

木炭を用いた調湿システムの性能評価のための数値解析

佐藤 慎哉*1・萩島 理*2・谷本 潤*2

(平成20年5月8日 受理)

Numerical experiment of humidity controller system using charcoal

Shinya SATO, Aya HAGISHIMA[†] and Jun TANIMOTO

[†]E-mail of corresponding author: aya@cm.kyushu-u.ac.jp

The authors established two types of humidity control system, which utilize charcoal chips produced from construction wastes. They contain regenerating cycles using solar energy. First of them is 'passive system', which is externally covered by a glass with a small air space. Another is 'hybrid system', which consists of a glass tube filled with charcoal chips and a fan for ventilation. The authors presented the numerical models of the systems and did numerical experiment. The experimental result indicates that 1) the appropriate natural ventilation was observed for humidity control using 'passive system'. 2) increase of the depth of charcoal could only increase the amount of moisture absorption of 'hybrid system', 3) Insulation for 'passive system' caused the reduction of amount of moisture absorption.

Key words: charcoal chips, humidity controller, passive system, hybrid system, numerical simulation, solar energy

1. 緒言

リサイクルなどによる廃棄物最終処分量の抑制は、バージン資源使用量の削減や処分場の残存年数延長など様々な観点から近年の日本の大きな課題である。とりわけ全廃棄物量発生量の2割を占める建設廃棄物の中で、解体木造家屋や木質系建材の端材などの「木くず」はリサイクルが困難なため最終処分量全体の50%を占めており、その削減は難しいのが現状である。そこで廃棄物を炭化して吸着性能を付与する事で新たな素材として再活用する手法が模索されている^{1),2)}。また、賦活処理を施さない安価な木炭であっても高湿条件で水蒸気を吸着し、低湿条件では吸着した水分を放湿するという調湿作用を有しており^{3),4)}、室内空気の調湿材としての利用方法が検討されている。その代表的なものは、住宅の床下空間に木炭を敷き詰める、というものであるが、周辺空気の湿度に伴い木炭の含水率が増える、というだけでは十分に除湿機能を発揮する事は困難である。この問題を解決するためには、木炭の吸湿と放湿のサイクルが生じるようなシステム設計に留意する必要がある。

そこで筆者らは、建物外壁面の一部にガラスカバー付きの木炭ボードを設置し、昼間は日射熱により木炭を乾燥し、夜間はガラスと木炭ボードの間の中空層に室内空気を流入させ除湿を行うというパッシブな調湿システムを提案している⁴⁾。しかし、このシステムでは中空層への空気導入の際にファン動力を用いずに、中空層内外の温度差換気のみで十分な換気量が確保できるかどうかは明らかにされていない。そこで本稿は、木炭によるパッシブな調湿システムの温度差換気の有効性に関して検証を行う。

また、パッシブシステムの問題点、即ち、木炭ボード内湿気伝導速度の遅さがネックとなり、木炭ボードの厚みを増しても24時間という時間サイクルでは十分に吸湿の効果が得られないという課題を解決するための新たなシステムを提案する。このシステムはガラス管の中に木炭の粒子を充填し、ファンにより強制的に空気を通過させるというハイブリッドなシステムである。充填槽方式であれば空気と接する表面積が大きくなるために、吸湿速度の向上が期待できる。

最後に、木炭を用いた自然換気によるパッシブ調湿システムとハイブリッド調湿システムについて同じ気象条件下での数値シミュレーションによりその性能の比較を行う。

*1 ダイキン工業(株) 所属

*2 エネルギー環境共生工学部門

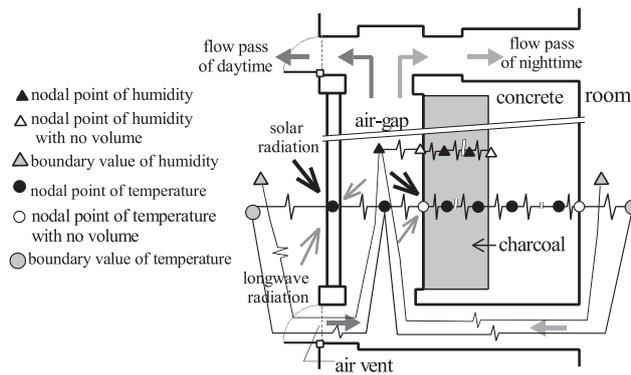


Fig.1 Schematic diagram of passive humidity controller.

