

冷房設定温度が寒冷地・温暖地の吸放湿材貼付効果に及ぼす影響に関する解析的検討 STUDY ON INFLUENCE OF AIR-CONDITIONING TEMPERATURE FOR COOLING ON EFFECTS OF HYGROSCOPIC MATERIAL IN COLD AND WARM DISTRICTS.

廣岡志穂^{*1}, 岸本嘉彦^{*2}

Shiho HIROOKA and Yoshihiko KISHIMOTO

When air-conditioning for cooling is used in room with hygroscopic material, humidity control due to the hygroscopic material affects heat load. Indoor humidity conditions and energy conservations to air-conditioning are thereby variable. To calculate an efficient range of using cooling and hygroscopic material, this study examined influence of air-conditioning temperature and environmental condition on moisture control and energy conservation effects based on numerical calculation. As the result, range of effects based on every condition and causes of their variations were obtained.

Keywords : Cooling, Hygroscopic material, Air-conditioning load, Electric energy consumption amount, COP, Moisture balance

冷房, 吸放湿材, 空調負荷, 消費電力量, COP, 水分収支

1. 研究背景と目的

一般に, 住宅用空調機器として広く普及しているルームエアコン(以下, 「AC」と称す)は, 近年, 室内湿度制御が可能な機種も存在するが, 多くの場合, 室内温度制御を目的としており, 室内相対湿度は温度制御の結果として成り行きに変動する。そのため, AC運転時に室内相対湿度が適切な範囲から外れることがある。このとき, 多孔質材料である吸放湿材を室内側表面に貼付すると, 吸放湿材の調湿効果により, 室内相対湿度変動を適切な範囲内に抑えることが可能と考えられる。吸放湿材の室内側表面においては, 水分の潜熱の影響により吸湿時に発熱, 放湿時に吸熱が生じるため, 吸放湿材の調湿効果は室内相対湿度だけでなく室内温度にも影響を与える。したがって, 吸放湿材による湿度制御は AC に対して必ずしも有利に働くわけではなく, 特に冷房運転時には AC による除湿量 (=潜熱処理熱量) を増加させるため, 空調処理熱量の増加が懸念されている¹⁾。そのため, 吸放湿材を AC と併用する場合には, 調湿効果だけでなく, 吸放湿材が空調処理熱量に及ぼす影響についても適切に予測し, エネルギー性能の変動を考慮する必要がある。

吸放湿材の併用が室内温湿度と空調負荷に及ぼす影響については, これまで様々な検討が行われてきた。松本らは, 吸放湿性を有する壁面により構成され, 間欠空調を行う室の温湿度と熱負荷に対して吸放湿材が与える影響の把握を目的とし, 有限差分法による数値計算を用いて検討を行った^{2),3)}。その結果, 室内側表面の吸放湿を考慮した場合, ピーク値における潜熱負荷の増加は顕熱負荷の減少よりも大きく, 全熱負荷としては増加することを明らかにした。しかし, 検討は空調処理熱量の把握に留まっており, 消費電力量に及ぼす影響については

不明である。

巽らは, AC と吸放湿材を併用した空調システムについて, 外気温変動を単純な正弦波 ($29\pm 3, 35\pm 3$ [°C]) とし, 絶対湿度(8.16, 16.32, 21[g/kg])を一定とする外界気象条件を用い, 時々刻々の空調処理熱量に応じた COP を算出可能な数値計算モデルを用いて, 吸放湿材が空調処理熱量と電力消費量に及ぼす影響を日変動により検討した^{4),5)}。その結果, 空調機容量に対して冷房顕熱負荷が低い場合には, 吸放湿材の併用によって処理全熱量が増加しても, COP の向上により, むしろ消費電力量が減少する場合があることを示した。しかし, 実際の室内温湿度変動は生活パターン, および外界気象条件の影響を鋭敏に受けるため, 外界気象変動を考慮したさらなる検討が必須である。

筆者らは, 巽らの検討結果より, 寒冷地のように冷房顕熱負荷の低い地域においては, 省エネルギー効果を示す可能性が高いと考え, 北海道室蘭市と大阪府大阪市の戸建住宅を対象とし, 拡張アメダス気象データに基づく外界気象条件を用いた数値解析により吸放湿材の省エネルギー効果について検討した⁶⁾。その結果, 吸放湿材と AC を併用した場合における吸放湿材による調湿効果範囲を示し, 寒冷地において吸放湿材の併用が省エネルギー効果を示すことを明らかにした。しかし, ここでは空調処理熱量や消費電力量の積算値により結果を示したのみである。したがって, 吸放湿材貼付による調湿効果や省エネルギー効果の要因を把握するためには, 温暖地と寒冷地のそれぞれにおける室内温湿度変動を分析する必要がある。

さらに, 非定常計算法を用いて住宅の熱負荷計算を行う際には, 冷暖房の設定温度, 運転スケジュールなどを設定する必要があるが, 通常, 熱負荷計算を用いた研究については, 地域によらず一律の条件が

*1 大阪市立大学大学院工学研究科 前期博士課程

*2 大阪公立大学大学院工学研究科 准教授・博士(工学)

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Osaka City University
Assoc. Prof., Osaka Metropolitan University, Dr. Eng.

用いられている。しかし、筆者らは、大阪市と室蘭市における実測結果から、冷暖房運転スケジュールの類型化、冷房発停生起条件の頻度分布、設定温度の頻度分布をそれぞれ定量化し、両地域における差異を明らかにした^{6),7)}。さらには、地域に応じた利用実態を反映した計算条件を用いる場合には、計算条件の組み合わせが膨大になるため、類型化した運転スケジュールの組み合わせに対して最低限必須となる計算条件数について検討した⁸⁾。

以上より、運転スケジュールの組み合わせに対する検討に引き続き、本研究では設定温度のみに着目し、寒冷地および温暖地の両地域において、冷房設定温度が吸放湿材貼付効果、すなわち調湿効果および省エネルギー効果に及ぼす影響の把握とその要因を明らかにすることを目的とする。

2. 計算条件と検討方法

2.1 計算条件

本研究においては、両地域ともに対象住宅および居住者の生活パターンについて、既報^{8),9),10)}の研究から継続して、同一の条件を用いた。計算対象住宅は、Fig. 1 に示す一室モデルを想定した木造平屋建てとした。この住宅は本研究の先行研究にあたる既報⁹⁾において実測調査した住宅のうち、図面を入手できた住宅である。Table 1 に壁体に用いた材料物性値を示す。外皮平均熱貫流率は約 $0.42[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ である。これは省エネルギー基準における北海道(地域区分 1 および 2)での基準値を満たしており、寒冷地向けの住宅を想定している。窓の日射遮蔽係数は 0.47 である。また、本研究では軟質繊維板を吸放湿材とし、吸放湿材を併用する条件では最大効果を把握するため、室内側表面全面に軟質繊維板を貼付した。

居住者は、成人男性 2 名、成人女性 2 名からなる 4 人家族を想定し、生活パターンとしては、吸放湿材の効果を吸放湿量、空調処理熱量などから検討するために、極力単純化している。解析に用いた居住者の生活パターンを Fig. 2、各時間帯における熱水蒸気発生量を Table 2 に示す。平日、休日の 2 条件について、1 週間単位で平日 5 日、休日 2 日を交互に繰り返す想定とした。

AC の運転方式は、温度制御のみを行う冷房運転とした。AC 運転時間の影響を今回は検討せず、設定温度の影響のみに着目するため、AC 設定時間は終日とし、室温が設定温度を超える場合のみ運転するものとした。設定温度は $20.0[\text{C}]$ から $30.0[\text{C}]$ までを $1.0[\text{C}]$ ごとに刻んだ 11 条件と、全く運転をしない条件を加えた計 12 条件とした。また、窓は終日閉じており、閉じた窓からの自然換気と住戸全体に対する $0.5[\text{回}/\text{h}]$ の強制換気を考慮している。強制換気については、全熱交換型(交換効率 0.75)の換気方式とした。

検討対象地域には、寒冷地として北海道室蘭市、温暖地として大阪府大阪市を選定した。外界気象条件には、拡張アメダス気象データから 2010 年 6 月 1 日～9 月 30 日の温度、絶対湿度、東・西・南・北面における各鉛直面日射量、水平面日射量、夜間放射量を用いた。両地域の 7, 8, 9 月における外気温湿度の四分位と平均値を Fig. 3 に示す。2 地域における各月の平均値を比較すると、外気温については、各月とも室蘭が大阪より約 $7[\text{C}]$ 低く、相対湿度については、7, 8 月において室蘭が大阪より約 $20[\text{RH}]$ 高いのに対し、9 月になるとその差は約 $10[\text{RH}]$ に減る。つまり、大阪市の夏期と比較して室蘭市の夏期は気温がかなり低いが湿度は高いという特徴を有している。

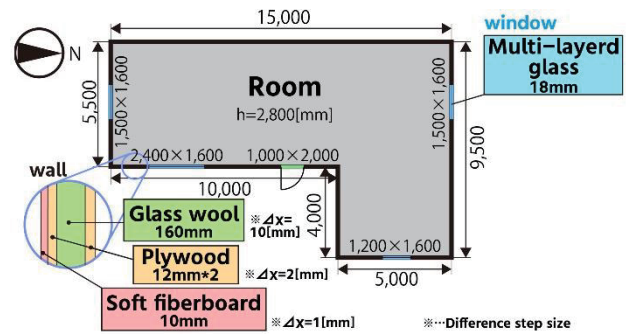


Fig. 1 Object of calculation (floor plan)

Table 1 Material properties

Material	Volumetric specific heat [kJ/m ³ K]	Thermal conductivity [W/mK]	Moisture conductivity [kg/mh(kg/kg ³)]	Hygroscopic properties κ [kg/m ³ (kg/kg ³)]	Hygroscopic properties ν [kg/m ³ K]
Soft fiberboard	311.5	0.064	0.0177	8148	3.33
Multi-layered glass	1.95	0.072	0	-	-
Glass wool	20.1	0.049	0.0979	-	-
Plywood	1165.6	0.1	0	-	-

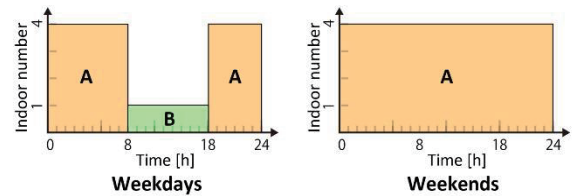


Fig. 2 Life patterns of residents

Table 2 Indoor heat and moisture generation amount

Condition	Indoor number	Heat[W]			Moisture[g/h]	
		Human	Lighting	Total	Human	Total
A	2 men	60×2	200	416	120×2	420
	2 women	48×2			90×2	
B	1 woman	48×1	100	148	90×1	90

