

## 数値計算による炭化物を用いたパッシブ調湿システムに関する検討

前田, 和成  
九州大学大学院総合理工学研究科環境エネルギー工学専攻

萩島, 理  
九州大学大学院総合理工学研究院エネルギー環境共生工学部門

谷本, 潤  
九州大学大学院総合理工学研究院エネルギー環境共生工学部門

<https://doi.org/10.15017/16727>

---

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 26 (2), pp.209-213, 2004-09. 九州大学大学院総合理工学府  
バージョン :  
権利関係 :

# 数値計算による炭化物を用いた パッシブ調湿システムに関する検討

前田 和成<sup>\*1</sup>・萩島 理<sup>\*2</sup>・谷本 潤<sup>\*2</sup>

(平成16年6月31日 受理)

## A Numerical Calculation Research on the Passive humidity controller system using a charcoal

Kazunari MAEDA, Jun TANIMOTO, Aya HAGISHIMA

<sup>†</sup>E-mail of corresponding author: es203188@cse.ec.kyusyu-u.ac.jp

A passive dehumidifier system utilizing charcoal chips produced from construction wastes was proposed. The most important point is that the system contains a regenerating cycle for vapor absorbed charcoal chips, which was comes form an expanded idea on Trombe Wall System. The system consists of a charcoal chips board, which is externally covered by a glass skin with a small air space. There are two ventilation paths either from a room to room or from an outside air to outside, which may be supported by mechanical fans. The former path is for the dehumidifying mode, when the charcoal chips board effectively absorbs room air vapor. Whereas, the latter is for the regenerating mode during daytime, when the solar radiation can restore the charcoal chips board. The authors established a numerical model of this system on a basis of the simultaneous hygrothermal transfer equations. Obtained numerical result shows a practical feasibility of the system and helps for a primary design under various situations.

Key words: carbine board, passive humidity controller system, numerical simulation, humidity conductivity

### 1. 諸 言

近年、日本の廃棄物問題は特に深刻な状況に置かれており、全廃棄物量の2割、最終処分量の5割を占める建設廃棄物の減量化は重要な課題となっている。中でも建設廃棄物の50%を占める型枠や木造住宅の端材などの木屑は、再使用・再利用が困難である上、プラスチック等の石油製品に比べ発熱量が小さいため、熱回収もあまり期待できない。そこで、木質系建設廃棄物を原料とする炭化物の吸着性能が注目を浴びており、様々な商品が開発されつつある。

以上の背景から本研究では、木質系建設廃棄物を原料とする炭化物をトロンブウォールに組み込むことで、日射授熱による放湿と室内空気の吸湿をサイクルとするパッシブな調湿システムを提案することを目的としている。本稿では、熱水分同時移動理論

に基づくパッシブ調湿システムの数値モデルを用いて、様々な設計条件下の調湿性能について数値実験を行った結果を報告する。

### 2. 数値モデルの概要

#### 2.1 計算モデルの概要

Fig.1 にシステムの模式図を示す。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ブ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システムを想定している。壁体に固定された炭化物は、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ダンパを切り替え、夜間に蓄えた水分を屋外に放出し炭化物の再生を行うという原理である。

#### 2.2 基礎方程式

木炭内の水分移動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

※1 環境エネルギー工学専攻修士課程

※2 エネルギー環境共生工学部門

Table 1 Physical properties of charcoal

Item	Value
Airspace rate	0.02 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Specific heat	1.0 × 10 <sup>3</sup> J/kgK
Density of completely dry charcoal	314.028 kg/m <sup>3</sup>
Heat conductivity	0.09 W/(mK)

Table 2 Factors and levels in the Variation study

Factor	Level		
	June	August	
Season	June	August	
Exposure	West	South	East
Absolute humidity of room air	10.46 g/kg <sup>*</sup> [50%]	12.6 g/kg <sup>*</sup> [60%]	14.75 g/kg <sup>*</sup> [70%]
Depth of charcoal board[cm]	1	2	3
The number of air changes[h <sup>-1</sup> ] <sup>(註3)</sup>	100	300	500

※1: A Shaded area indicates a standard condition.