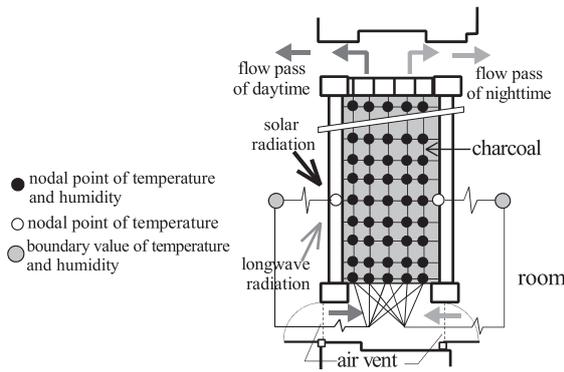


Fig.2 Schematic diagram of hybrid humidity controller.

2. 調湿システム

2.1 パッシブ調湿システムの概要

日射熱による木炭の乾燥と温度差換気による空気循環の仕組みを有するパッシブ調湿システム概念図を Fig.1 に示す。パッシブソーラーシステムとして広く知られているトロンプウォールの中空層側コンクリート表面に木炭ボードを貼付したものである。壁体に固定された木炭は夜間に水分を吸湿して室内空気の除湿を行う一方、日射を受け木炭ボードが高温となる昼間は換気経路を切り替え、夜間に蓄えた水分を屋外に放出し木炭の再生を行うという原理である。

パッシブシステムの基礎方程式を Table.1 に示す。木炭内で移動する水分は空隙に存在する水蒸気のみで、実質部に吸着した液水は移動しないと仮定すると、木炭ボードの奥行き方向の水蒸気および熱の輸送方程式は(1)式および(3)式で表される。尚、式に含まれている含水率の偏微分項である $\frac{\partial Q}{\partial X}$ と $\frac{\partial Q}{\partial T}$ については木炭の相対湿度－平衡含水率の関係（3.3 節で詳述）の実験結果を数値微分することで求める。また、中空層の水蒸気、熱、流量の収支式は(5)～(7)式で表される。圧力差 Δp は、中空層および中空層と連結された屋外もしくは室内（時間帯により換気経路はいずれかに切り替えられる）の空気密度が温度に伴い変化する

Table 1 Governing equations for passive humidity controller.

$$\left\{ \varepsilon_b \rho_f + \rho_c \frac{\partial Q}{\partial X_c} \right\} \frac{\partial X_c}{\partial t} = k_v \frac{\partial^2 X_c}{\partial x^2} - \rho_c \frac{\partial Q}{\partial T_c} \cdot \frac{\partial T_c}{\partial t} + V_{source} \quad (1)$$

$$V_{source} = h_D (X_f - X_c), \text{ for surface} \quad (2)$$

$$\left\{ \varepsilon_b \rho_f C p_f - l \rho_c \frac{\partial Q}{\partial T_c} \right\} \frac{\partial T_c}{\partial t} = \lambda_c \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + l \rho_c \frac{\partial Q}{\partial X_c} \cdot \frac{\partial X_c}{\partial t} + H_{source} \quad (3)$$

$$H_{source} = h (T_f - T_c) + \tau \cdot SR, \text{ for surface} \quad (4)$$

$$V_f \rho_f \frac{\partial X_f}{\partial t} = h_D (X_c - X_f) + \rho_f F (X_f - X_c) \quad (5)$$

$$V_f \rho_f C p_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = h (T_c - T_f) + h_i (T_g - T_f) + \rho_f C p_f F (T_{in} - T_f) \quad (6)$$

$$F = \alpha \cdot V_f \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_m}} \quad (7)$$

$$\rho_g C p_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \alpha \cdot SR + h_{out} (T_{out} - T_g) + h_i (T_f - T_g) \quad (8)$$

