九州大学大学院総合理工学報告
第29巻　第4号　385-391頁　平成20年3月

Engineering Sciences Reports, Kyushu University
Vol. 29, No. 4, pp. 385-391, MAR. 2008

壁体吸放湿を考慮した室内湿度変動モデルとその精度の検証

細川隆行*1,†, 林徹夫*1, 尾崎明仁*2

(平成20年1月31日　受理)

An Indoor Humidity Fluctuation Model in Consideration of the Moisture Transfer on Interior Surfaces and the Verification of Its Accuracy

Takayuki Hosokawa, Tetsuo Hayashi and, Akihito Ozaki
†E-mail of corresponding author: *hosokawa@hrmbox.eee.kyushu-u.ac.jp*

Detailed equations of combined heat and moisture transfer have been proposed to analyze temperature and humidity fluctuation of walls. They are, however, too complicated to apply to transient room temperature and heat load calculation of multiple zone buildings. Therefore we proposed a simplified calculation method for sorption on walls. It is necessary to confirm the predictive accuracy of the indoor humidity when the simplified calculation method is applied. This paper describes that the indoor humidity fluctuation model applied the proposed calculation method, and the predictive accuracy of the model is confirmed by the comparison with the experiment. The experiment was carried out in the model house where the building materials to regulate an indoor humidity was set up. The measurement and calculation values were agreed and the effectiveness of the simplified calculation method was shown.

Key words: *Simplified Calculation Method, Adsorption and Desorption, Inside of Walls, Indoor Humidity, Experiment*

1. 緒　　言

室内には壁体，家具，衣類など吸放湿する材料が多数存在するため，その温湿度環境を十分な精度で予測評価するには，これら吸放湿材の影響を考慮する必要がある。一方で年間を通した室内温湿度環境や熱負荷の予測では，壁体を一次元伝熱，室内空気の瞬時一様拡散を仮定した汎用室温変動熱負荷シミュレーションが用いられる。汎用室温変動熱負荷シミュレーションでは，室内空気温度および熱負荷の変動の解析に重点が置かれ，室内湿度変動における吸放湿現象は簡略化して取り扱うことが多い。すなわち，仮想の潜熱（水分）容量を室内空気に付与し，吸放湿の影響を擬似的に考慮している[1)]。

壁体の吸放湿については実用的な計算法がいくつか提案されている[2)-6)]。これらは絶対湿度をポテンシャルとした，線形あるいは非線形の熱・水分複合移動方程式を基礎とし，解析的な方法[2),3)]，あるいは数値解析[4)-6)]によって壁体内部の湿気移動まで考慮している。しかし，これらの計算法を先述の室温変動熱負荷シミュレーションに直ちに適用することは困難である。

そこで筆者らは既報[7)]において，既存の室温変動熱負荷シミュレーションへの付加を考慮し，室内空気温度および室内表面温度を既知として，室内表面の吸放湿量を算定する簡易計算法を提案した。提案した計算法は，その目的から蒸気拡散支配（Hygroscopic）域のみを対象とし，以下の条件下で検討した。

- 壁体表面近傍に一定の厚みの層（以下，水分容量層と称する）を仮定
- 壁体内部から水分容量層への水分移動（貫流水分）は無視
- 水分容量層内の含水率変動は壁体表面と室内空気の水分ポテンシャル差に起因する水分伝達のみを考慮
- 壁体表面における潜熱移動は無視

水分ポテンシャルを湿流の駆動力とする熱・水分複合移動方程式[8)]を用いた詳細計算により上記の条件の妥当性を示した上で，後述する簡易計算法を提案した。また，計算時間間隔が1時間の簡易計算法と5分間の詳細計算，両者による室内吸放湿量の計算結果を比較す

*1　エネルギー環境共生工学部門
*2　京都府立大学人間環境学部

ることで計算時間間隔1時間においても簡易計算法は十分な精度を有することを明らかにした。

熱・水分複合移動方程式は，既往の研究により実測および実験による測定値との比較が行われ，モデルの妥当性が十分に確認されている。しかし，既報の数値計算による簡易計算法の精度の検証は，壁体単位の比較にすぎず，室内湿度予測において計算上の不整合が生じないか，簡易法の計算精度が実用上問題ないかを確認する上で，測定値との比較は欠かせない。そこで本報では，提案した簡易法を用いた壁体吸放湿を考慮した室内湿度変動モデルとその計算方法について述べる。また，調湿建材を設置した実大模型家屋内の湿度変動を測定し，その結果と簡易法による計算結果の比較により，簡易法の実用性について検討する。調湿建材には「繊維混入珪酸カルシウム板（バーミキュライト入り）」（以下，バーミキュライト建材と称す）を使用する。