炭の水蒸気および熱の1次元輸送方程式は(1)式及び(2)式で表される。

$$\left\{ \alpha \cdot \rho_{air} + \rho_{wall} \frac{\partial w}{\partial X_{WALL}} \right\} \frac{\partial X_{WALL}}{\partial t} = k_v \frac{\partial^2 X_{WALL}}{\partial x^2} \dots (1)$$

$$- \rho_{wall} \frac{\partial w}{\partial T_{WALL}} \cdot \frac{\partial T_{WALL}}{\partial t} + V_{source}$$

$$\left\{ \rho_a c_{pm, WALL} - l \cdot \rho_{wall} \frac{\partial w}{\partial T_{WALL}} \right\} \frac{\partial T_{WALL}}{\partial t} = \dots (2)$$

$$\lambda \frac{\partial^2 T_{WALL}}{\partial x^2} + l \cdot \rho_{wall} \frac{\partial w}{\partial X_{WALL}} \frac{\partial X_{WALL}}{\partial t} + H_{source}$$

$$V_{source} = h_D \cdot (X_{air} - X_{S, WALL}) \dots (3)$$

$$H_{source} = h \cdot (T_{air} - T_{S, WALL}) + SR \cdot \varphi_{GL} \cdot a_{WALL} \dots (4)$$

$$+ \varepsilon_{WALL} \cdot \varepsilon_{GL} \cdot \sigma \cdot T_{S, GL}^4 - \varepsilon_{WALL} \cdot \sigma \cdot T_{S, WALL}^4$$

尚、 $\frac{\partial w}{\partial X}$  と  $\frac{\partial w}{\partial T}$  については実験から得られた相対湿度-平衡含水率の関係式<sup>1)2)</sup>を数値微分することで求める。また、中空層の水蒸気及び熱の収支式は(5)式及び(6)式で表される。

$$V_{air} \cdot \rho_{air} \frac{\partial X_{air}}{\partial t} = h_D (X_{S, WALL} - X_{air}) + \rho_{air} Q (X_{in} - X_{air}) \dots (5)$$

$$V_{air} \cdot \rho_{air} c_{pm, air} \frac{\partial T_{air}}{\partial t} = h (T_{S, WALL} - T_{air}) + h (T_{S, GL} - T_{air}) \dots (6)$$

$H_{source}$ : 熱量の発生項 [W/m<sup>3</sup>],  $h_D$ : 湿気伝達率 [kg/m<sup>2</sup>s(kg/kg<sup>\*</sup>)],  $k_v$ : 湿気伝導率 [kg/ms(kg/kg<sup>\*</sup>)],  $l$ : 相変化熱 [J/kg],  $Q$ : 流量 [m<sup>3</sup>/s],  $SR$ : 入射日射量 [W/m<sup>2</sup>],  $t$ : 時刻 [s],  $T$ : 温度 [K],  $V_{source}$ : 水蒸気の発生項 [kg/m<sup>3</sup>],  $V$ : 体積 [m<sup>3</sup>],  $w$ : 乾燥重量基準含水率 [-],  $w_d$ : 平衡含水率(乾燥重量基準) [-],  $x$ : 座標 [m],  $X$ : 絶対湿度 [kg/kg<sup>\*</sup>],  $\alpha$ : 木炭ボードの空隙率 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>],  $\lambda$ : 熱伝導率 [W/mK],  $c_{pm}$ : 比熱