α : solar absorptivity [-], Cp : specific heat [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$], F : amount of ventilation per unit width of the system [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$], h : convective heat transfer coefficient [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$], h_D : vapor conductivity [$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1} (\text{kg/kg})^{-1}$], k_v : vapor conductivity [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} (\text{kg/kg})^{-1}$], l : specific latent heat [J kg^{-1}], Δp : pressure difference [N], Q : weight water content of charcoal [kg kg^{-1}], SR : amount of incidental solar radiation [W m^{-2}], T : temperature [K], t : time [s], V_f : distance between glazing and charcoal board [m], X_c : absolute humidity of pores of charcoal [kg/kg], x : position coordinate [m], α : flow coefficient, ε_b : porosity of charcoal [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$], λ : heat conductivity [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$], ρ : density [kg m^{-3}], τ : transmittance of solar radiation [-], subscript $-f$: air of void between glazing and charcoal board, $-c$: charcoal, $-g$: glazing, $-i$: inner side of glazing, $-in$: inflow air, $-out$: outside air

事を考慮して算出される。これにより、日射により加熱された中空層の温度差換気現象が再現される。

以上の式にガラスおよびコンクリートの1次元熱伝導方程式を連立させることで、システムの熱と水分の輸送過程が予測できる。

2.2 ハイブリッド調湿システムの概要

ファンを用いたハイブリッドな手法で木炭を室内空気の除湿に用いる方法として Fig.2 に示すシステムを想定する。粒状木炭を充填した管内（以下、「充填槽」とする）に空気を通過させることで、木炭の吸湿および放湿の速度を速めることを意図したもので、夜間には除湿を行い、昼間には日射エネルギーによる乾燥・再生を行うという原理はパッシブシステムと同一である。

ハイブリッドシステムの基礎方程式を Table.2 に示す。充填槽の空隙部空気の熱収支式は、空気の流れ (z) 方向の移流、流れと垂直 (x) 方向の熱伝導、結露による相変化熱を考慮し、(9)式で表される。木炭の熱収支式は x, z の2次元伝導および吸放湿による相変化熱を考慮し(11)式で表される。充填槽空隙部の水蒸気収支式は、 z 方向移流および木炭の吸放湿と空気の結露を考慮して(13)式で表現される。以上の輸送方程式に、充填槽

Table 2 Governing equations for hybrid humidity controller.

$$\rho_f C p_f \varepsilon_b \frac{\partial T_f}{\partial t} = \rho_f u C p_f \frac{\partial T_f}{\partial z} + \lambda_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + l \frac{\partial W}{\partial t} + H_{source,f} \quad (9)$$

$$H_{source,f} = h_c(T_c - T_f) + h_i(T_{g-in} - T_f), \quad \text{for surface} \quad (10)$$

$$\rho_c C p_c (1 - \varepsilon_b) \frac{\partial T_c}{\partial t} = \lambda_c \frac{\partial^2 T_c}{\partial z^2} + \lambda_c \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + l \cdot \rho_c (1 - \varepsilon_b) \frac{\partial Q}{\partial t} + H_{source,c} \quad (11)$$

$$H_{source,c} = h_c(T_f - T_c) + \tau \cdot SR, \quad \text{for surface} \quad (12)$$

$$u \frac{\partial C}{\partial z} + \varepsilon_b \frac{\partial C}{\partial t} + \gamma \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial W}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