2. 壁体吸放湿を考慮した室内湿度計算

2.1 壁体表面での水分収支

壁体吸放湿計算では湿流の駆動力として水分ポテンシャル[8]を用いる。水分ポテンシャルμ_wは水蒸気1kgのもつGibbsの自由エネルギーであり，絶対温度Tと水蒸気分圧p_vの関数である。また，飽和水分ポテンシャルμ^o_wと不飽和水分ポテンシャルμの和として表される。水分ポテンシャルの定義を式(1)～式(3)に示す。

$$\mu_w(T,p) = \mu_w^0(T) + \mu(T,p) \tag{1}$$

$$\mu_w^o(T) = h_0 + s_0 T + c_{p,v}(T - T_0) + T c_{p,v} \ln\frac{T}{T_0} + R_v T \ln\frac{p_s}{p_0} \tag{2}$$

$$\mu(T,p) = R_v T \ln\frac{p_v}{p_s} \tag{3}$$

飽和水分ポテンシャルは0°C，1気圧において，温度Tの飽和水蒸気が持つ単位重量当たりのエネルギーである。$c_{p,v}$は水蒸気の比熱，R_vは水蒸気1kg当たりのガス定数，p_sは温度Tにおける飽和水蒸気圧である。基準圧力p_0は大気圧（1.01325×10^{5}Pa），基準温度T_0は273.15Kである。気相水分のみを対象としているので，基準エントロピーs_0は0 J/(kg·K)とでき，このときの不飽和水分ポテンシャルを0 J/kgとすれば，基準エンタルピーh_0は6.44234×10^{5}J/kgとなる。不飽和水分ポテンシャルは飽和水分ポテンシャルを基準としたときの湿り空気中の水蒸気が持つ単位重量当たりのエネルギーであり，負の値を持つ。

1章で述べた条件をもとに，熱・水分複合移動方程式を簡易化すると，熱伝導および気相水分伝導の基礎式は式(4)および式(5)で表される。式(5)のLは水分容量層の厚みを表す。また，境界条件は式(6)および式(7)である。

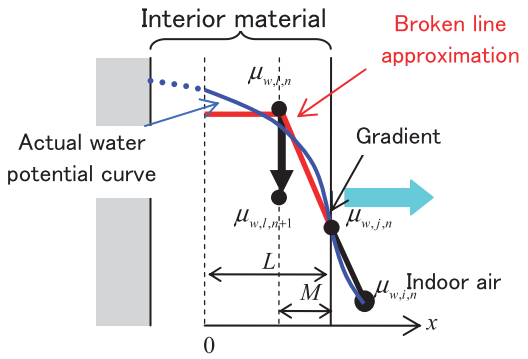

Fig. 1 Schematic diagram of proposed method

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{4}$$

$$L\gamma_{lw}\frac{\partial\phi}{\partial\mu}\frac{\partial\mu}{\partial t} = \lambda'_\mu\frac{\partial\mu_w}{\partial x} \tag{5}$$

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_c(T_i - T_j) + q_r \tag{6}$$

$$-\lambda'\frac{\partial\mu_w}{\partial x} = \alpha'_\mu(\mu_{w,i} - \mu_{w,j}) \tag{7}$$

ここで，c，ρ，λ，λ'_μはそれぞれ固体材料の比熱，密度，熱伝導率，水分ポテンシャル基準の気相水分伝導率である。γ_{lw}は液水の比重である。ϕは固体材料の容積基準質量含水率（以下，容積含水率）で$\partial\phi/\partial\mu$は水分容量と呼ばれる。α_cは対流熱伝達率，α'_μは水分ポテンシャル基準の水分伝達率である。T_i，$\mu_{w,i}$は空気，T_j，$\mu_{w,j}$は固体材料表面の温度および水分ポテンシャルである。

Fig. 1に壁体吸放湿の簡易計算法の概要を示す。吸放湿は壁体表面近傍の水分容量層と室内空気間の水分伝達によって生じるとする。このとき水分容量層内には水分ポテンシャル分布（含水率分布）があり，これを水分ポテンシャル分布が均一な範囲と勾配を有する範囲に二分し，折れ線で近似する。壁体表面から2本の直線の交点までの距離を変曲点の位置Mとし，この層内の水分ポテンシャル勾配をkとすると，水分容量層内の水分ポテンシャル分布は式(8)で表される。また，室内空気iと内装材表面jの境界条件は式(7)より式(9)となる。

$$\begin{cases} \mu_w(x) = \mu_{w,l} & (0 \le x < L - M) \\ \mu_w(x) = \mu_{w,l} + k(x - L + M) & (L - M \le x \le L) \end{cases} \tag{8}$$

$$-\lambda'_{\mu}\left.\frac{\partial \mu_w}{\partial x}\right|_{x=L} = \lambda'_{\mu,j}k = \alpha'_{\mu,j}(\mu_{w,i} - \mu_{w,j}) \tag{9}$$

