布

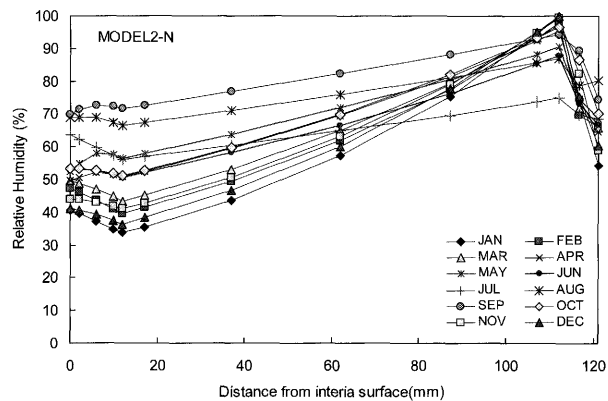


図 27 model-2 壁体断面の相対湿度分布

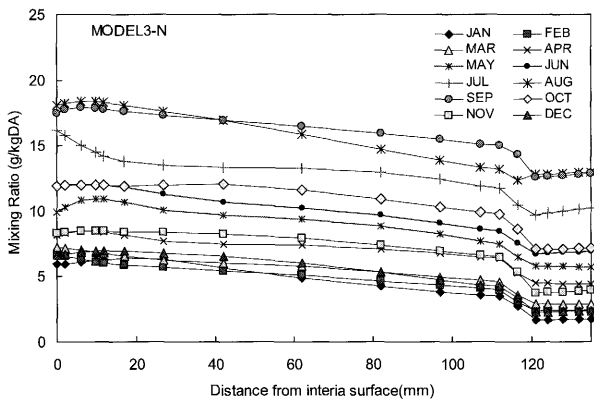


図 25 model-3 壁体断面の絶対湿度分布

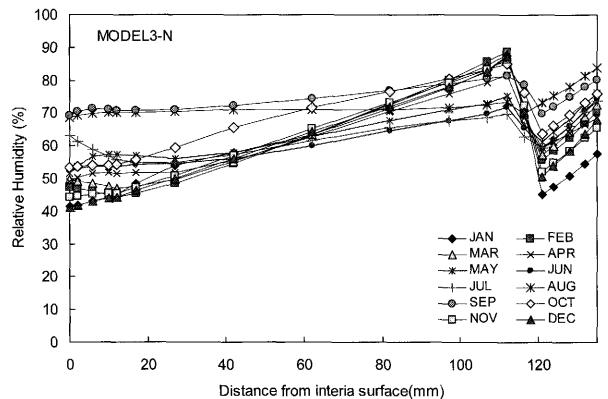


図 28 model-3 壁体断面の相対湿度分布

ため (表 1, 図 4 参照), 室内外の湿度境界の明確化という点では, その機能を十分果たしていることが示されている。また 7, 8 月は通気層表面 (外気側) の絶対湿度が高く内側への勾配になっており, 外気・合板側からの湿気拡散が生じていることもわかる。

図 24 は防湿層なしガラスウール壁体 (model-2) の絶対湿度分布 (北側壁体) である。防湿層がなく, 室内側からの湿気拡散があり, 年間を通じて外気側への絶対湿度勾配が生じている。model-1 壁体とは異なり, 夏期に室内側への湿流が生じづらく, たとえ温度勾配等による外気側からの湿気拡散が生じたとしても, 居室室内へ放湿されるため, 夏型結露の心配はない。しかし, 冬期は外気側への絶対湿度勾配を小さくできるよ

うな対策が必要である。

図 25 は 木質繊維板を用いた非防湿断熱壁体 (model-3) の絶対湿度分布である。木質繊維板部分は外気側に向かって緩やかな勾配が生じており, また季節によって曲線状の分布になっていることがわかる (特に春先から梅雨時期にかけて)。この季節は, 絶対湿度が大きく変化する時期でもあり, 湿気容量が比較的大きいことによる非定期的な変化であるといえる。また, GW ボード部分はどの季節もほぼフラットな状態で等分布状態になっていることがわかる。

4.6 各壁体断面の相対湿度分布

図 26~28 に各モデル壁体の月毎 (各月 1 日 0:00)