$$\gamma \frac{\partial Q}{\partial t} = k_f a_v (C - C_s) \quad (14)$$

$$\rho_g C p_{g-in} \frac{\partial T_{g-in}}{\partial t} = h_{in}(T_f - T_{g-in}) + h_{room}(T_{room} - T_{g-in}) \quad (15)$$

$$\rho_g C p_g \frac{\partial T_{g-o}}{\partial t} = a \cdot SR + h_o(T_{out} - T_{g-o}) + h_{in}(T_f - T_{g-o}) + \varepsilon_g (AR - \sigma T_{g-o}^4) \quad (16)$$

AR : amount of atmospheric radiation [$W m^{-2}$], a_v : fraction of surface area of particles [m^{-1}], C : water vapor concentration [$kg m^{-3}$], C_s : water vapor concentration of particle surface [$kg m^{-3}$], k_f : overall mass transfer coefficient [$m s^{-1}$], u : wind speed [$m s^{-1}$], W : amount of condensate, ε : emissivity, γ : packing density [$kg m^{-3}$], σ : Stefan-Boltzmann constant [$W m^{-2} K^{-4}$], subscript $-g-in$: glazing adjacent to room, $-g-o$: glazing adjacent to outside air, $-room$: room air

Table 3 Controllable factors for numerical experiment.

Factor	Level 1	Level 2	Level 3
Direction of system	West-facing	South-facing	East-facing
Width of charcoal	0.02 m	0.04 m	0.06 m
Specification of inside wall surface	Without insulation	With insulation	

Hatched columns indicate standard condition.

の屋外側、室内側ガラス壁の熱収支式を連立させ、反復計算により解を求める。なお、流量は境界条件として時普遍一定値を付与している。

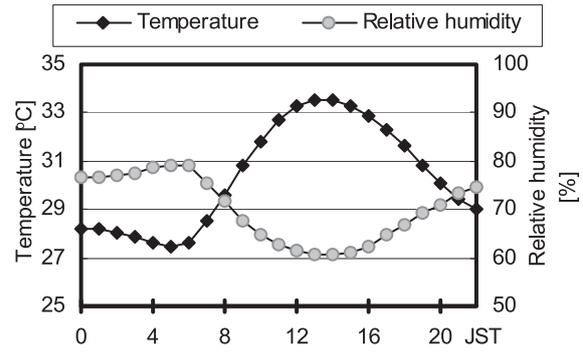
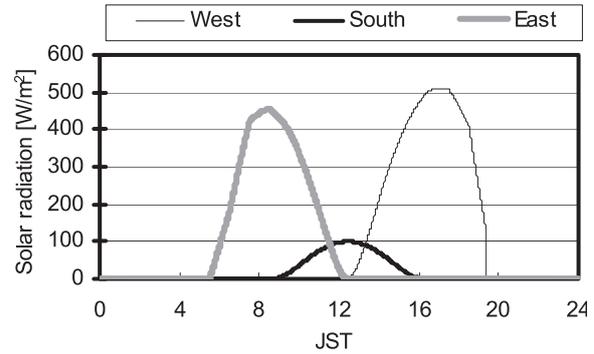
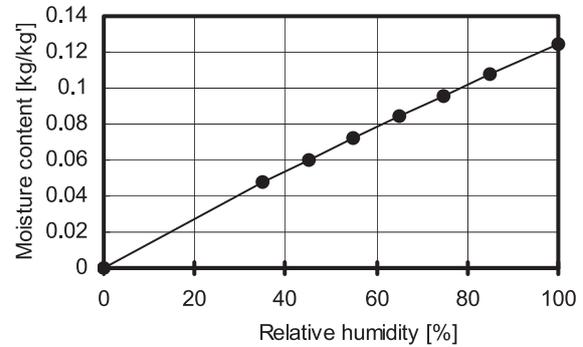
3. 数値実験概要