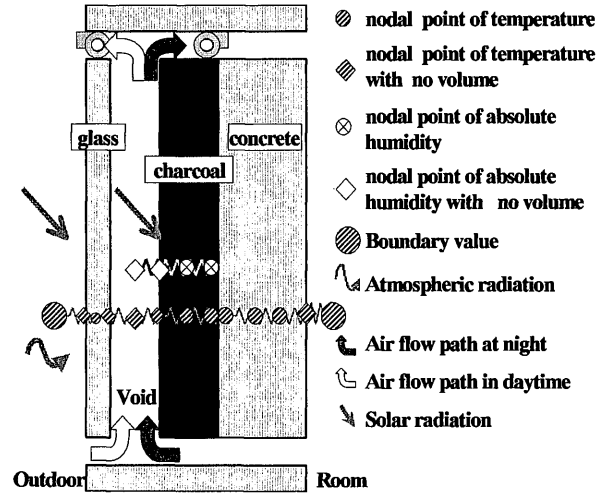


Fig.1 Schematic diagram of passive humidity controller

[J/kgK],  $\rho$ : 密度 [kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_{dry}$ : 木炭ボードの乾燥密度 [kg/m<sup>3</sup>],  $\psi$ : 日射透過率 [-],  $a$ : 日射吸収率 [-],  $\varepsilon$ : 長波放射率 [-],  $\sigma$ : ステファンボルツマン定数 [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]

添え字  $in$ : 流入空気,  $air$ : 中空層,  $WALL$ : 木炭ボード,  $S, WALL$ : 木炭ボード表面,  $GL$ : ガラス,  $S, GL$ : ガラス表面,

以上の(1)~(6)式及びガラス・コンクリートの1次元熱伝導方程式を連成させることで、システムの放湿-吸湿の特性が予測できる。炭化物内の物性値に関しては文献<sup>1)</sup>に基づき決定している (Table 1)。

### 2.3 数値実験概要

木炭ボードの吸放湿特性を効率よく室内調湿に活用するため、設計条件を様々に変化させた条件において室内空気吸湿量の日積算値を特性値とする数値実験を行う。実験条件としては、外部因子として湿気伝導率 0.001, 0.0001, 0.00001 kg/ms(kg/kg<sup>\*</sup>)の3水準を設定し<sup>注1)</sup>、各々について Table 2 に示す 5 因子を考慮している。Table 2 の 5 因子については、全因子を標準に設定した場合、及び、1 因子を標準以外の水準、残りの因子を標準に設定した場合について、湿気伝導率 3 種類に対し各 10 通り計 30 回の計算を行っている。

数値実験は、東京の夏期の晴天日を想定した気象要素の日変動を与え繰り返し計算を行い、各値が周期定常に達する日の結果を考察に用いる。湿気伝導率によって繰り返し計算回数は異なり、0.001 kg/ms(kg/kg<sup>\*</sup>)は 3 日目、0.0001 kg/ms(kg/kg<sup>\*</sup>)は 4 日目、0.00001 kg/ms(kg/kg<sup>\*</sup>)は 6 日目の結果を採用している。

日射量には、東京のアメダス気象データにおける 6 月・8 月の晴天日のデータを用いている。また、外気温は日平均 26℃、振幅 8℃の日周期とし、室温は 26℃で一定とした。また、日射の入射角の変化により、ガラスの日射透過率・反射率・吸収率は変化することを

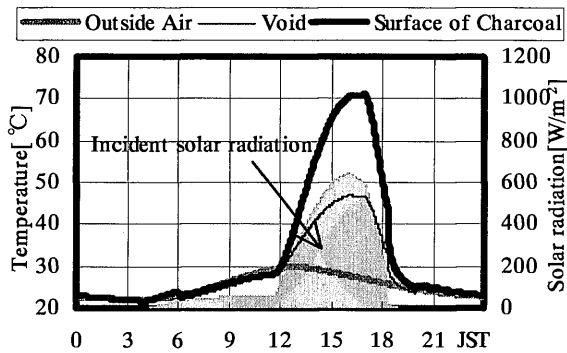


Fig.2(a) Daily variation of outside air Temperature and solar radiation

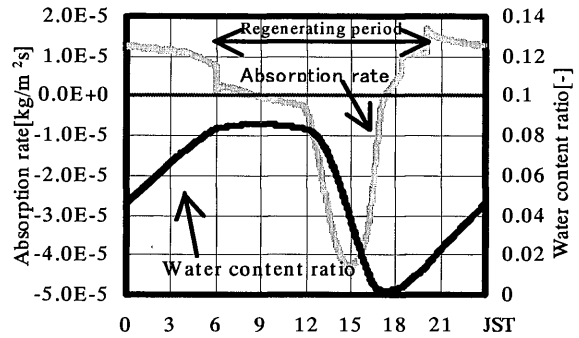


Fig.2(b) Daily variation of Water content ratio and absorption rate

←→Indicates the regenerating period when the released vapor from the charcoal is exhausted to the outside through the vent