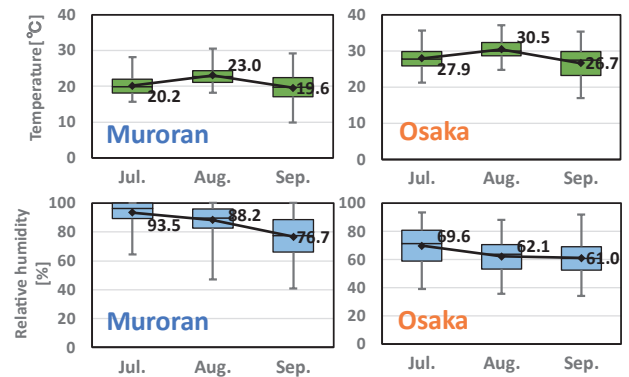


Fig. 3 Outdoor temperature and humidity in Muroran and Osaka

Table 3 Specifications of AC

Capacity	Min.	Rated	Max.
Cooling load[kW]	0.8	4	4.3
Electric energy consumption[W]	165	1835	2000

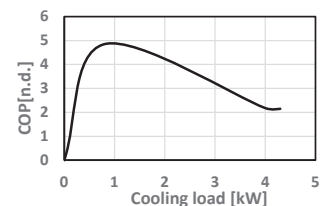


Fig. 4 Relationship between cooling load and COP

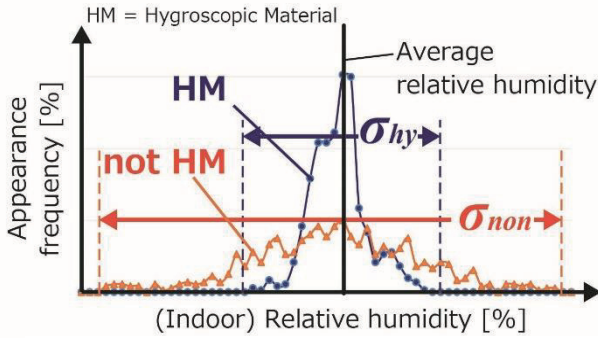


Fig. 5 An evaluation method of moisture control effects

計算期間は2010年6月1日～9月30日であり、6月を助走期間として、7月1日～9月30日の3ヵ月を検討対象とした。

2.2 解析方法

壁体内における水分および熱の移動は、下記の式(1)、(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した¹⁰⁾。

$$(C'\rho' + \kappa) \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda' \frac{\partial X}{\partial x} \right) + v \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

$$(C\rho + Lv) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + L\kappa \frac{\partial X}{\partial t} \quad (2)$$

本研究では、式(1)、(2)に示す吸放湿特性 κ 、 v を一定値として与えている。これは、吸放湿材の効果を簡易に予測する手法として筆者らが提案している室内熱水分収支式の周期積分に基づく手法¹¹⁾の妥当性検討に、本研究の数値計算結果を別途利用予定のためである。吸放湿特性値を一定値として仮定した影響としては、相対湿度80[%RH]以上の領域において、吸放湿材の効果を過少評価していることになる。

室の水分および熱の収支は、壁体の貫流、換気による移動、室内の発生、空調による除去量を考慮し、式(3)、(4)によって与えられる。

$$\rho'V \frac{\partial X_r}{\partial t} = \sum S\alpha'(X_s - X_r) + \rho'mV(X_o - X_r) + M_r(t) - M_{air}(t) \quad (3)$$

$$C_a\rho'V \frac{\partial \theta_r}{\partial t} = \sum S\alpha(\theta_s - \theta_r) + C_a\rho'mV(\theta_o - \theta_r) + Q_r(t) - Q_{air}(t) \quad (4)$$

数値計算においては、時々刻々の空調処理熱量に応じて、凝縮器、蒸発器における冷媒温度およびCOPを算出可能とする空調モデル¹²⁾を用いた。このモデルにおいては、ACのカタログに記載されている最小、定格、最大能力とそれぞれに応じた消費電力量のみが機器特性としての入力条件となり、これら3点から負荷-COP曲線を近似関数として作成する。解析に用いたACの諸元をTable 3に、それに基づく冷房負荷とCOPの関係をFig. 4に示す。ACの諸元については、2016年度の製品のものを採用した。数値計算においては、時々刻々の空調処理熱量の結果からFig. 4に基づき対応するCOPが算出され、空調処理熱量を除くことにより消費電力量が得られる。さらに、これらの積分値を積算消費電力量として用いた。

本研究においては、壁体構成(熱性能)を変化させることなく、吸放湿材を貼付している壁体の室内側表面における吸放湿性の有無による結果の変化に基づき吸放湿材貼付効果を評価する。すなわち、室

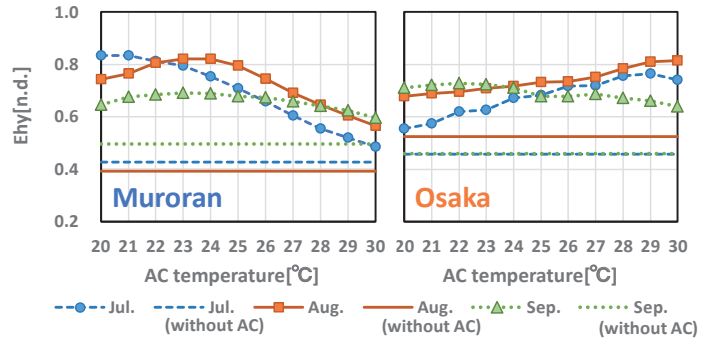


Fig. 6 Variation of E_{hy} due to AC temperature

内側湿気伝達率を $0.0[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}(\text{kg}/\text{kg})]$ とした場合を「吸放湿なし」、 $0.0042[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}(\text{kg}/\text{kg})]$ とした場合を「吸放湿あり」と定義した。また、室外側の湿気伝達率は吸放湿の有無に関わらず $64.2[\text{kg}/\text{m}^2\text{h}(\text{kg}/\text{kg})]$ とし、室内および室外側熱伝達率は、それぞれ $9.3[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ 、 $23.3[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ とした。

また、計算法には陽解法に基づく有限差分法を用い、時間の差分刻みは $0.02[\text{s}]$ 、壁体の差分刻みは $1.0\sim 10.0[\text{mm}]$ とした。

3. 調湿効果と省エネルギー効果に関する数値計算結果

3.1 調湿効果

(a) 評価方法

調湿効果の評価には、Fig. 5に示す調湿効果指標 E_{hy} と後述する高湿度出現頻度を用いる。 E_{hy} は、吸放湿材が室内相対湿度の変動を抑制する程度を示す指標として筆者らが提案したものである⁸⁾。 E_{hy} の定義を式(5)に示す。式(5)からわかるように、室内相対湿度について、吸放湿なしの条件での標準偏差 σ_{non} に対する吸放湿ありの条件での標準偏差 σ_{hy} の比を用いて E_{hy} は算出される。つまり、吸放湿材が室内相対湿度変動を完全に抑えた場合には E_{hy} が1となり、室内相対湿度変動が全く変化しなければ0となるため、以降の検討においては E_{hy} が1に近いほど調湿効果が高いと評価する。

$$E_{hy} = 1 - \frac{\sigma_{hy}}{\sigma_{non}} \quad (5)$$

高湿度出現頻度は、室内相対湿度が70[%RH]以上となる状態を「高湿度」とし、対象期間全体における高湿度の出現時間割合を示したものである。調湿効果が高くても、高湿度出現頻度が高い場合は室内の湿度環境が適切に制御されていないと評価する。

(b) 計算結果

冷房設定温度に対する E_{hy} の変動をFig. 6に示す。室蘭市の場合、7月では設定温度を低下させるほど E_{hy} が増加し、8、9月では23[°C]付近において最大となった。また、大阪市の場合、7、8月では設定温度を上昇させるほど E_{hy} が増加し、9月では設定温度によらず、ほぼ一律となった。

冷房設定温度に対する平均室内相対湿度の変動を、冷房なしの条件と共にFig. 7に示す。吸放湿なしの条件では、両地域において、設定温度の低下に伴い平均相対湿度が上昇したが、大阪8月のみ、23[°C]以下では平均相対湿度は下降する。また、冷房なしの条件と比較すると、室蘭市では最大約7[%RH]の上昇だったのに対し、大阪市では最大約23[%RH]上昇した。また、吸放湿材を貼付すると、室蘭市の場合、7、8月では約3～7[%RH]下降したが、9月では設定温度25[°C]以

上の場合、最大約 4[%RH]上昇した。大阪市の場合は、7月では最大約 4[%RH]上昇したが、8,9月ではほぼ変動しなかった。また、吸放湿の有無に関わらず、大阪市の8月のみ、設定温度 23[°C]において平均相対湿度の最大値が現れていることも特徴的である。

冷房設定温度に対する高湿度出現頻度の変動を Fig. 8 に示す。吸放湿なしの条件では、室蘭市の場合、7月では設定温度によらず高湿度出現頻度が 50[%]以上と高く安定し、8,9月では設定温度が低下するほど出現頻度が上昇した。大阪市の場合、7月では設定温度を 25[°C]、8,9月では 27[°C]より低下させると急激に高湿度出現頻度が上昇した。吸放湿ありの条件では、設定温度を 25[°C]以上とすると、室蘭市の場合、高湿度出現頻度はほぼ変動せず、大阪市の場合、高湿度はほとんど出現しなかった。しかし、設定温度を 24[°C]より低下させると、室蘭市、大阪市ともに高湿度出現頻度が上昇した。

空調処理顕熱量、潜熱量、全熱量の吸放湿材貼付による増加量・増加率(吸放湿材ありにおける計算結果を吸放湿なしの計算結果で除したものをそれぞれ Fig. 9・Fig. 10・Fig. 11 に示す。以降、値が負の場合は、減少量、減少率と称す。

Fig. 9 より、処理顕熱量について見ると、室蘭市では各月において最大 25[%]以上減少し、平均外気温より約 5[°C]高い設定温度にて減少量が最大となった。8月を除いて、大阪市では設定温度を上昇させるほど減少量が増加することがわかる。

Fig. 10 より、処理潜熱量について見ると、室蘭市の7,8,9月および大阪市の7月では、それぞれの平均外気温と等しい設定温度において増加量が最大となった。大阪市の8,9月については、設定温度による増加量の変動はまばらであるが、増加率としては約3~