3.1 因子および水準

提案したパッシブシステムとハイブリッドシステムの吸放湿特性を比較検討するため、設計パラメータを様々に変化させて数値実験を行う。実験条件としては、Table.3に示すとおり、木炭ボードおよび充填槽の設置方位、木炭の厚み、調湿システム室内側表面の断熱の有無について各々2~3水準を考慮している。各因子の全水準の組み合わせ18通りに対して、2つの数値モデルにより各々計算を行った。

3.2 境界条件

福岡の夏季晴天日の標準気象条件⁵⁾を用いる。外気温度、外気相対湿度の経時変化をFig.3(a)に、ガラス壁を透過して調湿システム内部に到達する日射量の経時変化をFig.3(b)に示す。これらの気象要素の日変動を与えて繰り返し計算を行い、計算結果が日周期定常に達し

**Fig.3 (a)** Daily variation of outside condition.**Fig.3 (b)** Daily variation of transmitted solar radiation.**Fig.4** Equilibrium moisture content for various relative humidity.

た以降の1日間の計算結果を考察に用いている。なお、日周期定常解となるのに要した助走期間は、ハイブリッドシステムの場合は3日間、パッシブシステムの場合は木炭厚さ2cmで3日間、厚さ4cmで7日間、厚さ6cmで11日間である。

室内空気側の条件は、空気温度27°C、相対湿度80%で一定とした。また、午前5時~午後6時までは外気を、午後6時~翌後5時までは室内空気を取り入れるように換気経路の切り替え時間を設定している。

3.3 その他の計算条件

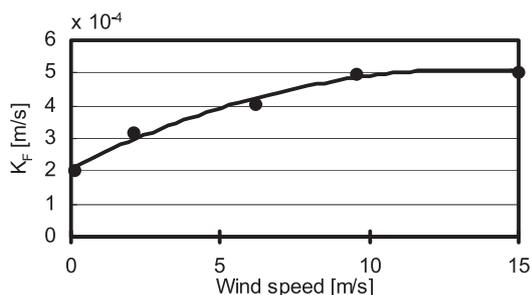


Fig.5 Estimated overall mass transfer coefficient K_F for various wind speed.

Table 4 Physical properties of charcoal used for simulation.

Parameter	Value
Specific heat [$J kg^{-1} K^{-1}$]	1.007×10^3
Density of completely dry charcoal [$kg m^{-3}$]	718.0
Heat conductivity [$W m^{-1} k^{-1}$]	0.07

数値実験に用いる木炭の物性値として、前田による粒径4mmの竹炭の平衡含水率曲線の実験結果⁶⁾に基づき、式(17)による近似式を用いる。

$$Q = k[RH]^\beta \tag{17}$$

Q : 含水率[kg/kg], RH : 相対湿度[-]

$$k=1.903 \times 10^{-3}, \beta=0.9084$$

木炭の境膜物質移動係数 (K_F) は、絶乾状態の木炭を充填したガラス管に湿潤空気を様々な流速 (2.1m/s, 6.2m/s, 9.6m/s, 15.0m/s) で通気して吸湿速度を測定した前田による実験結果⁹⁾を用いて、最小二乗法により同定している。なお、同定の際は木炭の空隙率を0.5と仮定している。得られた K_F と流速の関係をFig.5に示す。このグラフの多項近似式により、任意の流速に対する K_F を推定できる。

炭の物性値は文献⁷⁾に基づきTable.4の値を用いる。システム各部の厚みはガラス6mm, パッシブシステムの中空層10cm, コンクリート厚4cm, ハイブリッドシステムの充填槽長さ30cmとする。また、壁面傾斜角は 90° , ハイブリッドシステムの流速は0.1m/sとする。

