各種建築材料および吸着材の水蒸気およびホルムアルデヒド吸着等温線の測定

MEASUREMENTS OF ADSORPTION ISOTHERM OF VARIOUS BUILDING AND ADSORPTION MATERIALS

安宅 勇二*, 加藤 信介**, 徐 長 厚***, 朱 清 宇****, 長谷川 あゆみ*****

*Yuji ATAKA, Shinsuke KATO, Qingyu ZHU,
Jang-Hoo SEO and Ayumi HASEGAWA*

It is very important to evaluate the adsorption and desorption property of the building materials for the indoor air pollution problem. Recently the adsorption materials and the adsorptive building materials that reduce the indoor air pollutant concentration are developed and become to be used in Japan. The test method concerning the continuous efficiency is not so examined though the test method concerning the concentration reducing performance of the adsorptive building materials is examined. It is thought that the measurement of the adsorption isotherm is effective to evaluate the continuous efficiency because there are a lot of the adsorption materials using the physical adsorption and the chemical adsorption for the adsorptive building materials. However, there are not a lot of examples of measuring the adsorption isotherms of the building material and the adsorption materials.

In this paper, two methods of the adsorption isothermal measurement are examined. The first measuring method is an examination with the adsorption amount weighing device with a magnetic suspension balance (MSB), and another is an adsorption breakthrough capacity method. The adsorption isotherms of various building materials and the adsorption materials are measured by these two measuring methods. First of all, the water vapor adsorption isotherm of each material was measured by MSB, and the water vapor adsorption characteristic was verified. Afterwards, formaldehyde (HCHO) adsorption isotherm was measured by MSB and the adsorption breakthrough capacity method.

The measurement of the water vapor adsorption isotherm with MSB was a very easy and a useful measuring method. Moreover, the adsorption breakthrough capacity method was able to measure in a short time and was able to measure the HCHO adsorption isotherm easily.

Keywords : *Adsorption isotherm, Building materials, Adsorptive building material, Adsorbent, Water vapor, Formaldehyde*

吸着等温線、建築材料、パッシブ吸着建材、吸着材、水蒸気、ホルムアルデヒド

1. 序

本研究は、各種建築材料および吸着材の水蒸気およびホルムアルデヒド (HCHO) の吸着等温線の測定法を検討し、その実用的な有用性を検証するものである。

室内空気汚染問題を解明する上で、空気中の揮発性化学物質の建築材料などに対する吸着・脱着性能が、室内化学物質濃度に少なからず影響を与えることから、この性状を把握することは重要である¹⁻⁴⁾。また、最近では室内空気汚染濃度を低減する吸着材や吸着建材 (パッシブ吸着建材) が開発され、利用されるようになってきている⁵⁻⁸⁾。パッシブ吸着建材の濃度低減性能に関する試験法は検討されている⁹⁻¹²⁾。しかしながら、濃度低減性能の持続性能に関する試験法は必ずしも確立されていない。本来なら、パッシブ吸着建材の濃度低減性能の持続性能は、性能低下が見られるまで試験を継続することが理想である。しかし、濃度低減性能が数年にわたり持続する場合などは、試験を継続することは労力、コストなどを考えた場合、非常に困難である。そこで、簡易に持続性能を予測できる方法として、実際の室内濃度付近 (例えば厚生労働省指針値程度) での飽和吸着量を求めることで、濃度低減性能の持続性能が予測できると考えられる。また、持続性能を評価する上で、パッシブ吸着建材は物理吸着や化学吸着 (化学反応) を利用したものが多くことから、室

内化学物質空気汚染が問題となる比較的低濃度領域の吸着等温線の測定が有効であると考えられる。しかしながら、建築材料・吸着材などの吸着等温線の測定例は必ずしも多いとはいえない¹⁴⁻¹⁷⁾。

