

吸放湿材によるパッシブ調湿を利用したハイブリッド空調の
調湿効果と空調負荷に及ぼす外界気象の影響に関する研究

正会員 ○郡司 泰将*1
同 岸本 嘉彦*2
同 銚井 修一*3

4.環境工学-9.湿気

吸放湿材、調湿効果、空調負荷、外界気象、簡易予測式

1. はじめに

一般に冷房運転の制御対象は室内温度であり、吸放湿材の調湿効果を利用すれば、成り行きで変動する室内湿度を快適範囲内に保持できる可能性がある。しかし、壁体が吸放湿する際には室内温度にも影響を及ぼすため、空調負荷の観点から見れば、必ずしも吸放湿材が有利に働くとは限らない。また、COPの時間変化を考慮して、壁体の吸放湿性が調湿効果と空調負荷に及ぼす影響を併せて検討した研究はほとんどない¹⁾。

また、室内温湿度および空調負荷は外界気象や空調時間などの要因により変化する。地域による相対比較を目的とする場合、温湿度や負荷の平均値を予測できれば十分な場合が多い。

そこで本研究では、空調機(アクティブ)と吸放湿材(パッシブ)を併用した空調システム(ハイブリッド空調)を適用した際の調湿効果と空調負荷に及ぼす外界気象の影響を明らかにすることを目的とし、COPの時間変化を考慮可能な解析モデル²⁾を用いた数値計算により検討を行う。また、外界気象要素および空調時間を入力とし、室内温湿度、空調負荷の周期平均値を簡易に予測する手法についても検討する。

2. 解析モデル

2.1 基礎式

壁体内における熱と水分の移動は、式(1)および式(2)に示す蒸気拡散支配の熱水分同時移動方程式により与えられるとする。

$$(c\rho + Rv) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + R\kappa \frac{\partial X}{\partial t} \quad (1)$$

$$(c'\rho + \kappa) \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda' \frac{\partial X}{\partial x} \right) + v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

室の熱および水分の収支は式(3)および式(4)により与えられる。

$$c_a \rho_a V \frac{\partial T_r}{\partial t} = \sum \alpha_i S_i (T_{si} - T_r) + c_a \rho_a n V (T_o - T_r) + Q_r(t) \quad (3)$$

$$\rho_a V \frac{\partial X_r}{\partial t} = \sum \alpha'_i S_i (X_{si} - X_r) + \rho_a n V (X_o - X_r) + M_r(t) \quad (4)$$

空調の解析モデルは、北原の提案したモデル²⁾を用いた。すなわち、エアコンのカタログ値のみから空調特性を決定し、空調運転時は吹出風量を固定、負荷に応じて冷媒温度を変化させるモデルである。

2.2 解析対象および計算条件

対象住宅の平面図を図1に示す。解析対象は集合住宅の中間階に位置する一戸を一室と簡略化し用いた。居住者は成人男性2人と成人女性2人の計4人とした。生活パターンは、6~24時の間、常に4人在室する休日と、8~18時の間のみ在室者が女性1人となる平日の2パターンとし、1週間の周期

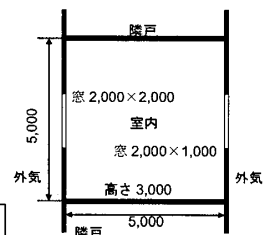


図1 検討対象住宅

表1 熱水分発生量

在室人数	発熱量			水蒸気発生量	
	人体	照明	計	人体	計
男性2名	60W×2	200W	416W	120g/h×2	420g/h
女性2名	48W×2			90g/h×2	
女性1名	48W×1	100W	148W	90g/h×1	90g/h

表2 材料物性

材料名	密度ρ [kg/m³]	空隙率c' [m³/m³]	比熱c [J/kgK]	熱伝導率λ [W/mK]	湿気伝導率λ' [kg/mh(kg/kg)']	κ [kg/m³(kg/kg)']	v [kg/m³K]
コンクリート	2200	0.05	840	1.89	0.0029	6948	5.76
軟質繊維板	240	0.7	1298	0.064	0.0177	8148	3.33

表3 外界気象条件

検討項目	平均温度 [°C]	平均絶対湿度 [g/kg]	温度振幅 [°C]	絶対湿度振幅 [g/kg]
	平均温度	27, 28, 29	17.3	±2.75
平均絶対湿度	28	16.9, 17.3, 17.7	0	±0.35
温度振幅	27, 29	17.3	±1.85, ±3.25	0
絶対湿度振幅	28	15.9, 20.0	0	±0.15, ±0.6

A Study on Influence of Outdoor Climate on Moisture Control and Energy Consumption under Combination Use of Active and Passive Hygroscopic Air-Conditioning in Residences

GUNJI Yasumasa et al.