4. 数値実験結果

標準ケース (Table.3で網掛けされている条件) における計算結果をFig.6に示す。Fig.6 (a)に示した炭表面温度については、パッシブシステムでは木炭ボードの中空層側表面、ハイブリッドシステムでは屋外側ガラス壁に接する点で、流れ方向の中央地点の数値である。西向きに設置された調湿システムの木炭部に直達日射が当たり始める12時頃から温度は急激に上昇し、それにより木炭は乾燥し含水率が減少しているのが分かる。

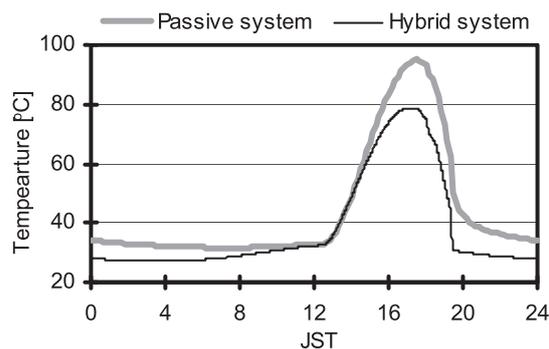


Fig.6 (a) Daily variation of surface temperature of charcoal.

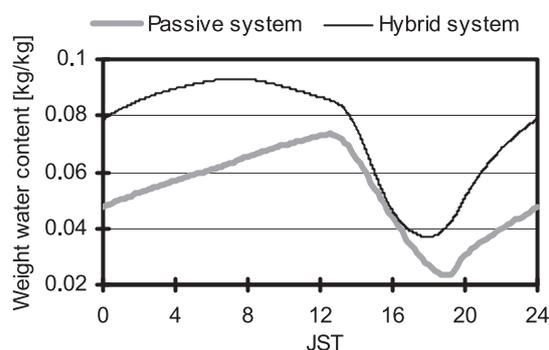


Fig.6 (b) Daily variation of weight water content of charcoal.

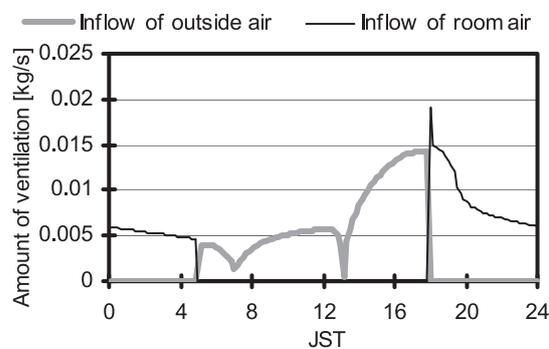


Fig.6 (c) Daily variation of amount of ventilation of passive system.

また、Fig.6(c)に示したパッシブシステムの中空層換気量を見ると、温度差により常時一定の換気量が保たれていることが分かる。日射が当たる時間帯は特に流量が大きく、ハイブリッドシステムの流量を上回る数値となっている。

次に、室内側のシステム壁表面が断熱無しの条件における、炭の日積算吸湿量をFig.7に示す。いずれの木炭ボード厚さにおいても吸湿量は西向き設置の場合が最大で、次いで東向き、南向きという順序となっている。これは、鉛直西向きでの入射日射量が最も大きく、

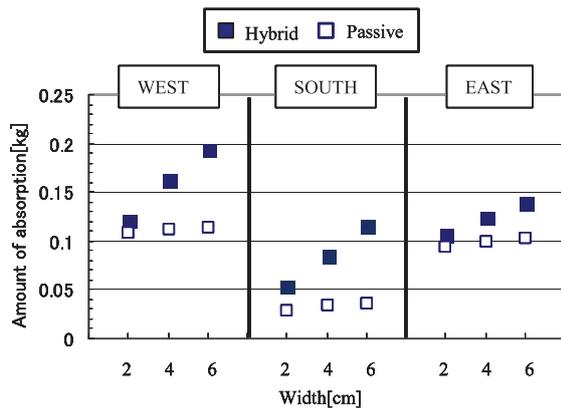


Fig.7 Amount of moisture absorption per a day under the condition of the inside wall with no-insulation.