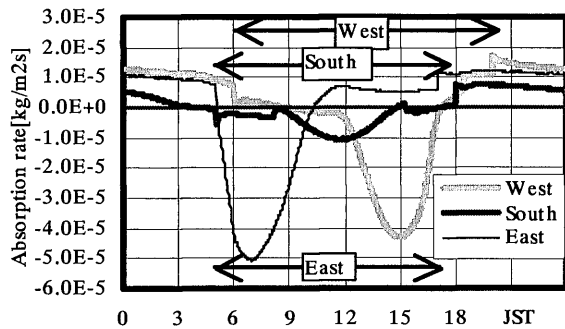


Fig.3 (a) Effect of exposure on absorption rate

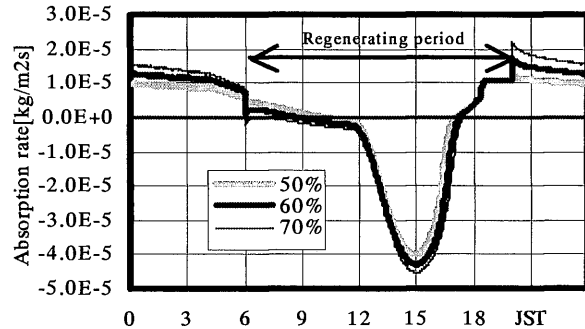


Fig.3 (b) Effect of relative humidity of room air on absorption

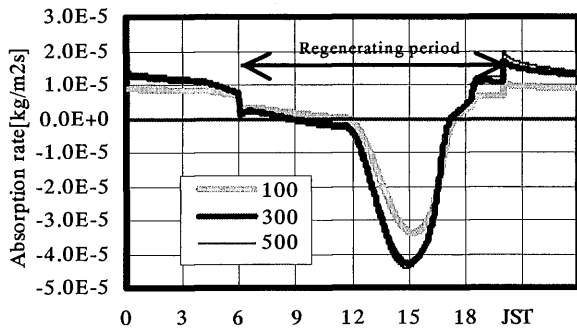


Fig.3 (c) Effect of the number of air changes on absorption rate

考慮に入れている。

換気経路の切り替え時刻については、各方位及び季節について終日外気取り入れを行うという条件での予備計算結果に基づき、1)木炭ボードが吸湿を行う 2) 室内空気の加熱を防ぐため、炭化物表面温度が(室内設定温度+2℃)を下回る、という 2 条件を満たす時間帯を室内空気流入運転としている<sup>注2)</sup>。尚、換気経路内のガラス・木炭ボードの対流熱伝達率は中空層の換気回数から得られる流速を、ユルゲスの式に代入して算定している。また、湿気伝達率は、ルイス則を仮定して対流熱伝達率から算定した。その他に、外気側対流熱伝

達率 18W/m<sup>2</sup>K、室内側は総合熱伝達率 8W/m<sup>2</sup>K とし、屋内側の放射計算は大気放射とガラス表面からの放射の授受を考慮している。部材の厚みはそれぞれ、ガラス 6 mm、中空層 5 cm、コンクリート 15cm とする。