本報では吸着等温線測定法として、① 磁気浮遊天秤を用いた吸着量測定装置 (MSB) による試験、② 吸着破過試験について検討し、各種建築材料・吸着材の吸着等温線の測定を行い、その基礎的な検討を行なう。その検討はまず、MSB により水蒸気吸着等温線が測定可能であるか検討した後、各試料の水蒸気吸着特性を確認する。これは、HCHO 吸着等温線測定時に水蒸気吸着の影響を把握するための基礎データともなる。また、水蒸気吸着等温線の測定法に関しては、JIS A 1475-建築材料の平衡含水率測定方法に規定されているが¹⁸⁾、新たな水蒸気吸着等温線の測定法の一つとしての有効性も検討する。その後、MSB および吸着破過試験にて水蒸気存在下でのホルムアルデヒドの吸着等温線を測定した結果を示し、室内化学物質空気汚染が問題となる比較的低濃度域での実用性を検討する。

2. 吸着量測定方法概要

吸着等温線は、等温状態で吸着材に吸着される質量を測定することにより得られる。この原理により測定を行なうものに重量法がある¹⁹⁾。これは吸着材を被吸着物質の蒸気中で平衡させ、その重量

* 吉野石膏(株) 工修

** 東京大学生産技術研究所 教授・工博

*** 東京大学大学院 大学院生

**** 東京大学生産技術研究所 博士研究員・博士(工学)

***** 俣住化学分析センター

Yoshino Gypsum Co., Ltd., M. Eng.

Prof., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

Graduate Student, Tokyo University

Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Ph. D.

Sumika Chemical Analysis Service Co., Ltd.

測定により吸着量を求める。これは大気中の成分 (O_2 , N_2 など) の吸着が無視できる場合に気中に一定濃度の被吸着ガス成分を混合し、その重量を測定する方法で行なわれる。これは測定を大気圧下で行なうことができ、便利な方法となる。吸着材の吸着は、一般に大気圧下の空気中の雰囲気での値が問題となるため、吸着等温線の測定は、このような状況下での直接測定が望ましいと考えられる。

2.1 磁気浮遊天秤 (MSB) を用いた吸着等温線測定法

磁気浮遊天秤を用いた方法は、大気圧下で温度一定で一定湿度の空気もしくはそうした調整空気中に $HCHO$ ガスを一定濃度混合したものを磁気浮遊天秤のサンプルセルに一定量流通させる。吸着による重量変化を吸着平衡にいたるまで直接測定することで、建材・吸着材に対する吸着量 (吸着等温線) を測定する方法である。測定に使用する磁気浮遊天秤を図 1 に示し、基本仕様を表 1 に示す。磁気浮遊天秤の最大の特徴は、重量変化を無接触磁気浮遊状態により測定できることである。重量測定部 (天秤) がサンプルセルと切り離され、気流や外部振動によるゆらぎがなく、測定雰囲気にさらされていないため、腐食性ガスにも対応可能な重量変化測定システムとなっている。

2.2 吸着破過試験法

同じく大気圧下での吸着材の吸着量測定方法のひとつに、吸着破過試験がある^{※ 20-23)}。これは吸着材を粉砕し、ガラス管などに充填した吸着材充填層に一定温度、一定濃度、一定流量の汚染ガスを含む流体を供給し、吸着量を求める方法である。吸着破過試験装置図を図 2 に示す。充填層内での吸着は、流体流れ中の吸着質 (汚染物質) の軸方向拡散 (吸着により流れ方向に濃度が低下し、濃度差による物質移動、つまり分子拡散が生じる) および流体流れから吸着材表面への物質移動速度に影響を受ける。後者の物質移動速度は、吸着材粒子近傍の境界物質移動 (境界層における物質移動) と吸着材粒子内の拡散抵抗の二つ要因で決定される。流れが極めて遅い場合の充填層内の流体の流れは層流となり、流体境界 (境界層) は考えにくいので、層流域 (低流速) で試験を行なうことが重要である。図 3 に示すように、ある時間が経過すると、入口からある点までが、① 吸着平衡に達した部分、② 吸着が進行している部分 (吸着帯)、③ 未吸着層部分に分けられる。②の吸着帯は、流通時間 (流通量) とともにしだいに下流側に移っていく。したがって、出口での汚染ガスの濃度を測定すると、一般に時間に対し S 字状の曲線が得られる。出口における汚染ガス成分の濃度と時間との関係を破過曲線とよぶ。また、図 3 の点 B_1 の濃度に達したときを破過点といい、点 B_1 における濃度 C_B を破過濃度とよぶ。このときの、吸着量 B は、式(1)となる^{※ 20)}。