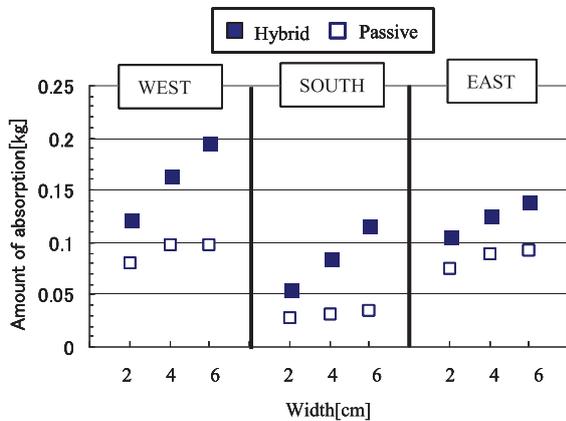


Fig.8 Amount of moisture absorption under the condition of the wall with no-insulation.

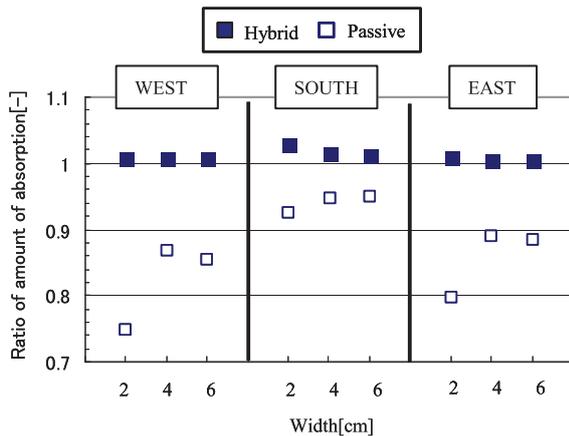


Fig.9 The comparison with insulated case and non-insulated case.

昼間の放湿が最も活発に行われるためであると思われる。また、ハイブリッドシステムでは木炭厚を増やすごとに吸湿量が増加するのに対し、パッシブシステムでは木炭厚を増やしても吸湿量はほとんど増加していない。ハイブリッドシステムでは木炭粒子空隙に通気

する方式を採っているため吸放湿速度が速い。これに対し、パッシブシステムは木炭ボード内部の空隙で水蒸気が拡散現象のみで伝導するため、24時間という吸放湿サイクルでは木炭厚の増加による湿気容量増加が有効に働かないと考えられる。

室内側のシステム壁表面が断熱された場合の日積算吸湿量をFig.8に、断熱有りの場合と断熱無しの場合の日積算吸湿量の比をFig.9に示す。これらから、ハイブリッドシステムでは断熱の有無は吸湿量に殆ど影響を与えないのに対し、パッシブシステムの場合は断熱を施すことで、いずれの設置方位、木炭厚さにおいても吸湿性能は低下している。特に、木炭厚が小さいほど、入射日射量の大きな条件ほど、吸湿量の低減は大きい。

次に、断熱による性能低下が最も著しかったパッシブシステムの西向き、木炭厚さ2cmの条件における、含水率と内部温度の日変化をFig.10およびFig.11に示す。室内側が断熱されたケースは昼間の日射熱が室内側に放散されず蓄熱されたため、夜間も温度が下がらず、結果として終日、断熱無しに比べ木炭温度は約10℃高い値となっている。木炭が高温となると、空隙部の相対湿度は低下し、木炭の平衡含水率も低下する。よって、断熱による木炭温度の上昇は、昼間の乾燥に対してはプラスの効果となるが、夜間については木炭の吸湿量を低減させる結果となったのであろう。