式(8)および式(9)からkを消去してμ_{wj}を求め，式(5)に代入すれば，式(10)が得られる。これが簡易法の基礎式である。

$$L_j\gamma_{lw}\frac{\partial \phi_j}{\partial \mu_j}\frac{\partial \mu_j}{\partial t} = \frac{1}{\dfrac{M_j}{\lambda'_{\mu,j}} + \dfrac{1}{\alpha'_{\mu,j}}}(\mu_{w,i} - \mu_{w,l}) \tag{10}$$

水分容量層厚さLおよび変曲点の位置Mは，前報の数値実験の結果より内装材の物性値との関係，式(11)および式(12)で与える[7]。

$$L = 335.0\left\{\lambda'_{\mu}\Big/\left(\frac{\partial \phi}{\partial \mu}\right)\right\}^{0.53} \tag{11}$$

$$M = 234.0\left\{\lambda'_{\mu}\Big/\left(\frac{\partial \phi}{\partial \mu}\right)\right\}^{0.55} \tag{12}$$

2.2 室内空気の水分収支

室内空気の瞬時一様拡散性を仮定する。室内空気の水分収支は，室iの絶対湿度をX_iとすれば，X_iに関する一階常微分方程式として，式(13)で表される。

$$\rho_i V_i \frac{dX_i}{dt} = \sum_{ij=1}^{I} G_{ij}(X_{ij} - X_i) + G_o(X_o - X_i) + W_i + G_{ac,i}(X_{ac} - X_i) + \sum_{j=1}^{J} SP_j S_j \tag{13}$$

第1項，第2項は室iの隣室ijや外気oとの換気による水蒸気移動量，第3項は室iでの室内水蒸気発生量，第4項は冷房機による除湿量，第5項は室内表面jにおける吸放湿量を表す。ρ_iは室iの乾き空気の密度，V_iは室iの容積，G_{ij}およびG_oは隣室ijや外気から流入する空気の重量流量，W_iは室内水蒸気発生量，$G_{ac,i}$は室iに設置された冷房機吹出空気の重量流量，SP_jおよびS_jは室内表面jの単位表面積あたりの吸放湿量および表面積である。前節の計算方法を用いれば，SP_jは次式となる。

$$SP_j = \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha'_j} + \dfrac{M_j}{\lambda'_j}}(\mu_{w,l,j} - \mu_{w,i}) \tag{14}$$

式(14)を式(13)に代入すると，水分ポテンシャルと絶対湿度の関係が非線形なので式(13)は非線形方程式である。従って，反復計算により解を得なければならない。

室内絶対湿度X_iを一旦既知量として，室iに存在し吸放湿が発生する全ての表面において式(10)を解き，水分容量層内の水分ポテンシャル$\mu_{w,l,j}$を求め，式(14)より吸放湿量SP_jを算出する。そして，式(13)より室内絶対湿度X_iの計算し，得られたX_iから再度壁体吸放湿SP_jを求めるという繰り返し計算を行う。繰り返し計算の収束条件は室内湿度X_iの変動量が十分小さくなるまでとする。

3. 実験の概要

3.1 実験設備と測定の概要

実験は福岡県春日市にある九州大学筑紫キャンパスF棟屋上に設置された外壁性能試験用の模型家屋で行った。模型家屋の平面図をFig. 2に示す。模型家屋は居室，前室，機械室の3室で構成されている。室容積は，居室が8.1m^3，前室が17.2m^3，機械室が5m^{3}である。居室部外壁の一部（幅:1800mm，高さ:2000mm）が脱着可能で，そこに性能試験対象の外壁を設置する。他の外壁はウレタンサンドイッチパネル（厚さ100mm），屋根部は波形ウレタンサンドイッチパネル（厚さ100mm凸部15mm）である。また，居室と前室の隔壁はアルミハニカムパネル（厚さ42mm）である。したがって，模型家屋の居室部外壁以外の壁体表面では，吸放湿は生じない。実験では，居室外壁に室内側から