内に休日(1日)と平日(6日)の2パターンを繰り返すと想定した。在室人数別の熱水分発生量を表1に示す。

計算に用いた材料の物性値を表2に示す。壁体構成は、コンクリート150[mm]の室内側に軟質繊維板10[mm]を貼付した構成とした。壁体の吸放湿の有無は、室内側湿気伝達率を変化させることにより考慮した。すなわち、吸放湿を考慮しない場合は0.0[kg/m²h(kg/kg')], 考慮する場合は15.2[kg/m²h(kg/kg')]とした。

空調の冷房運転は温度制御のみを行い、設定温度を27[°C]とした。空調を運転する時間帯は、平日、休日ともに6~24時の間とした。計算には前進型有限差分法を用いた。

外界気象の影響の検討には、次世代省エネルギー基準のIV地域以南から選出した6都市(名古屋、高松、大阪、福岡、鹿児島、那覇)の拡張アメダス気象データに基づき検討に用いる外界気象データを作成した。まず、気象要素から4要素(平均温度、平均絶対湿度、温度振幅、絶対湿度振幅)を選出し、各要素を単独に変化させることで、それぞれが調湿効果と空調負荷に及ぼす影響を検討した。気象要素の設定値は、6都市の平均値、最大値、最小値に基づき設定した。検討する気象要素毎の設定した外界気象条件を表3に示す。

検討には周期的定常に達した週の結果を用いた。調湿効果の判断には、図2に示す調湿効果指標 E_{Hy} を提案し、それを用いた。

3. 外界気象の影響についての検討

3.1 調湿効果に及ぼす影響

吸放湿を考慮しない場合に室内相対湿度変動のピークを示した時刻における調湿効果 E_{Hy} を、検討した外界気象要素別に表4に示す。表4より、今回選定した外界気象の変動範囲においては、平均外気温の影響が最も大きい結果となった。これは、絶対湿度を固定したまま平均外気温を低下させると、相対湿度の変動が増大し、その結果、吸放湿量が増加したためと考えられる。

平均外気温のみを変化させた場合の室内相対湿度の時間変化を平均外気温別図3に示す。図3より、平均温度によらず、吸放湿考慮により相対湿度の日変動振幅を±5[%]から±1.5[%]程度まで抑制できていることがわかる。

3.2 空調負荷に及ぼす影響

ここでは、4つの気象要素のうち、想定される外界気象の変動範囲において、空調負荷に及ぼす

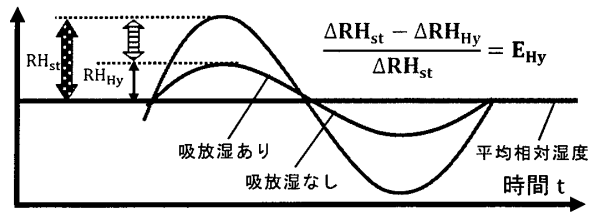


図2 相対湿度変動を用いた調湿効果の判断方法

表4 気象要素別調湿効果 E_{Hy}

平均外気温	27°C	28°C	29°C	
	0.86	0.78	0.71	
平均外気絶対湿度	16.9g/kg'	17.3g/kg'	17.7g/kg'	
	0.79	0.77	0.74	
外気温度振幅	27°C		29°C	
	±1.85°C	±3.25°C	±1.85°C	±3.25°C
	0.87	0.89	0.74	0.77
外気絶対湿度振幅	15.9g/kg'		20.0g/kg'	
	±0.15g/kg'	±0.6g/kg'	±0.15g/kg'	±0.6g/kg'
	0.79	0.80	0.77	0.78