### 3.数値実験結果

#### 3.1 システム各部の温度変動及び吸放湿特性

湿気伝達率 0.001kg/ms(kg/kg')の標準条件における各部の入射日射量、温度、含水率、吸湿量の日変動を Fig.2 に示す。

西側に直達日射が当たり始める正午頃から急激に木炭の含水率は低下し、放湿が行われていることが分かる。また、16 時頃から約 1 時間含水率がゼロの状態が続くことから、想定した木炭ボードの厚みに対して日射による乾燥のポテンシャルには余力があると考えられる。中空層と木炭ボードの温度差がなくなる 20 時に中空層には室内空気が流入する条件に切り替わり、吸湿量はピーク値を示した後、再び外気流入となる翌朝 6 時まで安定的に吸湿が行われている。

#### 3.2 結果・考察

Fig.3 に方位、室内湿度、換気回数に関して吸湿量の

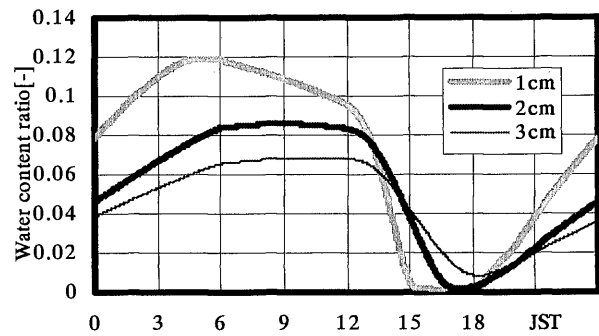
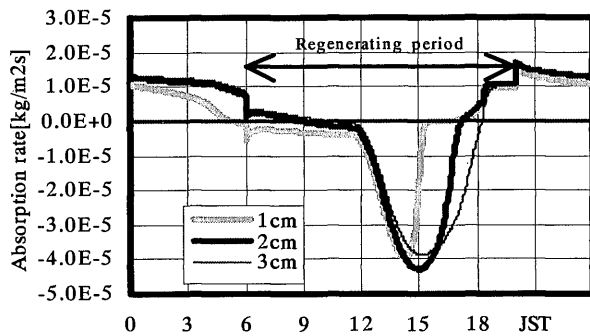


Fig.4 (a) Effect of depth of charcoal board on absorption rate

Fig.4 (b) Effect of depth of charcoal board on water content ratio

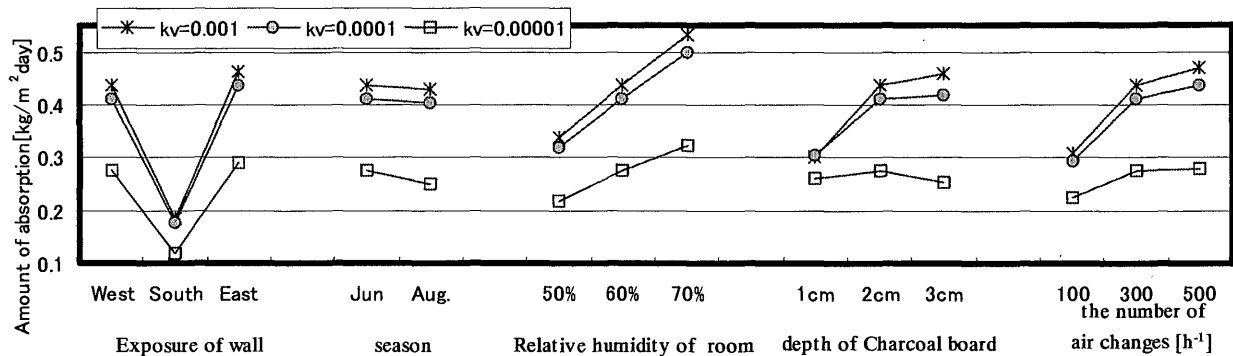


Fig.5 Effect of humid conductivity

日変動を比較して示す。方位については、西向き壁は日射の当たる12時から18時に放湿し、日没後に炭化物の温度が低下した後、速やかに室内空気の除湿が可能となるため、室内空気流入直後に吸湿量のピークは他の方位に比べ大きくなっている。しかし、中空層への室内空気の流入設定時間が短いため、日積算値では東向きがもっとも大きく、次いで西、南の順となる(後述 Fig.5)。