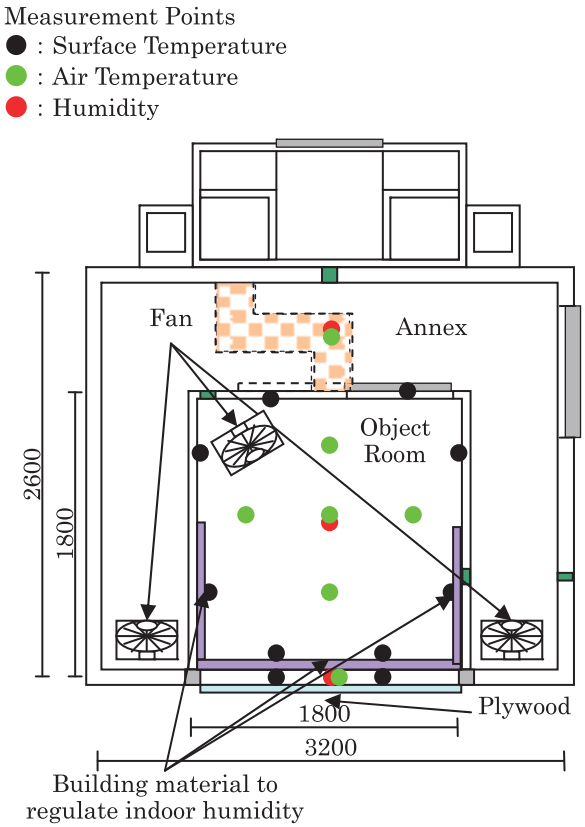

Fig. 2 Plan of test house

バーミキュライト建材（厚さ6mm），非密閉中空層，合板（厚さ12mm），防水シートで構成された外壁を取り付けた。居室と前室は機械室に設置された空調により温湿度制御が可能である。両室の空調は別系統になっており，各個に温湿度設定できる。居室は天井ルーバー吹出，前室はソックダクト吹出で，ともに床下がリターンチャンバになっている。

外壁のバーミキュライトは室内側と中空層側で吸放湿が発生する。さらに吸放湿量を大きくするために，居室内壁にバーミキュライト建材（幅:900mm，高さ:1800，厚さ:6mm）を付設した。居室内壁に付設したバーミキュライト建材は内壁に立て掛けて固定しているだけであるので，内壁側と空間側の両面で吸放湿が発生する。居室空気に接するバーミキュライト建材の表面積は合計で10.08m^{2}である。

Fig. 2に主な測定点を示す。温度はCC熱電対，相対湿度は静電容量式薄膜湿度計（VISALA社製）を使用した。室内空気温度は，居室が鉛直方向に3点，水平方向に5点，前室，機械室が各1点，外壁中空層に1点で測定した。また，壁体表面温度は天井と床面が各4点，その他の壁は上下方向3点，水平方向2点の計6点，外壁および隔壁に付設したバーミキュライト建材は上下に2点を測定した。相対湿度は居室，前室，機械室，外壁中空層の中央に各1点を測定した。測定時間間隔は1分間で，測定期間は5日間とした。

模型家屋の空調は使用せず，室内には水蒸気発生するようなものは存在しない。したがって，居室内の湿度変動に関する要因は，前室と外気（外壁中空層）からの換気による水蒸気移動，バーミキュライト建材の吸放湿によるものだけである。ただし，換気による水蒸気移動量が多いと，実験結果から壁体吸放湿の影響が確認できなくなる恐れがあるため，居室のドア周りや空調の吹出口や吸込口などを防湿シートやテープで塞ぎ，居室への水蒸気の流入量ができるだけ少なくなるようした。実験後に，トレーサガスを用いて濃度減衰法[9]により換気量を測定したところ，換気回数は0.07回/h（換気量0.567m^3/h）であった。換気量測定時には前室のドアを開放して，居室は全て外気に接するとした。

3.2 調湿建材の湿気物性値

バーミキュライト建材の気相水分伝導率および平衡含水率を図に示す。湿気物性値を測定した試料は，実験で重量測定に用いたバーミキュライト建材と同じ材から切り出した物である。気相水分伝導率はカップ法[10]と同じ原理により測定できる[8]。2個の試料の平均値2.473×10^{-13} kg/(m·s·(J/kg)))を用いる。

Fig. 4に窒素ガス吸着法[11]により得られたバーミキュライト建材の細孔径分布を示す。Fig. 3に細孔径分布から計算した容積基準容積含水率と不飽和水分ポテンシャルの関係（$\phi-\mu$ 関係）を示す。液水が細孔半径の小さい毛細管から保水されると仮定すると，ある状態の体積含水量は0からある細孔半径rまでの空隙容積$v\ (r)$の積算値で表される。このとき，容積含水率ϕは，式(15)により求められる。また，不飽和水分ポテンシャルは式(16)に示すKelvin式[11]から求める。

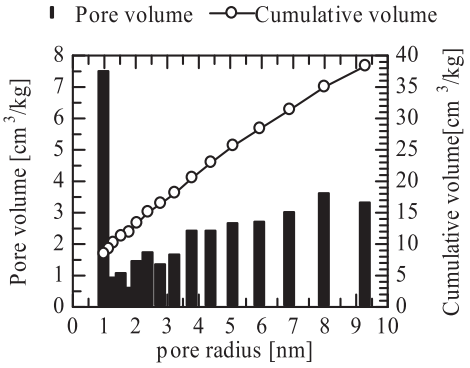

Fig. 4 Pores distribution

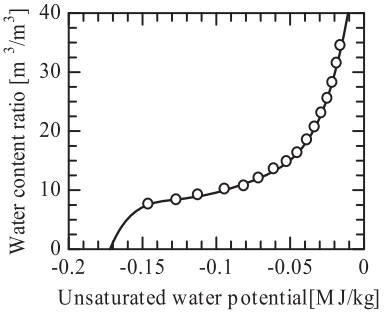

Fig. 3 Relation of water content ratio and unsaturated water potential

$$\phi = \rho_0 \rho_{lw} \int_0^r v(r)dr \tag{15}$$

$$\mu = R_v T \ln\left(\frac{p_v}{p_s}\right) = -\frac{2\sigma_{lw}}{r\rho_{lw}} \cos\theta_{lw} \tag{16}$$