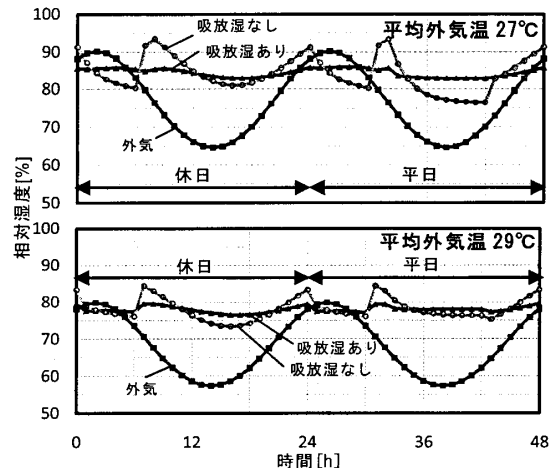


図3 室内相対湿度の時間変化

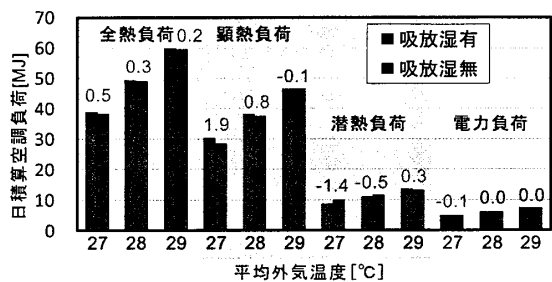


図4 平均外気温ごとの日積算空調負荷

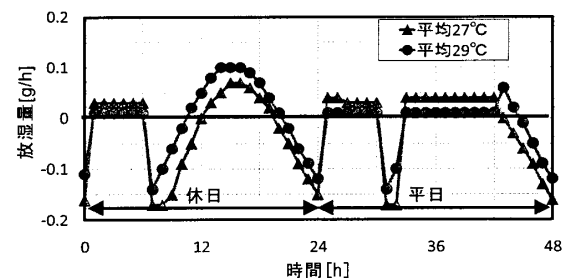


図5 平均外気温ごとの放湿量

影響が最大となった平均外気温度について示す。検討した平均外気温度毎の日積算顕熱、潜熱、全熱および電力負荷を吸放湿考慮による変化量[MJ]とともに図4に、壁体からの放湿量の時間変化を図5に示す。

図4より、吸放湿考慮による負荷の変化に着目すると、平均外気温度が高くなるほど、顕熱負荷の増加量が減少し、反対に潜熱負荷の増加量は増加している。これは、平均外気温度の上昇により空調が除去する水分量が増加し、図5からわかるように、それに伴い休日においては壁体からの放湿量が増加することによる。平日の放湿量は逆の傾向を示すが、在室者が少なく空調の水分除去量が増加しないことから、負荷は変化しない。また、平均外気温度が異なると、吸放湿考慮により顕熱および潜熱負荷は変化するが、全熱および電力負荷は1[%]程度しか変化しない。また他の気象要素の影響は、平均外気温度の影響よりも小さかったため、壁体の吸放湿を考慮しても、結果的に総空調負荷および電力負荷を変化させないと言える。

4. 簡易予測式の導出

4.1 平均室内温湿度

平均室内温度 $\overline{T_r(t)}$ [°C]および平均室内絶対湿度 $\overline{X_r(t)}$ [g/kg]の簡易式を導出するにあたり、まず式(5)および式(6)に示す熱および水分の非定常収支式を作成した。

$$C_a \gamma_a V \frac{dT_r(t)}{dt} = Q_r(t) - Q_w(t) + C_a \gamma_a V n (T_o(t) - T_r(t)) - C_a Q_{ac}(t) (1 - BF) (T_r(t) - T_{sat}) \quad (5)$$

$$\gamma_a V \frac{dX_r(t)}{dt} = M_r(t) - M_w(t) + \gamma_a V n (X_o(t) - X_r(t)) - Q_{ac}(t) (1 - BF) (X_r(t) - X_{sat}) \quad (6)$$

蒸発器温度 T_{sat} の算定には、次式に示す比例制御の式を用いた。

$$T_{sat} = T_{set, evp} - \beta (T_r(t) - T_{set}) \quad (7)$$

周期的定常状態下では、収支式を時間積分することにより、式中の時間関数を定数として扱うことが可能となる。これを利用し、平均室内温度および絶対湿度のみを未知数とする1次式を導出した。導出した簡易式を式(8)および式(9)に示す。

$$0 = \overline{Q_r(t)} - \overline{Q_w(t)} + C_a \gamma_a V n (\overline{T_o(t)} - \overline{T_r(t)}) - C_a \overline{Q_{ac}(t)} (1 - BF) \left\{ (1 + \beta) \overline{T_r(t)} - T_{set, evp} - \beta \overline{T_{set}} \right\} \quad (8)$$

$$0 = \overline{M_r(t)} - \overline{M_w(t)} + \gamma_a V n (\overline{X_o(t)} - \overline{X_r(t)}) - \overline{Q_{ac}(t)} (1 - BF) (\overline{X_r(t)} - X_{sat}) \quad (9)$$