$$B = \frac{C \times F \times t}{1000 \times M} \quad (1)$$

ここで、 B : 吸着量 [$\mu\text{g/g}$], C : 入口濃度 [$\mu\text{g/m}^3$], F : 流量 [l/min], t : 破過濃度 C_B 到達時間 [min], M : 試料質量 [g] である。

3. 測定方法

3.1 測定試料および試験項目

表 2 に測定試料および試験項目を示す。せっこうボード (GB) などの一般的な建築材料および調湿建材を対象とした。吸着材として活性炭 (AC) のほか、室内汚染空気を浄化するといわれてい

図 1 磁気浮遊天秤 (MSB)

表 1 MSB の装置基本仕様

使用ガス	H_2O / Air or $HCHO$ (VOCs) / Air
最大サンプル量	15g 以下
重量測定分解能	10 μg
重量測定再現性	$\pm 20\mu\text{g}$

図 2 吸着破過試験装置

図 3 充填層における吸着量分布および破過曲線

表 2 測定試料および試験項目

測定試料	記号	MSB		破過試験
		水蒸気	$HCHO$	
せっこうボード	GB	○	○	○
ロックウール(天井板)	RW	○	×	×
ケイカル板	CSB	○	×	×
珪藻土入りせっこうプラスター	DGP	○	×	×
吸放湿性せっこうボード	SGB	○	×	×
多孔質セラミックス調湿建材	HPC	○	×	×
活性炭(試薬)	AC	○	×	○
備長炭	BC	○	×	○
竹炭	TC	○	×	○
$HCHO$ 吸収分解せっこうボード	HGB	×	×	○

る備長炭 (BC) や竹炭 (TC) を試料とした。またパッシブ吸着建材として、HCHO 吸収分解せっこうボード (HGB) を試料とした^{注 1)}。

3.2 測定条件

3.2.1 MSB による水蒸気吸着等温線

表 3 に測定条件を示す。測定温度は 23℃ とし、相対湿度は 0～90% の範囲とした。湿度の設定は、MSB 内で加湿空気と乾燥空気の混合により行なう。また、測定時には MSB 装置内の湿度計による実測値が設定値の±0.2%の範囲となるよう混合比が自動フィードバック制御される。湿度計の精度は±2%RH である。測定試料は 1mm 以下に粉碎して測定を行なった^{注 2)}。

3.2.2 MSB による HCHO 吸着等温線

GB の原紙を取除き、芯材であるせっこう部分のみを 1mm 以下に粉碎した^{注 2)}。測定温度は 23℃ とし、相対湿度はできる限り水蒸気吸着の影響が少ない 2.5% とした (表 3)。HCHO は 50ppm (N₂ ベース) を純空気 (G1 Grade) で所定濃度に希釈した。