ここで，ρ_0は絶乾時の材料密度，ρ_{lw}，σ_{lw}，θ_{lw}は液水の密度，表面張力，メニスカスの接触角である。容積含水率ϕと不飽和水分ポテンシャルμは，ともに細孔半径rから算出されるので，$\phi-\mu$ 関係は一意に決まる。水分容量$\partial\phi/\partial\mu$は得られた$\phi-\mu$ 関係の接線の勾配として表される。

簡易計算法では水分伝導率と水分容量から式(11)および式(12)を用いて，水分容量層および水分伝導層の厚さLおよびMを決定する。

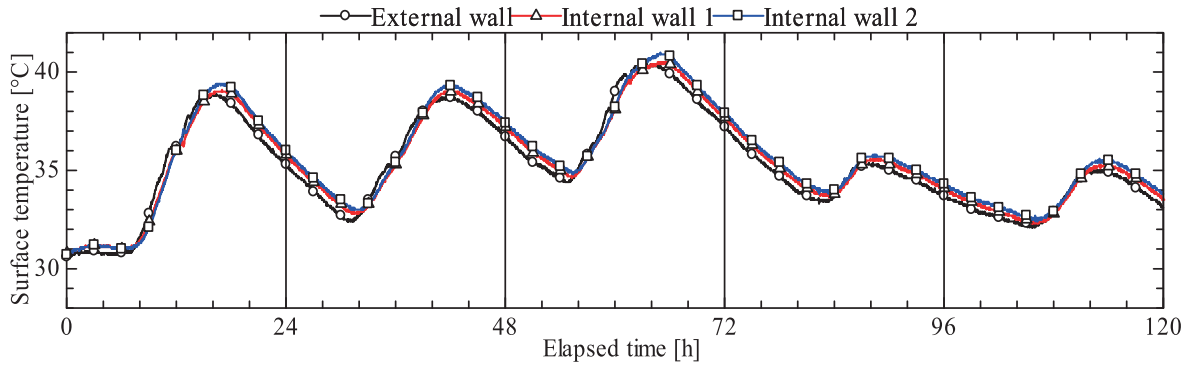

Fig. 5 Transition of surface temperature of building material to regulate indoor humidity