4.2 空調負荷

顕熱負荷 $\overline{Q_{sh}(t)}$ [MJ]の簡易式については、室内温度 $\overline{T_r(t)}$ から蒸発器の温度 T_{sat} [°C]まで冷却した際の熱量の式²⁾を時間積分することにより、式(10)に示す1次式を導出した。

$$\overline{Q_{sh}} = \frac{C_a \overline{Q_{ac}(t)}}{(1 + \overline{X_r(t)})} (\overline{T_r(t)} - T_{sat}) \quad (10)$$

潜熱負荷 $\overline{Q_{lh}(t)}$ [MJ]の簡易式は、室内絶対湿度 $\overline{X_r(t)}$ の空気を蒸発器温度の飽和絶対湿度 X_{sat} [g/kg]まで除湿するために必要な熱量の式²⁾を時間積分することにより次式を導出した。

$$\overline{Q_{lh}} = \frac{R \overline{Q_{ac}(t)}}{(1 + \overline{X_r(t)})} (\overline{X_r(t)} - X_{sat}) \quad (11)$$

5. 簡易予測式の妥当性の検討

5.1 平均室内温湿度

簡易式に代入する外界気象データは、図6に示す6都市の1日周期の温湿度変動の平均値を用いた。各地域における1日周期の温度および絶対湿度変動の日平均値を表5に示す。

室内温湿度の絶対比較および簡易式の結果を後述の方法により補正した結果とともに図7に示す。

図7より、絶対値を比較すると、平均室内温度および平均室内絶対湿度ともに、簡易式の結果が数値計算の結果よりも値が高く、特に、平均絶対湿度に関しては最大で12[%]程度の誤差が生じた。これは、空調による加湿を数値計算においては想定していないが、簡易式では想定しているためと考えられる。

しかし、地域による変化量に着目すると、簡易式による結果と数値計算結果のグラフの形状は概ね一致しており、簡易式によって地域差を推定可能と言える。つまり、基準地域を設け、基準地域のみ为数値計算結果を用いることで、地域毎の絶対値も推定可能と考えられる。そこで、他の地域と基準地域における簡易式による結果の差を基準地域の数値計算結果に加えることで、簡易式による値の補正を行った。この室内温度の補正式を式

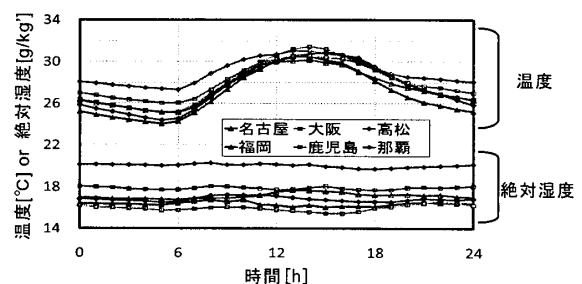


図6 各都市の室内温湿度変動

(12)に示す。

$$T_e = T_{p,b} - (T_{s,b} - T_s) \quad (12)$$

ここでは大阪を基準地域とし補正を行った。図7に示すように、補正により数値計算との誤差を、平均温度では0.4[%]、平均絶対湿度では4[%]以内に収めることができた。よって提案した簡易式により室内温湿度の地域差を、基準地域の数値計算結果と併用すれば絶対値も推定可能といえる。

5.2 空調負荷

日積算空調負荷の絶対比較および、簡易式の結果を前節の室内温湿度の場合と同様の方法により補正した結果を図8に示す。

図8より、絶対値では顕熱および潜熱負荷ともに簡易式の結果が数値計算の結果より低い値となり、最小でも10[%]程度の誤差が生じた。これは平均室内温湿度の簡易式の場合と同様、空調による加熱および加湿を数値計算においては想定していないが、簡易式による計算では想定しているためと考えられる。

一方、基準地域の数値計算結果を用いて簡易式の値を補正すると、最小で1[%]以内の誤差に収めることができた。

次に、空調時間を変化させた場合の検討として、空調時間を6、12、18、24[h]とした条件について、名古屋、大阪、那覇における顕熱負荷の絶対比較および簡易式の結果を補正した結果を図9に示す。

図9より、空調時間を変化させても、各空調時間における基準地域の数値計算結果を用いて補正を行えば、最小で1[%]以内の誤差で、絶対値の推定が可能である。図には示していないが、潜熱負荷でも同様のことが言えることから、提案した簡易式により全熱、顕熱、潜熱のいずれの空調負荷についても地域差を、さらに基準地域の数値計算結果を併用すれば絶対値も推定可能である。

6. まとめ

1) 外界気象要素の違いにより、吸放湿考慮による顕熱、潜熱負荷は変化するが、総空調負荷、電力負荷の変化は1[%]程度であった。よって、今回検討した解析条件においては、ハイブリッド空調により、総空調負荷および電力負荷を変化させることなく室内相対湿度変動の抑制が可能である。