室内の設定湿度については、Fig3(b)から、湿度が最も高い70%の場合が最も良く吸湿しており、吸湿量と室内湿度の関係は概ね線形となっていることが分かる。

換気回数については、100回/hの場合、吸湿量が最も小さく、300回/h及び500回/hでは吸湿量に大差は見られなかった。このことから本条件では、中空層の換気回数は300回/h程度で十分効果があると考えられる。

次に、木炭ボードの厚みについて吸湿量・含水率を比較した結果を Fig.4 に示す。厚み1cmの吸湿量が最小となり、2cm、3cmと厚みが増すほど吸湿量は増加するが、比例関係ではないことが分かる。厚み1cmの場合、日射の当たる午後に急速に放湿を行った後、15時頃には含水率はゼロとなるため、炭の吸湿特性が十分に発揮されていないことが分かる。即ち、この条件では木炭ボードの厚みは2~3cm程度確保することが望ましいと考えられる。

湿気伝導率の異なる3条件について全因子の室内空

気吸湿量の日積算値を Fig5 に示す。いずれの因子の場合にも、湿気伝導率 0.001 kg/ms(kg/kg')と 0.0001 kg/ms(kg/kg')では日積算吸湿量に大きな差は見られないのに対し、0.00001 kg/ms(kg/kg')の場合は、それらの約65%~75%の小さな値になっている。

また、方位・季節・室内湿度については、因子内水準の変化に伴う吸湿量の変化は湿気伝導率の大小に関わらず、ほぼ類似の傾向を示している。

一方、木炭ボードの厚みについては湿気伝導率が0.00001kg/ms(kg/kg')の場合、それまで最も性能の良かった厚み3cmの吸湿量が最も小さな値となっている。これは、湿気伝導率が小さく、深部への湿気の伝導速度が遅いため、厚みの効果が弱まったためであると思われる。換気回数についても同様の傾向が見られる。0.00001kg/ms(kg/kg')の場合、換気回数を増やしても、吸湿量はほとんど増加しない。

以上の結果から、実際に本システムで吸湿を行う場合、湿気伝導率の大きな木炭ボードを使用する、若しくは、木炭ボード内に空気流通のための空隙を設け、内部への湿気の移動を促進させる対策が必要と思われる。

#### 4. 結言

炭化物を用いたパッシブ調湿システムの数値実験を行い、以下の知見を得られた。

1. 本システムの吸湿性能に及ぼす、木炭ボードの湿気伝導率の影響は大きく、 $0.00001\text{kg/ms}(\text{kg/kg}')$ の場合の吸質量は、他の湿気伝導率2種類のそれに比べ約65%~75%と小さい。また、木炭ボードの最適厚も湿気伝導率により異なる。
2. 方位・季節・室内湿度については、因子内水準の変化に伴う吸湿量の変化は、湿気伝導率の大小に関わらず、ほぼ類似の傾向を示している。
3. 夏期晴天の条件では、日積算吸湿量については東向き壁、単位時間あたり吸湿量のピーク値は西向き壁が高い値を示した。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 安部郁夫、岩崎訓、他3名、木炭の製造方法と吸着特性の関係、炭素No185 277-284, 1998
- 3) 機械学会編、伝熱工学資料、丸善、p. 321

#### 謝辞

本研究の一部は旭硝子財団平成14年度研究助成に拠る。ここに記して感謝の意を表する。

注1) 筆者らは本研究に先立ち複数の木炭について絶対湿度ステップ励振に対する含水率の単位応答の測定を行い、1)2)式に基づく熱水分同時移動の解析により、湿気伝導率の同定を行った。しかし、サンプルデータの種類により同定結果は $10^3$ オーダーではらつきがみられたことから本稿では外部因子として湿気伝導率を取り上げている。

注2) 各方位の室内空気流入時間は、西向き壁20時~6時、東向き壁17時~5時、南向き壁18時~5時とした。

注3) 奥行4mの室の一面に中空層を設けた場合、中空層の換気回数100回/hは室容積に対して1.25回/hに相当する。