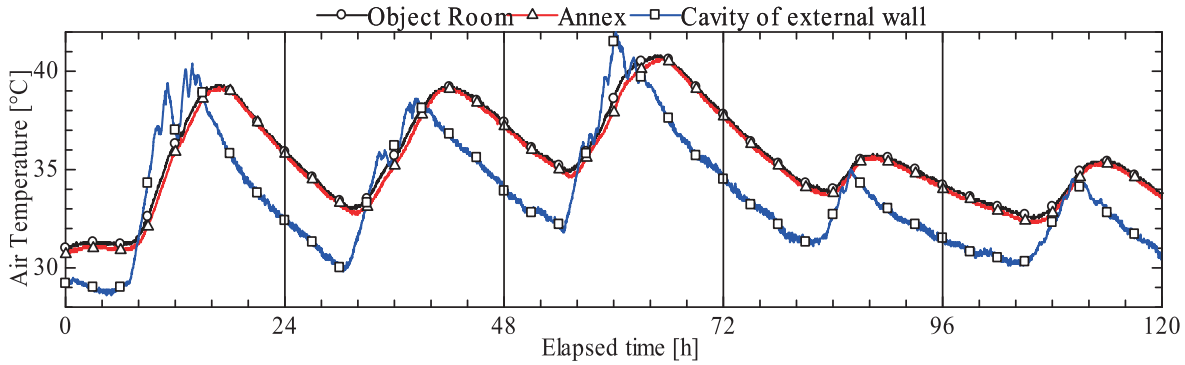

Fig. 6 Transition of room air temperature

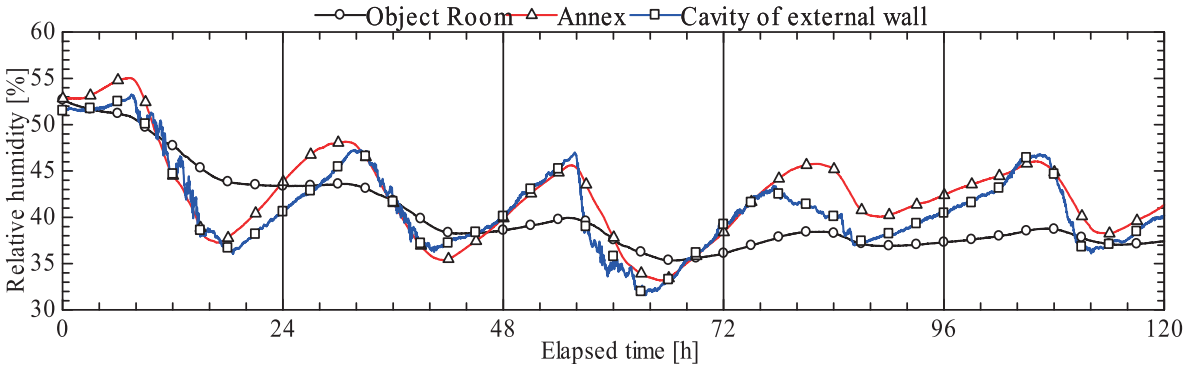

Fig. 7 Transition of relative humidity

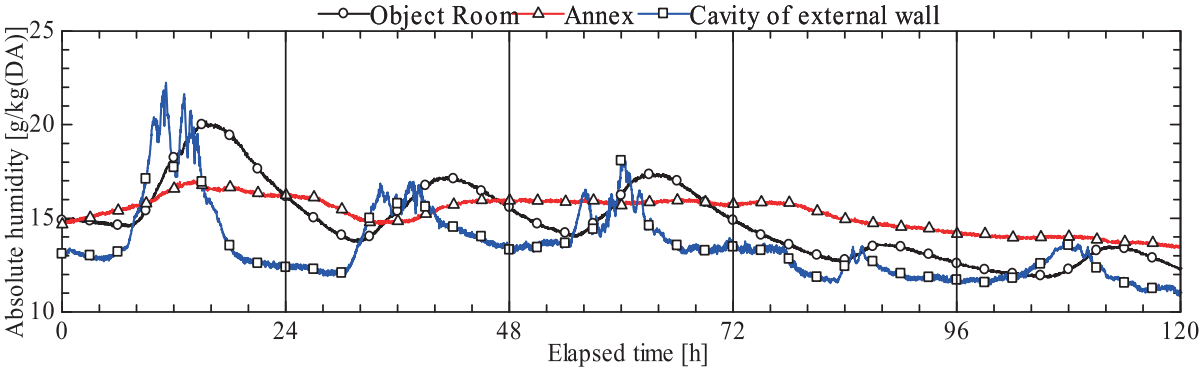

Fig. 8 Transition of absolute humidity

4. 実験結果

Fig. 5にバーミキュライト建材の居室内側表面温度を示す。また，居室，前室，外壁中空層の空気温度変動をFig. 6, 相対湿度変動をFig. 7, 絶対湿度変動をFig. 8に示す。Fig. 6の居室内空気温度は計測した7点の平均値である。計測期間中の空気温度分布の標準偏差の最大値は0.216°Cであり，居室内空気は十分に攪拌されている。居室及び前室の空気温度変動はほぼ一致しており，1日の変動幅は概ね4～10°Cである。Fig. 7の相対湿度変動では，前室が8～20%の幅で大きく変動し

ているのに対して，居室は2～9%とその変動は緩やかである。逆にFig. 8の絶対湿度変動では，居室の変動が大きく2～6g/kg(DA)なのに対して，前室はほとんど変動せず最大でも2g/kg(DA)の変動幅でしかない。居室と前室の室内空気温度変動はほとんど一致しているにも拘わらず，湿度変動には大きな差が生じている。前室の絶対湿度変動が非常に小さいことから前室の換気量は小さいと推測できる。また，前室の内装はアルミでできているため吸放湿しないのに対し，居室には調湿建材であるバーミキュライトを設置している。従って，居室と前室の湿度変動の差異は，バーミキュライト建材の調湿効果によるものと考えられる。

5. 簡易計算法の精度の検証

5.1 計算条件

室内湿度変動モデルへの入力は，居室の空気温度，バーミキュライト建材の表面温度，前室および外壁中空層の相対湿度，居室の換気量の測定値である。出力は，居室の湿度，バーミキュライト建材表面の含水率である。換気による水蒸気移動は居室と前室，居室と外壁中空層の2経路が存在するため，測定した換気量の半分が前室から，残りが外壁中空層から流入すると仮定した。水分伝達率は対流熱伝達率α_cを5W/(m²·K)として，式(17)のLewisの関係より絶対湿度基準の水分伝達率α'_Xを求め，式(18)により水分ポテンシャル基準の水分伝達率α'に変換して求める。

$$\alpha'_X = \frac{\alpha_c}{c_{p,m}} \tag{17}$$

$$\alpha' = \alpha'_X \frac{\partial X}{\partial \mu} = \alpha'_X \frac{\partial X}{\partial p}\frac{\partial p}{\partial \mu} = \alpha'_X \left\{ \frac{\frac{m_v}{m_a} R_v T}{X\left(X + \frac{m_v}{m_a}\right)} \right\} \tag{18}$$