+20[%]と、室蘭市における増加率約+15~+40[%]より低い。

Fig. 11 より、処理全熱量について見ると、室蘭市では増加量は約-70~+140[MJ]となり、7,8,9月それぞれにおいて設定温度 25, 27, 23[°C]以下の条件で増加側に転じた。大阪市では、7,8月では全ての設定温度において増加するが、9月では 24[°C]以下になると増加側に転じ、増加率としては約-5~+5[%]とわずかであった。

吸放湿材貼付による各月の消費電力増加量・増加率を Fig. 12 に示す。消費電力量については、室蘭市と大阪市の両地域において、ほぼ全ての条件下において減少した。また、減少量は、室蘭市より大阪市において多いが、減少率は、大阪市より室蘭市において高い。これは、室蘭市における消費電力量が大阪市の場合より少ないため、消費電力減少量がわずかでも、消費電力減少率としては相対的に上昇したと考えられる。

したがって、Fig. 11 の全熱増加量と Fig. 12 の消費電力増加量を比較すると、今回の計算条件では、寒冷地と温暖地の両地域において、吸放湿材の貼付により処理全熱量が増加する場合でも、消費電力量としては減少していることがわかる。

4. 冷房と吸放湿材の併用が調湿効果に及ぼす影響

4.1 調湿効果の分析方法

本章においては、冷房設定温度と吸放湿材のそれぞれが調湿効果に及ぼす影響の把握を目的とする。調湿効果指標 E_{hy} では調湿効果の変動性状が把握できないため、以下では、 E_{hy} の算出要素である室内相対湿度の標準偏差を用いて考察する。

冷房設定温度に対する室内相対湿度の標準偏差の変動を AC 運転がない条件の結果と共に Fig. 13 に示す。

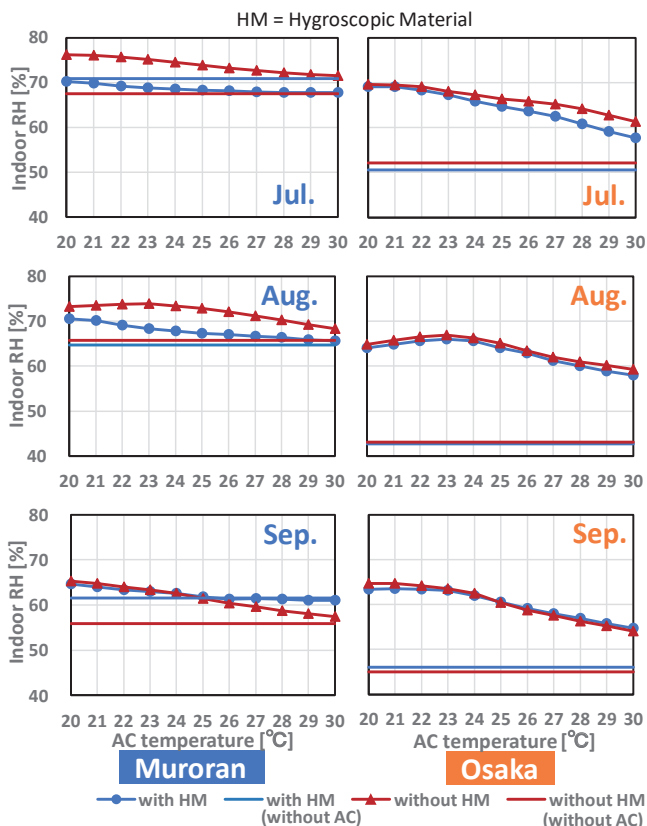


Fig. 7 Variation of average RH due to AC temperature

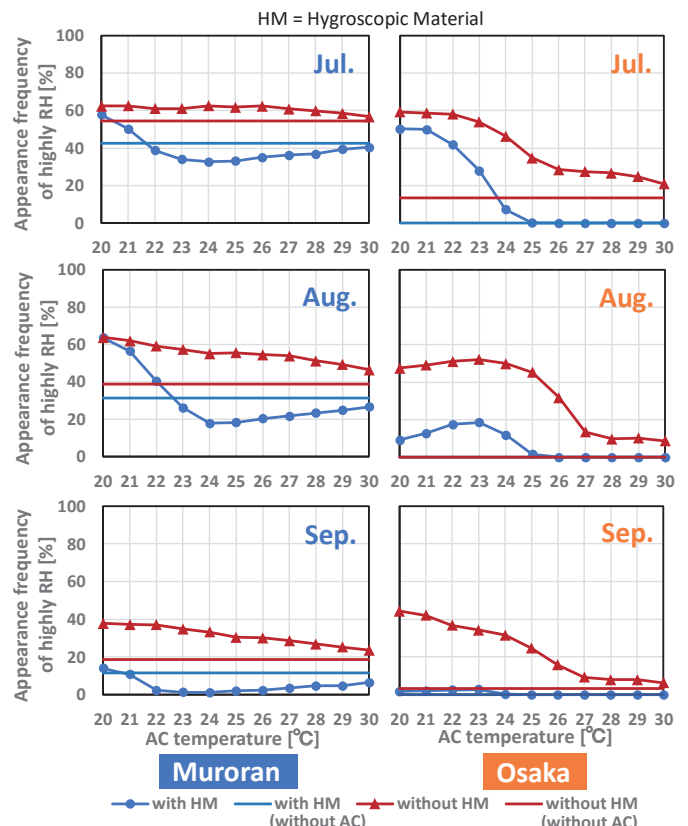


Fig. 8 Appearance frequency of highly humidity (more than 70%)