の断面相対湿度分布（北側壁体のみ）を示す。

図 26 は、model-1 壁体の結果である。絶対湿度分布と同様に、防湿層前後で大きな相対湿度差が生じていること、また GW 内にはほとんど絶対湿度勾配が生じていないが、温度分布があるために、外気側の相対湿度は高くなっている。夏期がもっとも相対湿度が高くなっているが、これは外気湿度が高いことが原因である。冬期は外気が乾燥するため、むしろ低湿状態になる。

図 27 は model-2 壁体の結果である。断熱材と構造用合板の境界部分で相対湿度が非常に高くなっている。

図 28 は model-3 壁体の結果である。特に冬期において、木質繊維板外気側の相対湿度が高くなっているが、90%RH を超えていないこと、また構造用合板があることで GW ボードへの室内側からの湿気拡散がある程度防ぐことができ、GW ボード内での高湿化の心配はない。

5. まとめ

断熱壁体の熱水分同時移動に関するシミュレーション手法について詳説し、実際に非防湿壁体を含む 3 種類の断熱壁体の解析をおこなった。

その結果、グラスウール断熱壁体は防湿層がないと冬期に内部結露を生じること、一方、防湿層があることにより、頻度は高くないが夏型結露を生じることが明らかとなった。これらのことは、一般的な繊維系断熱壁体の性質を追認するものであり必ずしも新たな知見ではない。しかし、盛岡市の気象条件下における、やや室内湿度が高い状態では（室内絶対湿度が外気絶対湿度+4.0g/kgDA は、室内湿度発生量が大きく、換気量がやや不足気味な状態に相当する）、例え通気層があっても、グラスウールのような透湿性が高く湿気容量の小さな断熱材料を使用する場合は、防湿層が不可欠であることを明示した点で重要である。

また、木質繊維板のような湿気容量の大きな材料を主要な断熱材料として用いることで、非防湿壁体でも冬型結露・夏型結露ともに防止可能となることが明らかとなった。

本検討では、1 次元断熱壁体を対象として室内温湿度条件を境界条件に設定したが、本来、室内温湿度条件自体が、室内水分発生、換気量変動や住宅内外の圧力差等のパラメータによって変化するものである。その意味で、より精緻な解析を行うためには多数室問題としての取り扱いや、また構造空隙内での熱・空気・湿気移動の考慮なども、場合によっては必要になる。

これらの点も勘案したシミュレーション技術の汎用化が今後ますます重要となるだろう。

参考文献

- 1) 福島明・絵内正道・宮浦睦明・本間義規：基礎断熱した床下空間を利用したパッシブ換気・暖房方式の実住宅への適用、一寒冷地のパッシブ換気に関する研究 その 2、日本建築学会計画系論文集、No.532、2000.6
- 2) 本間義規・鈴木大隆・北谷幸恵・瀬戸裕直・大槻清明・藤田里美：温暖地に向けた断熱外壁の防露技術に関する研究 —その 3 通気壁体の冬期実験結果とシミュレーション検討、日本建築学会大会（関東）学術講演梗概集、D-2、2001.9
- 3) 松本衛：湿気、新建築学体系 10 環境物理、彰国社、1984
- 4) 大澤徹夫・土川忠浩・水谷章夫：多孔質建築材料内の局所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、日本建築学会学術講演梗概集 D-2 (近畿)、1996.9
- 5) スハス.V.パタンカー・水谷幸夫・香月正司：コンピュータによる熱移動と流れの数値解析、森北出版、1985
- 6) 例えば田中俊六他：最新建築環境工学、井上書院、1989
- 7) 本間義規：非居住空間を含む多数室を対象とした熱・空気・湿気移動解析、日本建築学会環境工学委員会熱環境運営委員会第 35 回熱シンポジウム、pp.31-38、2005.11
- 8) 拡張アメダス気象データ、日本建築学会、丸善、2000
- 9) 小門純一・八田夏夫：数値計算法の基礎と応用、森北出版、1988
- 10) 宮下精二：数値計算、応用数学基礎講座、朝倉書店、2002