5. 結 言

建物壁面の一部にガラスカバー付きの木炭ボードを設置し、昼間は日射熱により木炭を乾燥し、夜間はガラスと木炭ボードの間の中空層に室内空気を流入させ除湿を行うというパッシブ調湿システムと、木炭を充填槽方式で壁面に設置するハイブリッド調湿システムの概要について述べ、その数値モデルの構築を行った。また、それらのモデルを用いた数値実験を行い、以下の知見を得た。

1. 提案したパッシブ調湿システムはファン動力を用いずに、日射熱による中空層内外温度差で十分な換気量が確保できる。
2. 夏季晴天の条件では、パッシブシステム、ハイブリッドシステムのいずれも、入射日射量が大きな西向き設置で日積算吸湿量は最大値を示した。また、ハイブリッドシステムでは木炭厚が大きいほど吸湿量も増加するが、パッシブシステムでは2cm以上に木炭厚を増やしても、吸湿量は増加しない。
3. パッシブシステムにおいて、室内側断熱とした場合、木炭が昼夜共に高温となるため、吸湿力の低下を招く。

謝 辞

本研究の一部は文部省科学研究費 若手(B) 建設廃棄物を原料とする木炭を用いたハイブリッド調湿システムの開発（代表 萩島理）に拠る。

参 考 文 献

- 1) 町田基, 春原聡, 森脇三郎, プラスチック廃棄物から調製した炭化物の調湿特性, 廃棄物学会論文誌, Vol.17, No.5, pp.322-330, 2006
- 2) 中西亜貴夫, 玉井元治, 棚田成紀, 中村武夫, 川崎直人, 木質系廃棄物を利用した強化調湿炭に関する研究, 廃棄物学会論文誌, Vol.16, No.1, pp.13-19, 2005
- 3) 萩島理, 谷本潤, 木質系廃棄物を利用した調湿システムに関する研究 -木炭の吸放湿特性に関する実験-, 空気調和衛生工学会 九州支部研究報告会, No.10, pp.1-4, 2003.5
- 4) 萩島理, 谷本潤, 前田和成, 木炭を用いたパッシブ調湿システムの性能評価のための数値解析, IBPSA-Japan 講演論文集 2005, pp.209-213, 2005
- 5) 社団法人空気調和・衛生工学会, 設計用最大熱負荷計算法, 丸善, 1999
- 6) 前田和成, 建設廃棄物としての炭を利用した室内空気のパッシブ調整システムの基礎的研究, 九州大学大学院総合理工学府 修士論文, 2005.3
- 7) 安部郁夫, 岩崎訓, 岩田良美, 古南博, 計良善也, 木炭の製造方法と吸着特性の関係, 炭素 No.185, 277-284, 1998

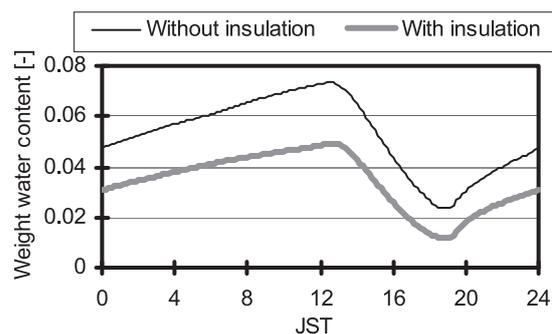


Fig.10 Daily variation of weight water content of charcoal.

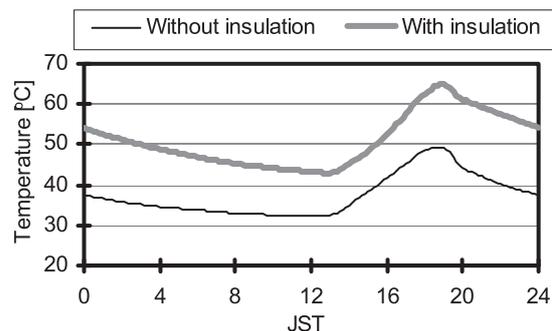


Fig.11 Daily variation of surface temperature of charcoal.