ここで，$c_{p,m}$は湿り空気の比熱，m_vは水の分子量，m_aは空気の平均分子量である。

計算時間間隔は測定と同じ1分間とし，2章の室内湿度変動モデルをそのまま適用（壁体吸放湿を考慮）した場合と，壁体吸放湿（式(13)の第5項）を無視した場合の計算を行う。また，壁体吸放湿を考慮した場合に，年間のエネルギー消費量算定でよく用いられる1時間とした場合も計算する。

2章の室内湿度変動モデルをそのまま適用した場合，バーミキュライト建材表面の含水率の初期値は，計算時間間隔を1分としたときに計算開始1時間の水分ポテンシャル変動が，測定から得られた居室空気の水分ポテンシャルと最もよく一致する値をトライアンドエラーによって設定した。その時の相対湿度は52.5%である。

5.2 測定値と計算値の比較

Fig. 9，Fig. 10に居室，外壁中空層，前室の測定値，壁体吸放湿を考慮した場合と，無視した場合の計算結果を示す。凡例の括弧内は計算時間間隔を示す。Fig. 9は絶対湿度変動，Fig. 10は相対湿度変動である。壁体の吸放湿を無視し，換気による水蒸気移動のみによって居室の湿度変動を予測した場合，その絶対湿度はほとんど変化しない。5日間で13～16g/kg(DA)の範囲で変化し，1日の変動幅は最大でも1g/kg(DA)程度である。一方，壁体吸放湿を考慮した場合，無視した場合に比べ居室空気の絶対湿度変動は大きくなる。1日の変動幅は1～5g/kg(DA)であり，測定値よりも若干狭い。計算値の絶対湿度は測定値よりも全体的に高いが，その差は最大でも1.1g/kg(DA)程度である。このとき相対湿度差は3.4%RHであり，提案した壁体吸放湿の簡易計算法を用いれば室単位の計算においても実用的な誤差範囲の予測結果が得られる。

壁体吸放湿を考慮した計算において，計算時間間隔を1分とした場合と1時間とした場合では計算結果にほとんど差は見られない。計算時間間隔を1時間とした場合，吸湿量，放湿量が共に小さいが，1分間隔の場合よりも絶対湿度で0.2g/kg(DA)程度の差が生じているのみである。提案する壁体吸放湿量の簡易計算法は計算時間間隔によらず，ほぼ一定の出力を示す。

6. 結　　言

本論文は，前報で提案した壁体吸放湿の簡易計算法を用いた室内湿度変動モデルとその計算方法について述べた。また，調湿建材を設置した実大模型家屋内の湿度変動を測定した。模型家屋に室内湿度変動モデルを適用し，測定値と計算値の比較によりその計算精度を確認した。

室内空気の瞬時一様拡散性を仮定すれば，室内湿度変動は絶対湿度の一階常微分方程式として表される。このとき，壁体の吸放湿量の算定方法として前報で提案した水分ポテンシャルを駆動力とする壁体吸放湿の簡易計算法を適用すれば，水分ポテンシャルと絶対湿度が非線形関係であるため，室内湿度系は非線形方程式として表される。したがって，壁体と空気の繰り返し計算によって解を求める必要がある。

実大模型家屋の居室にバーミキュライト建材を設置し，十分に密閉した環境（換気回数0.07回/h）非空調時の室内湿度変動測定を行った。温湿度変動が同一挙動を示す模型家屋の居室と前室の絶対湿度変動は，室内表面がバーミキュライト建材の居室では大きく，壁体表面が金属製の前室では少なかった。このことから居室の湿度変動がバーミキュライト建材の吸放湿効果によるものが支配的であることが確認できた。