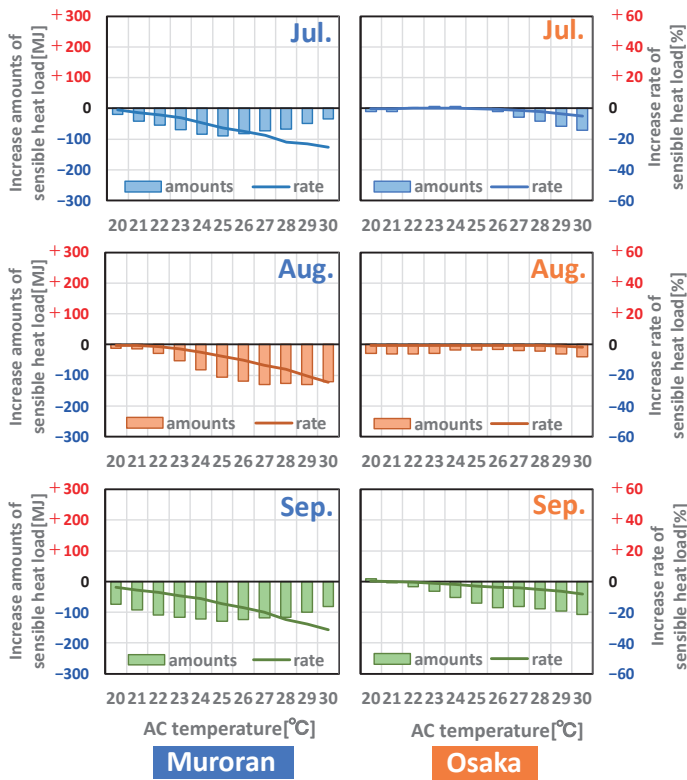


Fig. 9 Variation of increase of sensible heat load due to AC temperature

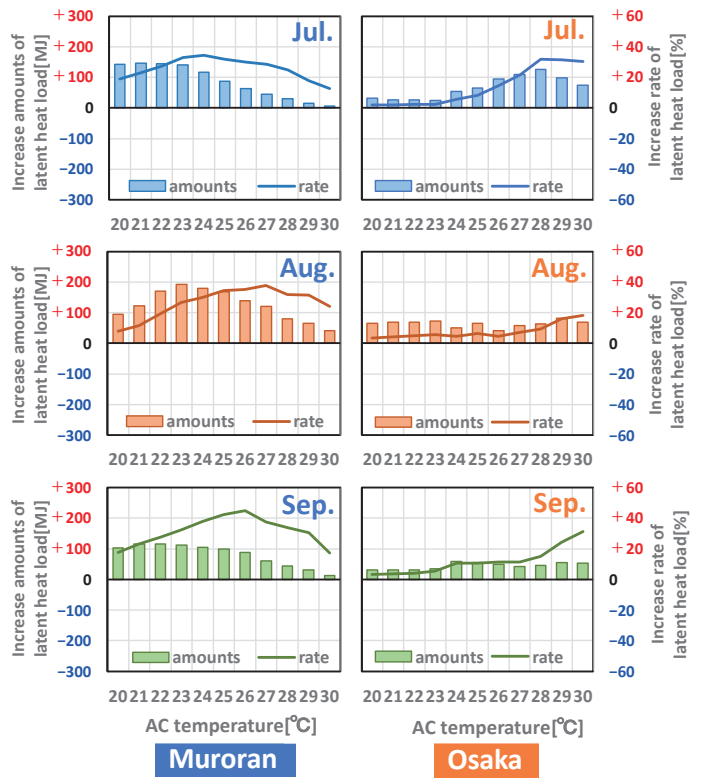


Fig. 10 Variation of increase of latent heat load due to AC temperature

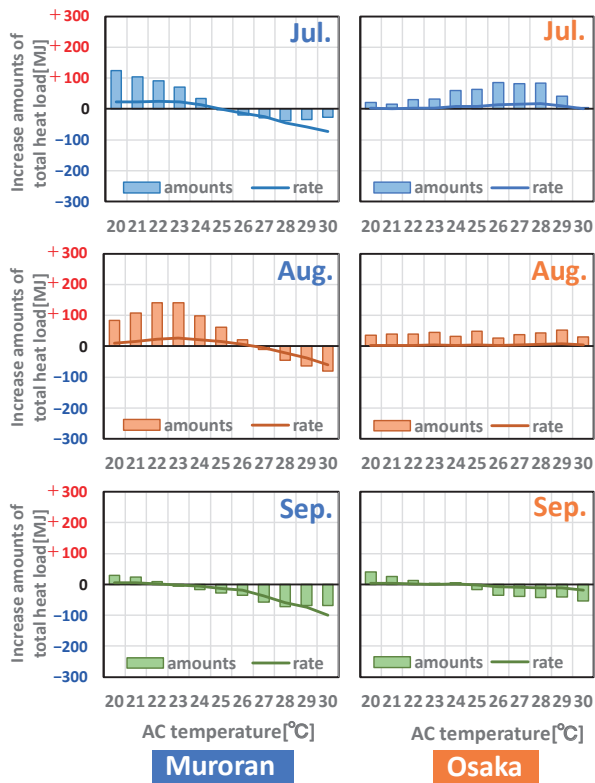


Fig. 11 Variation of increase of Total heat load due to AC temperature

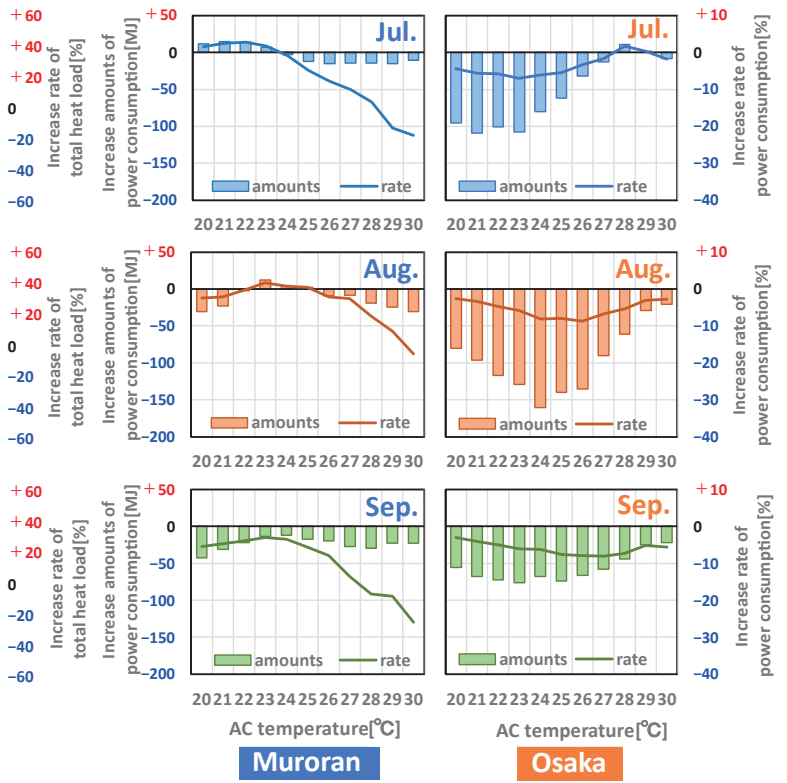


Fig. 12 Variation of increase of electric power consumption due to AC temperature

吸放湿なしの結果より、室蘭市の場合、7、9月では標準偏差の変動はほぼ見られず、AC 運転なしの条件における標準偏差とほぼ同じ値であることがわかる。また、8月では、25[°C]以上の設定温度においてはAC 運転なしの条件の結果から変動はほぼ見られないが、25[°C]以下の設定温度においては設定温度の低下に伴い標準偏差が減少した。大阪市の場合、室蘭市の場合とは反対に、設定温度の低下に伴い標準偏差は増加し、冷房なしの条件に近づくことがわかる。8月では、約25[°C]以下の設定温度においてAC 運転なしでの標準偏差を上回った。

また、吸放湿材を貼付すると、いずれの月においても室蘭市と大阪市の両地域で、吸放湿なしの条件より標準偏差が大きく減少した。室蘭市の場合、7月では設定温度の低下に伴い標準偏差は減少したが、8月では設定温度24[°C]以下において約3[%RH]で安定し、9月では設定温度に関わらず約5[%RH]とほぼ一定となった。大阪市の場合、7、8月では室蘭市とは反対に設定温度の低下に伴う標準偏差の増加が見られるが、吸放湿なしの条件と比較すると全体の増加量は約3[%RH]と少ない。9月では設定温度に関わらず約4[%RH]と低く安定した。また、AC 運転ありの条件における標準偏差は、設定温度に関わらずAC 運転なしの条件を上回らなかった。

以上より、室内相対湿度の標準偏差については、設定温度の変化に伴う増減と、吸放湿材の貼付による増減に、それぞれ特徴的な傾向が現れている。そこで次節より、これら二点の特徴を生む要因について、それぞれ検討する。

4.2 調湿効果 E_{hy} が変動する要因

(a) 設定温度の変化に伴う影響(吸放湿なし)

以下では、冷房設定温度の変化が調湿効果に及ぼす影響を比較するため、設定温度20[°C]と30[°C]の条件による比較を行う。

設定温度が20[°C]、30[°C]の場合の室蘭市における室内相対湿度の日変動の一例(吸放湿なし、8月16日～19日の96時間)を、AC 運転がない条件の結果と共に Fig. 14 に示す。また、同期間の処理顕熱量と、AC 除湿量の日変動の一例(吸放湿なし、8月16日～19日の96時間)を Fig. 15 に示す。ここでは、処理顕熱量の変動により、冷房運転が行われている時間帯を判断する。これは、室温変動よりも明確な判断が可能である。

設定温度30[°C]の場合、Fig. 14 より、AC 運転なしの条件における相対湿度とほぼ同様の変動を示すことがわかる。これは、Fig. 15 の顕熱負荷の変動からわかるように、室温が設定温度を下回る時間帯が長く、日中にわずかに冷房が起動するのみであり、AC 除湿量が少ないためである。

設定温度を30[°C]から20[°C]に低下させると、Fig. 14 より、主に昼間(12時～18時)の相対湿度が上昇することで、夜間(18～6時)に比較的高くなっている相対湿度との差、すなわち相対湿度の振幅が減少する。この相対湿度の上昇は、Fig. 15 からわかるように、設定温度の低下によって朝方(6時～12時)から運転が開始されるためである。冷房起動時にAC 除湿量が最大となるため、設定温度20[°C]において冷房運転が安定した状態となる昼間の除湿量は、設定温度30[°C]において冷房起動時となる昼間の除湿量からほぼ増加しない。つまり、寒冷地では設定温度の低下により、夜間と比較して昼間の除湿増加量は小さい。

Fig. 14 と同様に、大阪市における室内相対湿度の日変動の一例(吸

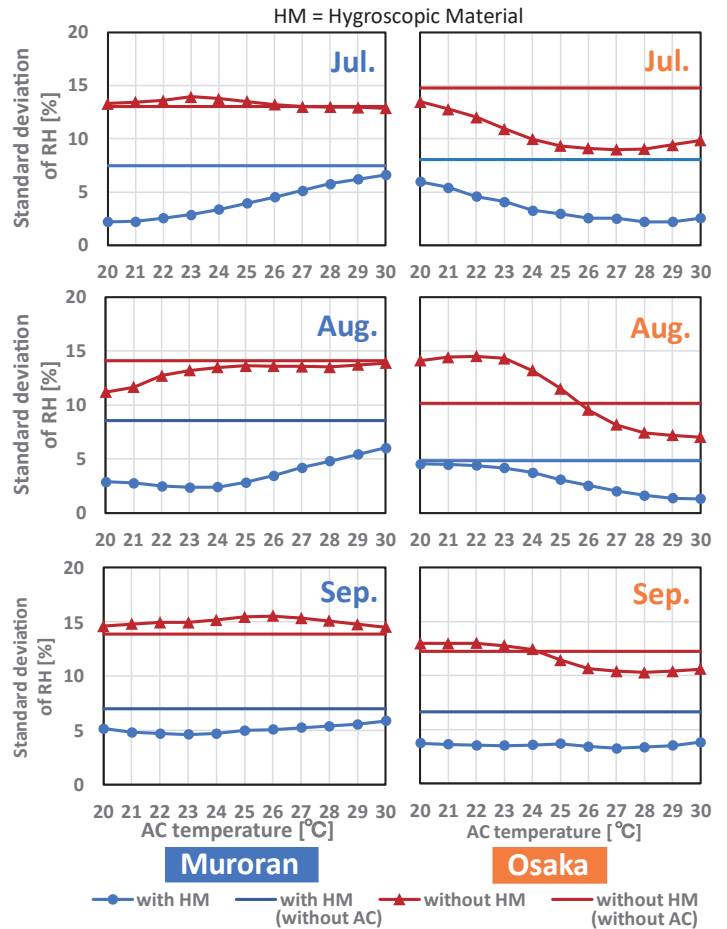


Fig. 13 Variation of standard deviation indoor RH due to AC temperature

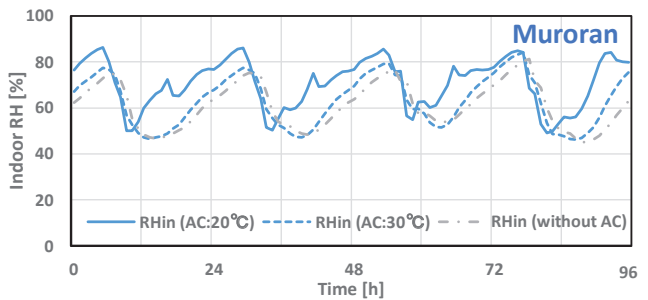


Fig. 14 History of indoor RH (without HM) in Murooran (Aug.)

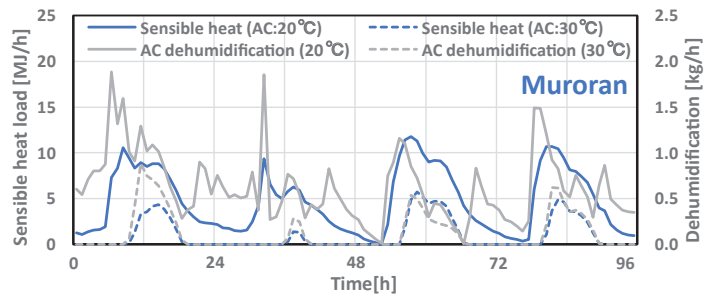


Fig. 15 History of sensible heat load and AC dehumidification (without HM) in Murooran (Aug.)