表5 平均外気温湿度(7月~8月)

	名古屋	大阪	高松	福岡	鹿児島	那覇
平均室内温度[°C]	27.0	27.9	27.6	27.6	28.2	29.0
平均室内絶対湿度[g/kg]	19.8	19.5	20.3	20.6	21.3	23.4

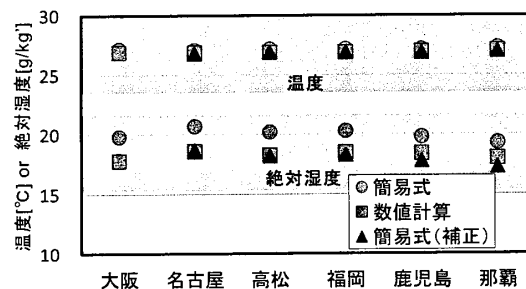


図7 平均室内温湿度

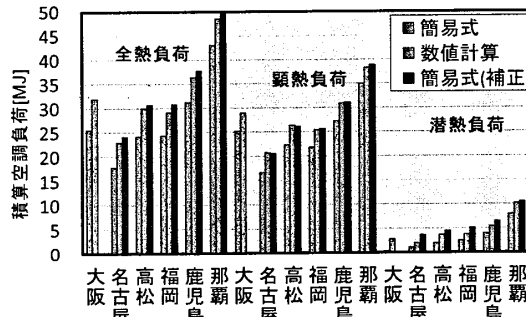


図8 日積算空調負荷

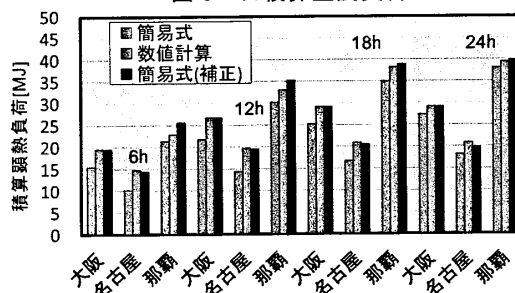


図9 空調時間ごとの日積算顕熱負荷

2) 提案した簡易予測式に外界気象および空調時間を入力することで、室内平均温湿度および空調負荷の地域差を予測でき、基準地域の数値計算結果を併用すれば1[%]程度の誤差範囲で絶対値も推定可能となる。

<記号>
 R:水の潜熱[J/kg], T:温度[°C], t:時間[s], κ:吸放湿特性値[kg/m³(kg/kg)], X:絶対湿度[g/kg], Y_a:空気密度[kg/m³], v:吸放湿特性値[kg/m³K], C_a:空気比熱[J/kgK], V:室の容積[m³], T_i:室内温度[°C], α:熱伝達率[W/m²K], S:壁の表面積[m²], T_w:壁体の室内側表面温度[°C], n:換気回数[1/h], T_e:外気温度[°C], Q_e(t):室内熱発生量[W], X_e:室内絶対湿度[kg/kg], α':湿気伝達率[kg/m²s(kg/kg)], X_w:壁体の室内側表面絶対湿度[kg/kg], X_e:外気絶対湿度[kg/kg], M_e(t):室内水蒸気発生量[kg/s] Q_w(t):壁体の吸熱量[W], Q_{ac}:吹き出し風量[kg/h], BF:バイパスファクタ, M_a(t):壁体の吸湿量[kg/h], X_{sat}:蒸発器温度の飽和絶対湿度[g/kg], T_{set,exp}:冷媒基準温度[°C], β:比例ゲイン, T_{sp}:設定温度[°C], T_p:補正平均室内温度[°C], T_{p,b}:基準地域の数値計算による平均室内温度[°C], T_s:基準地域の簡易式による平均室内温度[°C], T_s:その他の地域の簡易式による平均室内温度[°C]

<参考文献>
 1) 岸本嘉彦, 鉾井修一: アクティブ調湿とパッシブ調湿の併用による調湿とエネルギー消費, 第40回熱シンポジウム「人・物・建物にとっての湿気」, 日本建築学会環境工学委員会, pp.163-169, 2010.
 2) 北原博幸, 小西克浩, 数江昇資: 湿式デシカント回路を搭載したエアコンの除加湿性能の評価(第1報)理論的検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.205-208, 2008.

- *1 室蘭工業大学大学院 博士前期課程
- *2 室蘭工業大学大学院 助教 博(工)
- *3 京都大学大学院 教授 工学博士

Graduate Student, Muroran Institute of Technology.
 Assist. Professor, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.
 Professor, Kyoto University, Dr. Eng.