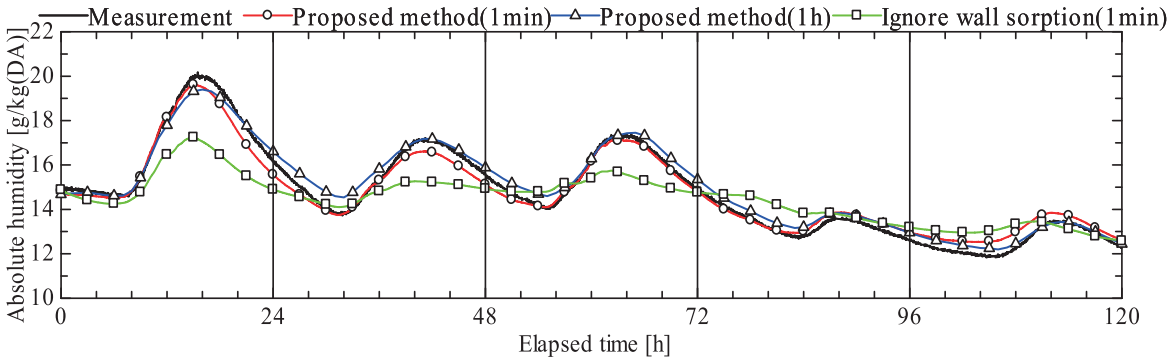

Fig. 10 Comparison of measured and calculated absolute humidity

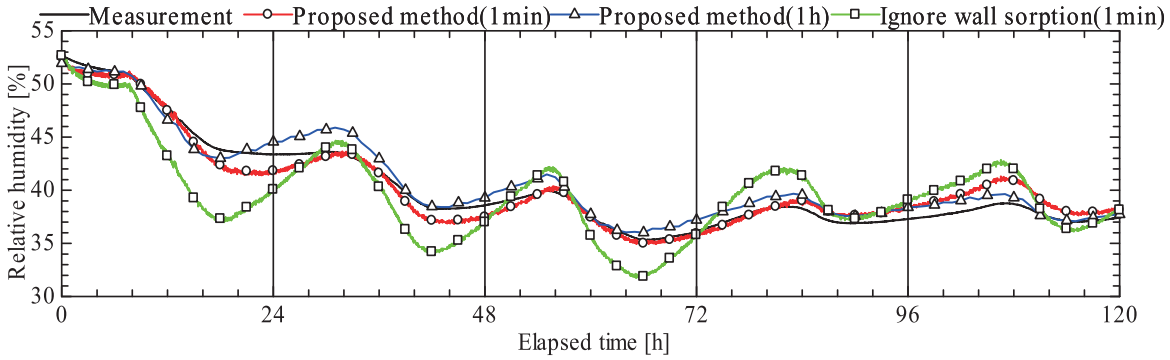

Fig. 9 Comparison of measured and calculated relative humidity

室内湿度変動モデルを上記の吸放湿実験に適用し，測定値と計算値を比較した。また，壁体吸放湿を無視して室内湿度の変動要因として換気による水蒸気移動のみを考慮した計算結果とも比較した。壁体吸放湿を考慮した場合の計算値は測定値と良く一致しており，提案した壁体吸放湿の簡易計算法が室単位の計算においても実用に耐えうることを確認できた。5日間の測定期間中で絶対湿度の最大誤差は1.1g/kg(DA)であっり，このときの相対湿度差は3.4%RHであった。吸湿量が実際よりも少なく見積もられており，最大誤差は室内湿度低下時に発生した。

壁体吸放湿の簡易法を用いた計算で，実験の測定時間間隔に合わせ計算時間間隔を1分とした場合，通常年間の熱負荷シミュレーションで用いられる1時間とした場合の計算結果を比較した。両者の計算結果に違いはほとんど見られず，最大誤差は0.2g/kg(DA)程度であった。提案した壁体吸放湿の簡易計算法は計算時間間隔の影響による計算結果に大きな違いが生じない。

謝　　辞

本研究費の一部は，21世紀COEプログラム「循環型住空間システムの構築」（拠点リーダー：川瀬博，九州大学大学院教授）の若手研究者助成によるものである。ここに記して感謝の意を表す。

参 考 文 献

1) 例えば，SMASH for Windows（住宅用熱負荷計算プログラム）ユーザーマニュアル：財団法人　建築環境・省エネルギー機構，pp.107，1999
2) 松尾陽，永田明寛：吸放湿を考慮した熱負荷計算法，第21回熱シンポジウム，pp.55-64，1991.8
3) 吉田治典，寺井俊夫，末吉弘明：多層壁の熱・水分同時移動における三角波応答の離散フーリエ変換による計算法，空気調和・衛生工学会論文集 No.46，pp.21～30，1991.6
4) 宿谷昌則，斉藤正文：熱・水分容量質点系モデルを用いた室内温湿度の簡易シミュレーション，日本建築学会学術講演梗概集，pp.921-922，1987.10
5) 芝池英樹，松本衛：境界要素法による多層平面壁の非定常熱・湿気性状の解析とその非線形性の検討，日本建築学会計画系論文報告集　No.366，pp22～32，1986.8
6) 土屋喬雄：戸建て住宅の換気と室内温湿度，空気調和・衛生工学，Vol.54 No.11，pp.13-19，1980.11
7) 細川隆行，林徹夫，尾崎明仁，小島昌一，野村幸司：水分ポテンシャルに基づく壁体内表面における吸放湿の簡易計算法の提案　多数室温湿度計算への適用を目的とした室内表面の吸放湿計算モデル　その2，日本建築学会環境系論文集，No.573，pp.47-53，2003
8) Akihito Ozaki, Toshiyuki Watanabe, Tetsuo Hayashi and Yuji Ryu : Systematic analysis on combined heat and water transfer through porous materials based on thermodynamic energy, Energy and Buildings, Volume 33, Issue 4, pp. 341-350, April 2001
9) 空気調和衛生工学会規格：SHASE-S 116-2003 トレーサガスを用いた単一空間の換気量測定法，2003年
10) JIS A 1324：建築材料の透湿性測定方法，1995年
11) 例えば，近藤精一，石川達雄，阿部郁夫：吸着の化学 第2版，丸善，2001