放湿なし、8月27日～30日の96時間を、AC運転がない条件の結果と共に Fig. 16 に示す。また、同期間の処理顕熱量と AC 除湿量の日変動の一例(吸放湿なし、8月27日～30日の96時間)を Fig. 17 に示す。

設定温度 30[°C]の場合、Fig. 16 より、AC 運転なしの場合と比較して、主に昼間(12時～18時)の相対湿度が上昇し、夜間(18～6時)に比較的高くなっている相対湿度との差、すなわち相対湿度の振幅が減少することがわかる。この相対湿度の上昇は、Fig. 17 より、室蘭市における設定温度を 30[°C]から 20[°C]に低下させた場合の現象と同様の要因によるものである。

設定温度を 30[°C]から 20[°C]に低下させると、Fig. 16 より、主に夜間(18時～6時)の相対湿度が上昇することで、昼間の比較的低くなっている相対湿度との差、すなわち相対湿度の振幅は増加する。これは、Fig. 17 からわかるように、設定温度の低下による夜間の運転時間の増加が原因である。昼間のみ冷房が運転する設定温度 30[°C]の条件に対し、設定温度 20[°C]の条件においては夜間であっても室温が設定温度を上回り、AC がほぼ終日運転となるため、昼間と夜間共に、処理顕熱量および除湿量が同時に増加する。

したがって、室内相対湿度の標準偏差の冷房設定温度に伴う変化は、設定温度の低下に伴う冷房運転時間の増加や運転時間帯の変化から説明が可能である。冷房運転時間と室内相対湿度の標準偏差の関係を表した模式図を Fig. 18 に示す。冷房運転をしない条件を基準とし、まず設定温度低下により昼間の運転時間が増加すると標準偏差は減少、さらに夜間の運転時間が増加すると標準偏差は増加に転じる。

(b)吸放湿材の貼付による影響(吸放湿あり)

まず、大阪市での結果を対象に、吸放湿材の吸放湿量が AC 除湿量に与える影響について検討する。式(3)に示した室内水分量の収支式における各項(吸放湿量、空調除湿量、換気による水分流入量)の1時間積算値の日変動について、吸放湿なし、および吸放湿ありの条件における一例(大阪市、設定温度 20[°C]、8月27日～30日の96時間)をそれぞれ Fig. 19 に示す。

Fig. 19 上段より、吸放湿なしの条件を見ると、換気による水分流入量の増加・減少と同時に AC 除湿量も同じく増加・減少していることがわかる。そのため、Fig. 17 のように処理顕熱量が急激に増加する6時頃を除き、AC 除湿量は換気による水分流入量と同様に基本的に一日中ほぼ一定(約 1.0[kg/h])である。しかし、Fig. 19 下段より、吸放湿ありの条件における AC 除湿量を吸放湿がない場合と比較すると、日中は放湿により AC 除湿量が倍増しているが、夜間では吸湿により 1/3 程度に抑えられている。

以上より、AC 除湿量は換気による水分量の変動よりも吸放湿材の吸放湿量の影響を大きく受けることが明らかになった。

次に、冷房運転時間が空調除湿量に及ぼす影響について検討する。大阪市の場合の吸放湿なし、吸放湿ありの条件における AC 除湿量の1時間積算値について、日変動の一例(設定温度 20[°C]・30[°C]、8月27日～30日の96時間)をそれぞれ Fig. 20 に示す。

大阪市においては、吸放湿なしの条件において設定温度を低下させると、前掲の Fig. 16 からわかるように、夜間の相対湿度の上昇により相対湿度の振幅が増加したため、吸放湿材の吸放湿量も増加した。Fig. 20 より、吸放湿なし、吸放湿ありのそれぞれの条件における AC 除湿量の日変動を比較すると、吸放湿なしの条件の場合、設定温度の

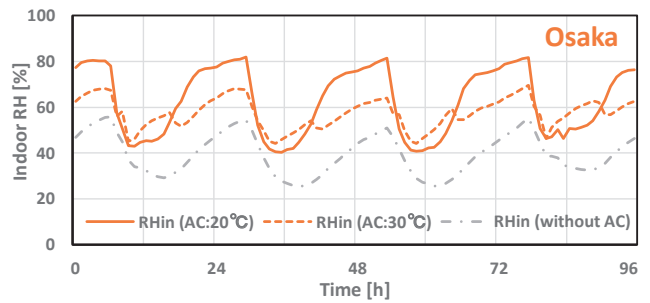


Fig. 16 History of indoor RH (without HM) in Osaka (Aug.)

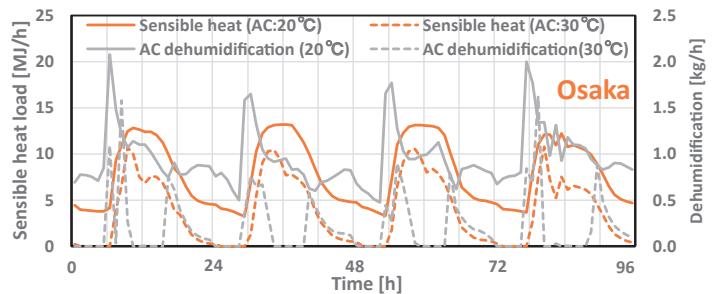


Fig. 17 History of sensible heat load and AC dehumidification (without HM) in Osaka (Aug.)

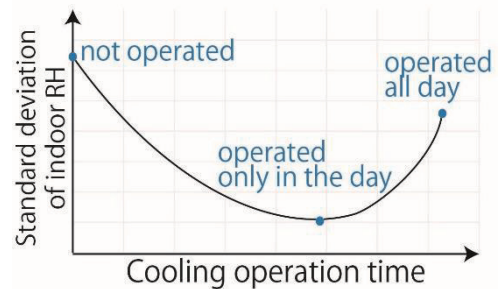


Fig. 18 Schematic diagram of Relationship between total cooling operation time and standard deviation indoor RH

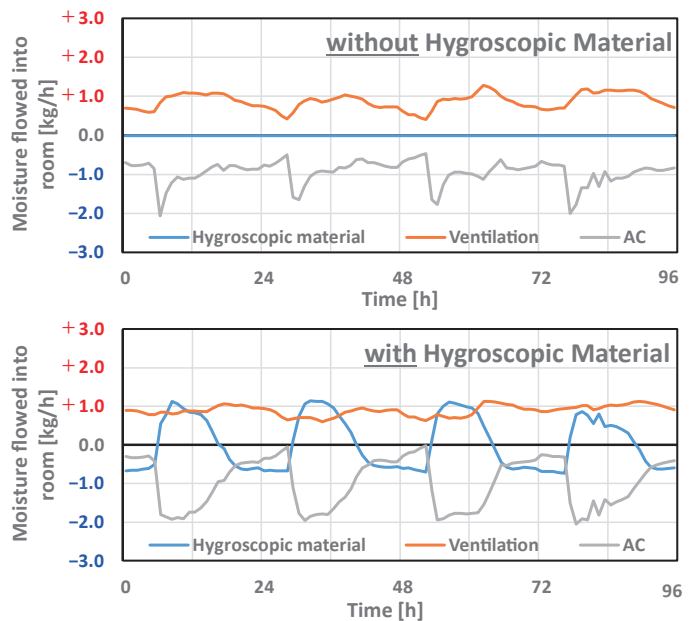


Fig. 19 History of each moisture flow into and escape from room in Osaka (AC:20°C)(Aug.) (upper : "without HM", lower : "with HM")

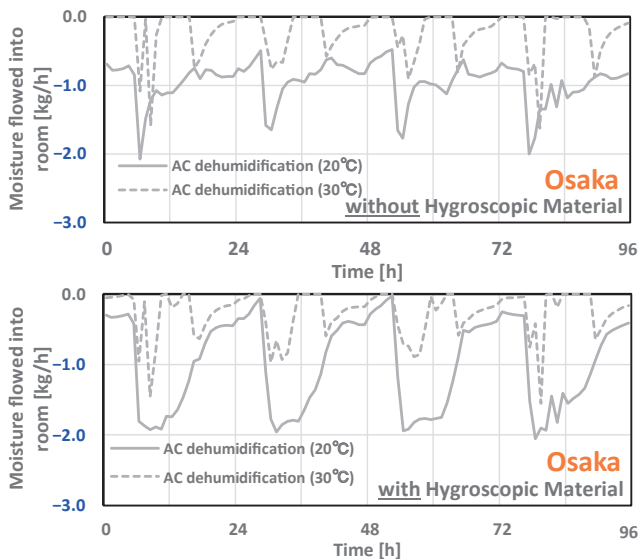


Fig. 20 History of AC dehumidification in Osaka (Aug.)
(upper : “without HM”, lower : “with HM”)

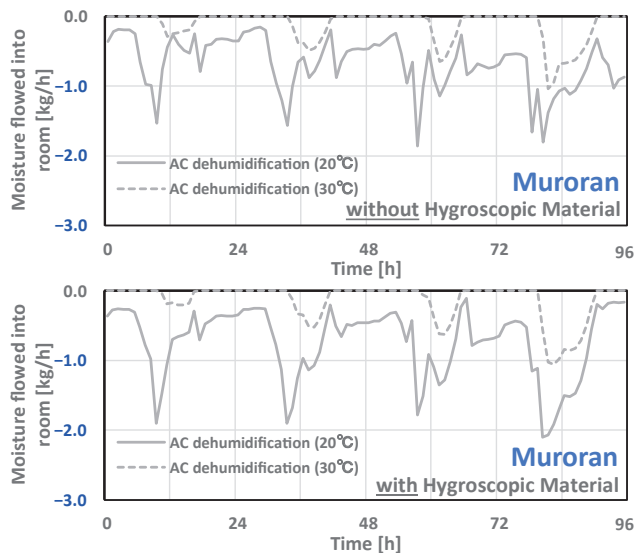


Fig. 22 History of AC dehumidification in Muroran (Aug.)
(upper : “without HM”, lower : “with HM”)

低下により昼間を除いた時間帯の除湿量の増加が大きいのに対し、吸放湿ありの条件の場合、日中の除湿量は増加し、夜間の除湿量は減少している。これは Fig. 19 と同様に、吸放湿量の増加によって AC 除湿量の変動が増大したためと考えられる。

そこで、AC 除湿量の増減が室内相対湿度および調湿効果に及ぼす影響について検討するため、大阪市の場合の吸放湿なし、吸放湿ありの条件における室内相対湿度について、日変動の一例(設定温度 20[°C]・25[°C]・30[°C], 8月 27~30 日の 96 時間)を冷房なしの条件と共にそれぞれ Fig. 21 に示す。

Fig. 21 より、設定温度を低下させるほど、吸放湿なしの場合は日中に相対湿度の低下、夜間に相対湿度の上昇が発生したのに対し、吸放湿ありの場合は日中と夜間共に相対湿度の上昇が発生し、RH 標準偏差が減少した。つまり、Fig. 6 に見られる、大阪市における設定温度の低下に伴う E_{hy} の低下は、吸放湿ありの条件における RH 標準偏差が吸放湿なしの条件よりも減少したことが要因であり、これは、前

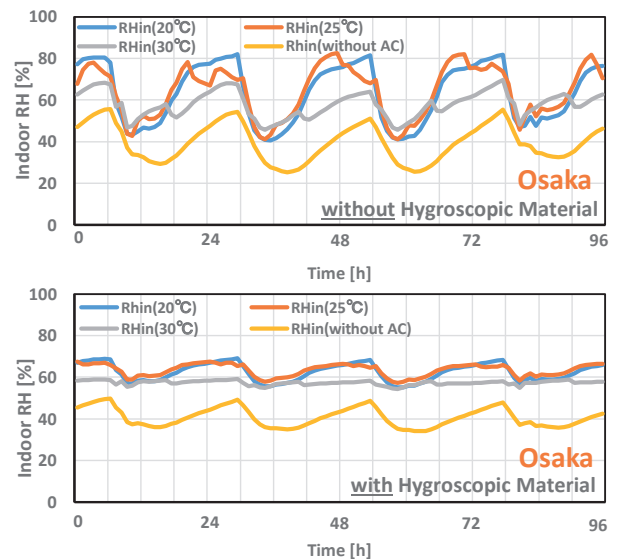


Fig. 21 History of AC dehumidification in Osaka (Aug.)
(upper : “without HM”, lower : “with HM”)

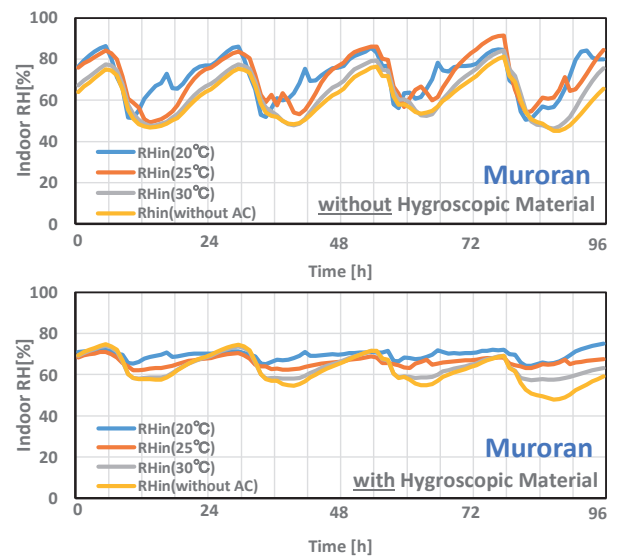


Fig. 23 History of AC dehumidification in Muroran (Aug.)
(upper : “without HM”, lower : “with HM”)

述の AC 除湿量の変動の増大により、調湿効果が低下したためである。

大阪市の場合と同様に、室蘭市の場合の吸放湿なし、吸放湿ありの条件における AC 除湿量の 1 時間積算値について、日変動の一例(設定温度 20[°C]・30[°C], 8月 16 日~19 日の 96 時間)をそれぞれ Fig. 22 に示す。

室蘭市においては、吸放湿なしの条件において設定温度を低下させると、前掲の Fig. 12 からわかるように、昼間の相対湿度の上昇により相対湿度の振幅が減少したため、吸放湿量も減少している。そして、Fig. 22 より吸放湿なし、ありのそれぞれの条件における AC 除湿量の日変動を比較すると、設定温度の低下により、夜間の時間帯の除湿量の増加が大きい。これは、先述の吸放湿量の減少によって、Fig. 19 に見られた吸放湿材の有無による AC 除湿量変動への影響が減少したためと考えられる。

大阪市の場合と同様に、室蘭市の場合の吸放湿なし、吸放湿ありの

条件における室内相対湿度について、日変動の一例(設定温度 20[°C]・25[°C]・30[°C], 8月16~19日の96時間)を冷房なしの条件と共にそれぞれ Fig. 23 に示す。

Fig. 23 より、設定温度を低下させるほど、吸放湿なしの場合は日中の相対湿度が変動せず、夜間の相対湿度(最高相対湿度)の上昇により RH 標準偏差が増加したのに対し、吸放湿ありの場合は日中の相対湿度(最低相対湿度)が上昇し、夜間の相対湿度は変動しなかったため、RH 標準偏差が減少した。よって、Fig. 6 に見られる、設定温度の上昇に伴い E_{hp} が増加したと考えられ、これは、吸放湿量の増加および夜間の AC 除湿量の増加による各時刻の室内相対湿度への影響が要因と考えられる。

したがって、設定温度の低下に伴う室内相対湿度の振幅の増減によって吸放湿量が増加することにより、AC 除湿量の変動も増大する。その結果、室内相対湿度の標準偏差が変動し、調湿効果(E_{hp})に及ぼす冷房設定温度の影響が定まると考えられる。

本章の検討結果より、室内相対湿度が最も安定する条件は、冷房を昼間のみ運転する場合であるが、吸放湿材による調湿効果が増加するのは、より低い設定温度で終日冷房運転をする場合だと考えられる。

5. 冷房と吸放湿材の併用が省エネルギー効果に及ぼす影響

5.1 省エネルギー効果と COP の関係性

異らは、冷房処理顕熱量が少ない場合には、冷房と吸放湿材の併用により、処理全熱量は増加しても、COP の向上によって消費電力量としては減少する可能性があることを明らかにした⁵⁾。特に、外気絶対湿度がより高いほど、もしくは外気温度がより低いほど、消費電力の削減率は上昇するという結果が示されている。しかし、本研究においては、3.2 節で示したように室蘭市と大阪市、すなわち、寒冷地と温暖地の両地域で、ほぼ全ての冷房設定温度において省エネルギー効果(消費電力量の減少)を示した。

そこで、本章では吸放湿材による省エネルギー効果の発生要因を明らかにするため、寒冷地と温暖地における COP の出現頻度分布や経時変化に基づき検討する。

5.2 COP が変動する要因

(a)冷房設定温度の影響

室蘭市と大阪市のそれぞれについて、設定温度が 20, 25, 30[°C] の条件における 8 月の COP 出現頻度分布を Fig. 24 に示す。ここでは、吸放湿なしの条件(図中"not HM")に着目して検討する。また、室蘭市と大阪市のそれぞれの場合における、8 月の処理全熱量・COP の日変動の一例(設定温度 20[°C], 室蘭市:8月27日~28日, 大阪市:8月28日~29日の48時間)を Fig. 25 に示し、処理全熱量の内訳を示すため、室蘭市と大阪市それぞれの同条件・同期間における 8 月の処理顕熱量・処理潜熱量の日変動についても Fig. 26 に示す。

設定温度 20[°C] の場合の室蘭市においては、Fig. 24 より、3[n.d.] 付近(以下、「a 点」と称す)と 5[n.d.] 付近(以下、「b 点」)に COP の出現頻度のピークがあることがわかる。これは、Fig. 25 上段および Fig. 26 上段より、この条件下では冷房が主として日中に運転しており、特に日中の処理顕熱量が夜間より比較的大きいため、COP が低い a 点は昼間の冷房運転時、COP が高い b 点は夜間の冷房運転時や冷房発停時の COP がそれぞれ現れたと考えられる。

設定温度を上昇させると、b 点から徐々に出現頻度が減少している。これは、外気温と設定温度の差が減少するにつれて、Fig. 25 上段に

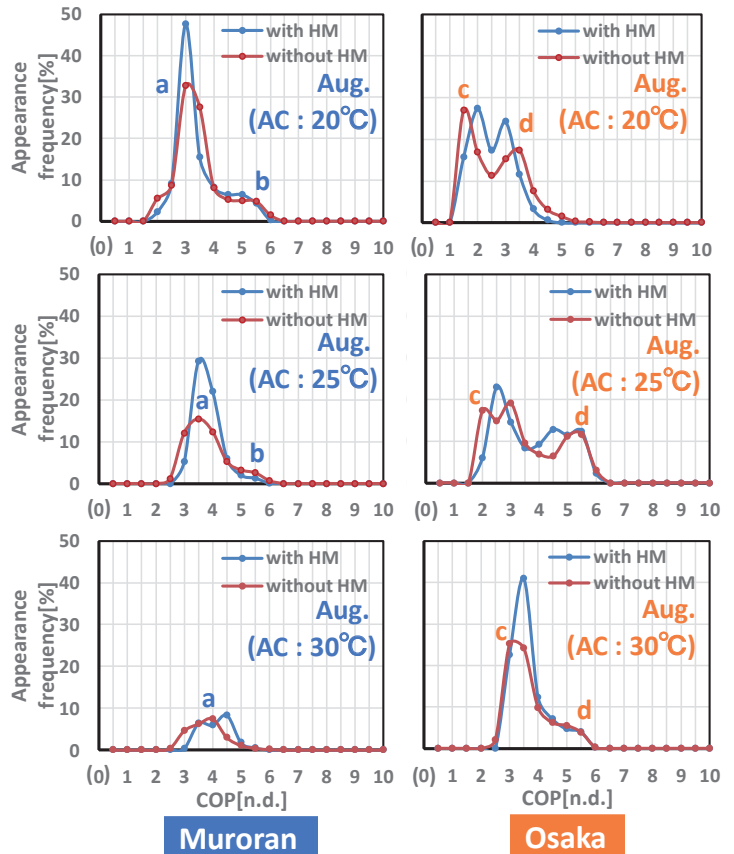


Fig. 24 Distribution of COP appearance frequency by AC temperature (Aug.)

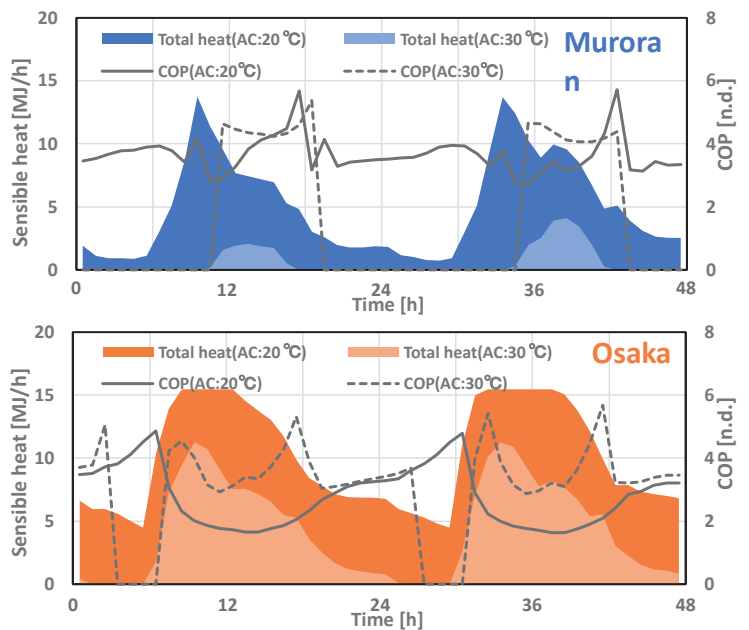


Fig. 25 History of total heat load and COP (without HM, Aug.) (upper: "in Muroan", lower: "in Osaka")

おける処理全熱量の変動より、冷房運転の継続時間が短くなり、冷房運転が安定する前に冷房が停止してしまうためである。一方で、室温と設定温度の差は減少するため処理全熱負荷も減少し、a 点の COP の値は上昇している。

設定温度 20[°C]の場合の大阪市においては、Fig. 24 より、1.5[n.d.] 付近(以下、「c 点」)と 3.5[n.d.] 付近(以下、「d 点」)に COP の出現頻度のピークが見られる。これは、Fig. 25 下段および Fig. 26 下段より、この条件下では冷房はほぼ終日運転しており、室蘭市と比較して夜間の処理顕熱量が大きいこと、COP が低い c 点は日中の冷房運転時、COP が高い d 点は夜間もしくは涼しい日における冷房運転時の COP が現れたものと考えられる。

設定温度を上昇させると、暑い昼間ではなく涼しい夜間の冷房運転時間が減少するため、d 点から徐々に出現頻度が減少している。

したがって、COP の出現頻度ピークは、設定温度の変更による顕熱負荷の変動や冷房が運転する時間帯、その継続時間により性状を説明できる。

(b)吸放湿材の影響

Fig. 24 より、前項で述べた各出現頻度ピークを見ると、吸放湿材貼付により(図中”with HM”), COP が低い a 点や c 点は高効率側に、COP が高い b 点や d 点は低効率側に移動することがわかる。

そこで本項では、吸放湿材による吸湿・放湿時間と COP の関係に着目して省エネルギー効果について検討する。

室蘭市と大阪市における、冷房運転の処理全熱量、消費電力量および COP の日変動の一例(設定温度 25[°C]、室蘭市:8 月 27 日~28 日、大阪市:8 月 28~29 日)をそれぞれ Fig. 27 および Fig. 28 に示す。また、室蘭市と大阪市それぞれの同条件・同期間における処理顕熱量・処理潜熱量の日変動についてもそれぞれ Fig. 29 および Fig. 30 に示す。図中には、吸放湿材が放湿、吸湿している時間帯についても併記する。吸放湿は各時刻の吸放湿量の正負により判定した。

Fig. 27 および Fig. 28 より、両地域共に吸放湿材を貼付すると、吸放湿なしの場合に比して、放湿時には処理全熱量が減少、さらに COP の上昇により消費電力量も減少した。これは、Fig. 29 および Fig. 30 に示すように、各時刻において処理潜熱量より処理顕熱量が多く、放湿時における顕熱減少量が潜熱増加量を上回るためである。一方、吸湿時には放湿時と反対の傾向が見られ、処理全熱量が増加し、さらに COP の低下により消費電力量も増加した。これは、Fig. 29 および Fig. 30 より、吸湿時には顕熱増加量が潜熱減少量を上回るためである。

処理全熱量の増減の要因を検討するため、室蘭市、大阪市の場合について、8 月の吸湿時、放湿時のそれぞれにおける積算処理全熱量の増加量・減少量を Fig. 31 に示す。両地域共に、吸放湿材貼付による処理全熱量の増減量・比率は設定温度によって異なるものの、全ての設定温度条件において放湿時には増加量より減少量が多いため、処理全熱量は減少し、吸湿時には減少量より増加量が多いため、処理全熱量は増加した。また、Fig. 11 で示した積算処理全熱量と比較すると、室蘭市においては、設定温度 30[°C]の場合、吸湿時においてほぼ空調運転が行われないため、積算処理全熱量としては減少側に転じるが、設定温度 25[°C]以下の場合には吸湿時の空調運転時間が増加するため、積算処理全熱量は増加側に転じる。大阪市においても、全ての設定温度条件において吸湿時の空調運転が行われるため、積算処理全熱量は増加側へ転じる。

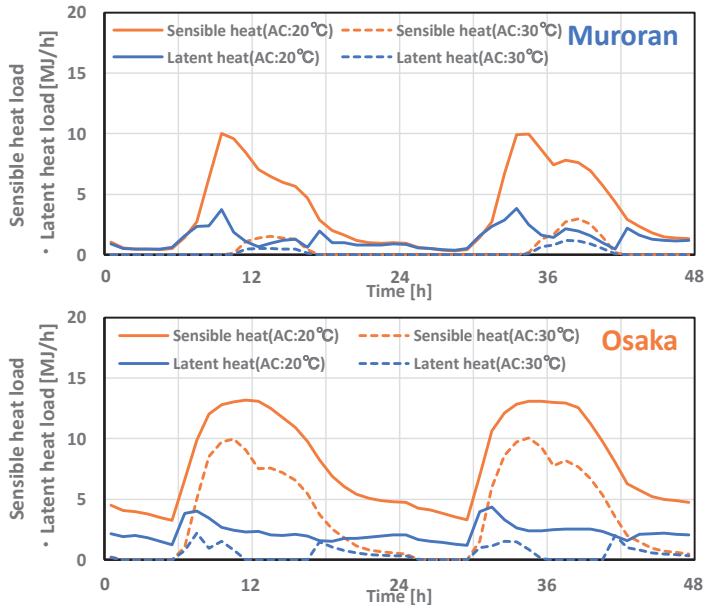


Fig. 26 History of sensible heat load and latent heat load (without HM, Aug.) (upper: "in Murooran", lower: "in Osaka")

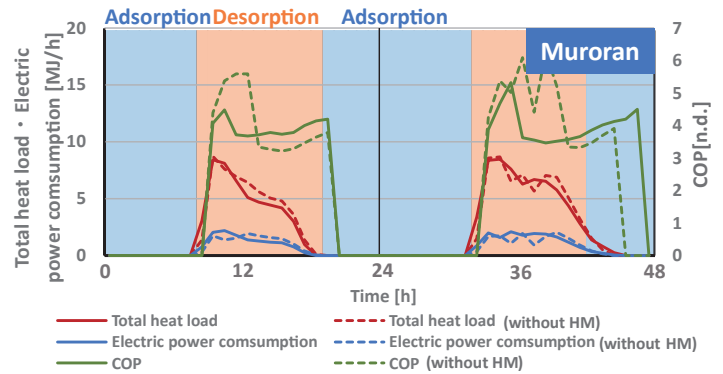


Fig. 27 History of total heat load, electric power consumption, and COP in Murooran (Aug.)

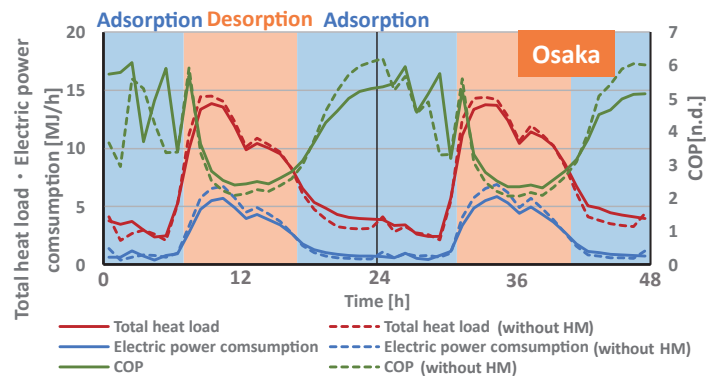


Fig. 28 History of total heat load, electric power consumption, and COP in Osaka (Aug.)

次に、消費電力量の増減の要因を検討するため、8月の積算消費電力量についても Fig. 31 と同様にして、Fig. 32 にそれぞれ示す。両地域共に、吸放湿材貼付による消費電力量の増減量・比率は設定温度によって異なるものの、処理全熱量と同様に、全設定温度条件において放湿時には増加量より減少量が多いため、消費電力量は減少し、吸湿時には減少量より増加量が多いため、消費電力量は増加した。また、両地域のほぼ全ての設定温度条件において、吸湿時の増加量より放湿時の減少量が多いため、Fig. 12 で示したように、積算消費電力量は減少側へ転じる。

つまり、両地域に見られる傾向として、処理全熱量においては放湿時の積算減少量より吸湿時の積算増加量が多いが、消費電力量としては、吸湿時の COP 下降による積算増加量より放湿時の COP 上昇による積算減少量が多いため、その結果、省エネルギー効果が得られたと考えられる。

本研究においては、冷房運転時間を終日とし、空調時間において室温が設定温度を超える場合のみ運転が稼働するものとした条件による計算結果を示しているため、夜間より昼間の運転時間が長い結果となっている。つまり、間欠運転とする場合においても、放湿時間が生じやすい昼間の冷房運転時間を増加させると、吸放湿材による省エネルギー効果が向上する可能性が高い。

6. 結論

本研究では、寒冷地および温暖地の両地域において、吸放湿材と AC を併用した空調システムを採用した高断熱戸建住宅を対象とし、冷房設定温度が吸放湿材貼付効果、すなわち調湿効果および省エネルギー効果に及ぼす影響について数値解析により検討した。そして、吸放湿材の有無や冷房設定温度が室内の水分移動や熱負荷に与える影響を把握し、吸放湿材貼付によって得られる調湿効果および省エネルギー効果が増減する各要因について考察した。以下に結果を示す。

- 1) 寒冷地、温暖地ともに、7, 8, 9月のいずれにおいても月別平均外気温付近の設定温度において調湿効果が最大となった。
- 2) 寒冷地、温暖地ともに、吸放湿材の併用によって処理全熱量が増加する場合でも、消費電力量は減少した。
- 3) 冷房設定温度が調湿効果を変動させる要因は、設定温度に起因する冷房運転時間帯の変動が大きく影響している。室内相対湿度が最も安定するのは昼間のみ冷房を運転する場合であるが、吸放湿材による調湿効果が大きいのは、より低い設定温度で終日冷房運転をする場合である。
- 4) 吸放湿材を貼付すると、ほぼ全ての設定温度条件において、吸放湿なしの場合に比して、放湿時には処理全熱量の減少・COP 上昇により消費電力量は減少した。一方、吸湿時には処理全熱量の増加・COP 下降により消費電力量は増加した。また、処理全熱量においては放湿時の積算減少量より吸湿時の積算増加量が多いが、消費電力量としては、吸湿時の COP 下降による積算増加量より放湿時の COP 上昇による積算減少量が多いため、省エネルギー効果が得られた。

記号

C : 材料の比熱[J/kg・K], C_a : 空気の比熱[J/kg・K], C' : 材料の空隙率[m³/m³], L : 蒸発潜熱[J/kg], m : 換気回数[回/s], $M_{air}(t)$: 空調によって除去する水分量[kg/s], $M_r(t)$: 室内水蒸気発生量[kg/s], $Q_{air}(t)$: 空調によって除去する熱量[W], $Q_r(t)$: 室内熱発生量[W], S : 壁の表面積[m²], t : 時間[s], V : 室容積

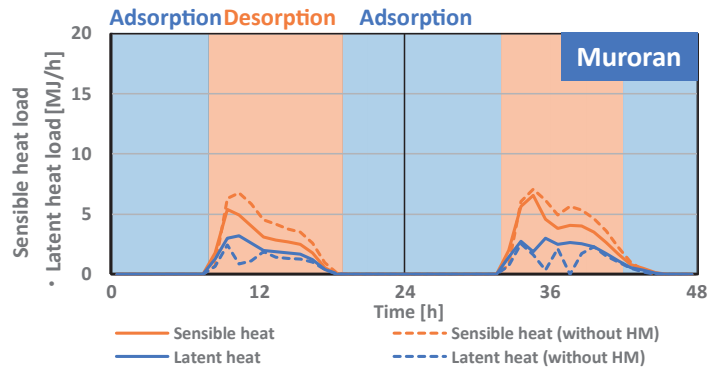


Fig. 29 History of sensible heat load and latent heat load in Murotan (Aug.)

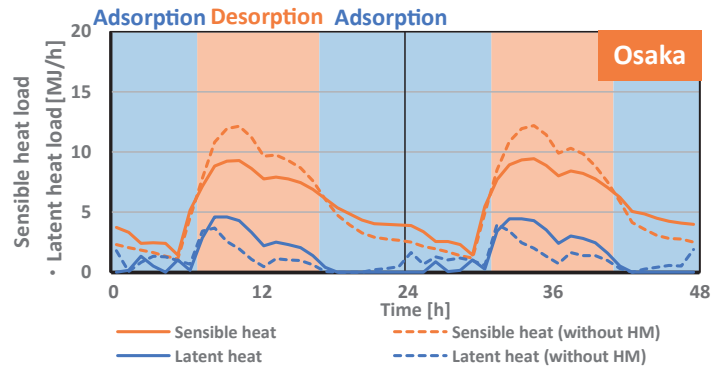


Fig. 30 History of sensible heat load and latent heat load in Osaka (Aug.)

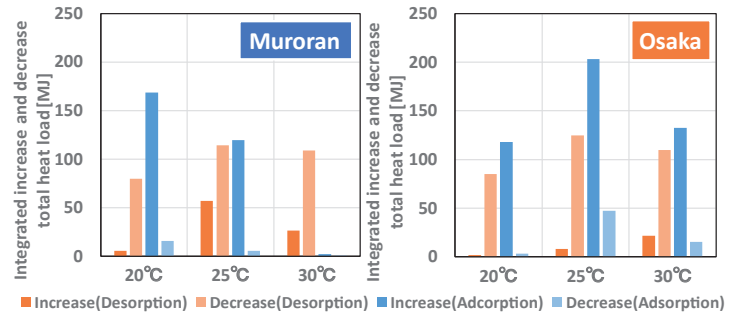


Fig. 31 Integrated total heat load (Aug.) (left : in Murotan, right : in Osaka)

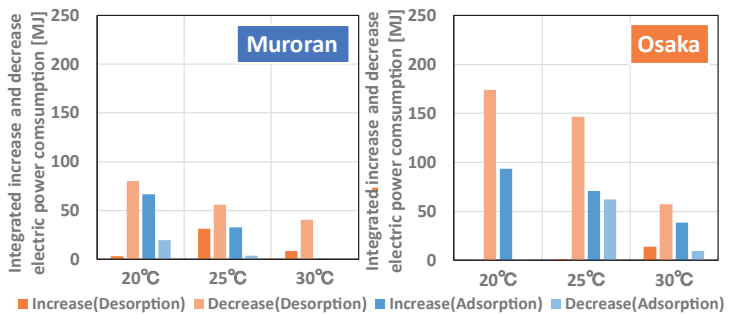


Fig. 32 Integrated electric power consumption (Aug.)

(left : in Murotan, right : in Osaka)

[m³], X : 絶対湿度[kg/kg], X_o : 外気絶対湿度[kg/kg], X_r : 室内絶対湿度[kg/kg], X_s : 室内側表面絶対湿度[kg/kg], α : 材料外表面の熱伝達率[W/m²·K], α' : 材料外表面の湿気伝達率[kg/m²·h(kg/kg)], θ : 温度[°C], θ_o : 外気温度[°C], θ_r : 室内温度[°C], θ_s : 壁体の室内側表面温度[°C], κ : 吸放湿特性(室内絶対湿度の単位変化に対する吸放湿量)[kg/m³(kg/kg)], λ : 材料の熱伝導率[W/m·K], λ' : 材料の湿気伝達率[kg/m·h(kg/kg)], ν : 吸放湿特性(室内温度の単位変化に対する吸放湿量)[kg/m³·K], ρ : 材料の密度[kg/m³], ρ' : 乾燥空気密度[kg/m³]

参考文献

- 1) Y. Sakamoto, Y. Matsuo, A. Nagata, H. Kim : Effect of the Moisture Sorption of Miscellaneous Room Goods on Latent Heat Load and Humidity Part-2 Simulation Analysis on the Effect of the Moisture Sorption, Architectural Institute of Japan, D-2, pp.317-318, 1996 (in Japanese)
坂本 雄三, 松尾陽, 永井明寛, 金垣龍: 「潜熱負荷と湿度変動に及ぼす室内備品類の吸放湿性に関する研究 その2 シミュレーションによる吸放湿材の影響に関する検討」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.317-318, 1996
- 2) H. Sakurai, M. Matsumoto : An Analysis of Temperature, Humidity Variation and Heating Load in a room - Effects of Moisture Absorbing Material on Heating Load-, Architectural Institute of Japan, pp.1383-1384, 1989 (in Japanese)
桜井浩之, 松本衛: 「室の温湿度及び熱負荷の性状: 壁の吸放湿の熱負荷への影響」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1383-1384, 1989(1-3) 松本衛, 鉦井修一, 丹羽勝巳: 「壁の吸放湿を考慮した室の温湿度・熱負荷の確立性状解析」, 平成元年度日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.69-72, 1989.
- 3) K. Niwa, M. Matsumoto, S. Hokoi : An Analysis of Stochastic Properties of Temperature, Humidity and Load in a room Coated with Hygroscopic Material, Architectural Institute of Japan, pp.751-752, 1989 (in Japanese)
丹羽勝巳, 松本衛, 鉦井修一: 「壁の吸放湿を考慮した室の温湿度・熱負荷の確立性状解析」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.751-752, 1989
- 4) Y. Tatsumi, D. Ogura : Influence of Hygroscopic Materials on the Air-conditioning Load and Indoor Temperature and Humidity, Architectural Institute of Japan, pp.239-240, 2014 (in Japanese)
巽佑介, 小椋大輔: 「吸放湿材が室内温湿度性状および空調負荷に及ぼす影響の検討」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.239-240, 2014
- 5) Y. Tatsumi, T. Ogino, D. Ogura, H. Miura : A Study on Temperature and Humidity Control by Refrigerated Air Conditioning in the Room with Hygroscopic Materials - Part2 Influence of Hygroscopic Materials on Air Conditioning Load and Indoor Temperature and Humidity-, Architectural Institute of Japan, pp.247-248, 2015 (in Japanese)
巽佑介, 荻野登司, 小椋大輔, 三浦尚志: 「室内の吸放湿性を考慮したルームエアコンの冷房・除湿による温湿度調整に関する研究 (その2) 吸放湿材の利用が室内温湿度性状および空調負荷に及ぼす影響の検討」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.247-248, 2015
- 6) Y. Kishimoto, H. Yamagishi : Study on Effective Utilization Method of Hygroscopic Materials Based on Actual Usage Condition of Air-conditioner of Detached Houses in Muroran, AIJ Hokkaido Branch, No.88, D-2, pp.175-178, 2015 (in Japanese)
岸本嘉彦, 山岸久範: 「室蘭市周辺の戸建住宅におけるルームエアコンの利用実態調査に基づく吸放湿材の有効利用手法に関する研究」, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.88, D-2, pp.175-178, 2015
- 7) N. Date, Y. Kishimoto, N. Umemia : Study on Determinants of Air-conditioning On/Off Control at Residences in Cold District, Kinki Chapter of SHASE, A-42, 2020 (in Japanese)
伊達風沙, 岸本嘉彦, 梅宮典子: 「寒冷地の住宅における冷房発停生起条件に関する研究」, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, A-42, 2020
- 8) Y. Kishimoto : Effective Application of Ad- and Desorption material Based on Actual Usage of Cooling and Heating for Residential Houses in Cold District, Symposium of Heat in AIJ, pp.135-140, 2018 (in Japanese)
岸本嘉彦: 「寒冷地の冷暖房実態に即した吸放湿材の効果的利用」, 第48回熱シンポジウム「湿気の仕組み・制御・評価」, pp.135-140, 2018
- 9) Y. Kishimoto, T. Gunji : Study on Determination of Air-conditioning ON/OFF Control and Heating Load Behavior of Super Insulated House in Hokkaido, Architectural Institute of Japan, pp.951-952, 2013 (in

Japanese)

岸本嘉彦, 郡司 泰将: 「北海道の高気密高断熱住宅におけるルームエアコンの運転生起要因と負荷性状に関する研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.951-952, 2013

- 10) S. Hokoi, T. Ikeda, K. Nitta : Ace Architectural Engineering Series Ace Building Environmental Engineering II - Heat / Humidity / Ventilation -, Asakura Publishing Co., Ltd., 2002 (in Japanese)

鉦井修一, 池田哲朗, 新田勝通: 「エース環境工学II -熱・湿気・換気-」, 朝倉書店, 2002

- 11) Y.Kishimoto, K.Takahashi : Simple Formulae Based on Cyclic Integration for Processing Amount of Intermittent Air Conditioning Load and Average Indoor Temperature and Humidity under the Air-Conditioning System with Combination Use of Hygroscopic Materials, Architectural Institute of Japan, pp.129-130, 2018 (in Japanese)

岸本嘉彦, 高橋光一: 「吸放湿材を併用した空調システムにおける周期積分に基づく間欠空調処理熱量と平均室内温湿度の簡易予測式」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.129-130, 2018

- 12) T. Ueno, T. Miyanaga, W. Urabe, H. Kitahara : Development of Heat Source Characteristic Model of Home User Air Conditioner -Part 1: Characteristic Model for Cooling Period-, System Engineering Research Laboratory, pp.1-18, 2010 (in Japanese)

上野剛, 宮永俊之, 占部亘, 北原博幸: 「家庭用エアコンの熱源特性モデルの開発 - その1 冷房時モデル」, 電力中央研究所報告, pp.1-18, 2010

(2022年7月8日原稿受理, 2023年5月1日採用決定)