3.2.3 吸着破過試験による HCHO 吸着等温線

試料を 0.5～1.0mm に粉碎し^{注 2)}、内径 6.0×10^{-3} m、長さ 2.0×10^{-1} m のパイレックス製ガラス管に充填した。ガラス管の両端には、試料を押さえるために石英ウールを充填した^{注 3)}。測定条件を表 4 に示す。温度は 28℃ とした。試料の水蒸気吸着の影響を避けるため、相対湿度は水分除去装置通過後の 11～12% とした。HCHO は 20ppm (N₂ ベース) を清浄空气中で所定濃度に希釈した。設定流速 (流量) ならびに破過濃度 C_B は、ASTM D 6646 - 01 を参考とし^{注 20)}、 $v = 4.78 \times 10^{-2}$ m/s ($F = 0.08$ l/min) ならびに入口濃度 C に対して 0.5% 破過時の濃度とした。はじめに、活性炭 (AC) を用いて吸着破過試験による吸着量のバラツキの確認試験を行なった。その後、表 2 に示す各試料の吸着破過試験を行なった。ただし、GB、HGB に関しては、原紙あり (記号: P) と原紙なし (芯材のせっこうのみ) の条件で試験を行なった。

3.3 測定方法

3.3.1 MSB による水蒸気吸着等温線

乾燥後の試料を MSB に設置し、表 3 の測定条件で水蒸気吸着量測定を開始する。一定温度で MSB のサンプルセル部分に設定相対湿度に調整された空気を流通させ、吸着平衡に到達するまで重量測定を繰り返す。平衡重量に到達後、順次設定湿度での吸着平衡量を求め吸着等温線を測定する。同様に脱着等温線の測定も行なう。

3.3.2 MSB による HCHO 吸着等温線

3.3.1 と同様、MSB に試料設置後、表 3 の条件で HCHO 吸着量測定を開始する。はじめに設定相対湿度 2.5% で平衡重量とさせる。水蒸気吸着平衡到達後、順次設定 HCHO 濃度での平衡吸着量を求め、HCHO 吸脱着等温線を測定する (相対湿度は 2.5% 一定)。

3.3.3 吸着破過試験

試料をガラス管に充填後、所定濃度の HCHO ガスを供給する。試料質量 M 、入口濃度 C 、破過濃度 C_B 、破過時間 t を測定し、吸着量 B を求める。入口 HCHO 濃度の測定は DNPH カートリッジにより空気捕集し、高速液体クロマトグラフ (HPLC) により定量する。また、出口側の HCHO 濃度は C_B を検出するために連続測定する必要がある。そのため、連続測定可能な HCHO 簡易測定器を使用する。本試験に使用した HCHO 簡易測定器は、定電位電解法を原理として

表 3 MSB 測定条件^{注 4)}

	水蒸気	HCHO
温度 [°C]	23	23
相対湿度 [%]	0～90	2.5
湿度平衡判断値 [%]	±0.2	±0.2
重量平衡判断値 [g/s]	$10^{-6}/120$	$10^{-6}/3600$
重量平衡時間 [s]	3600	3600

表 4 吸着破過試験測定条件

温度 [°C]	28
相対湿度 [%]	11～12
流速 v [m/s] (流量 F [l/min])	4.78×10^{-2} (0.08)
破過濃度 C_B	入口濃度 C に対し 0.5% 破過時の濃度

図 4 測定経過時間と吸着量の変化 (AC)

いる^{注 5)}。一般に簡易測定器は、共存ガスの影響を多大に受けるので、吸着破過試験を行なう前に DNPH との相関関係を確認している。

4. 実験結果および考察

4.1 MSB による水蒸気吸着等温線

図 4 に測定経過時間と吸着量の変化の例として、活性炭 (AC) の場合を示す。図 4 右上の拡大図からもわかるように、ある相対湿度で吸着平衡に到達した後に、次の相対湿度条件での測定が行なわれていることが確認できる。

各試料の水蒸気吸着等温線の測定結果を図 5 (a)～(i) に示す。全ての試料で吸着等温線と脱着等温線が等しくならないヒステリシス現象を示した。活性炭 (AC: 図 5(g)) および竹炭 (TC: 図 5(i)) は、文献とほぼ同じ水蒸気吸着特性 (等温線) が得られた^{注 24,25)}。これより、MSB による水蒸気吸着等温線の測定は妥当なものと考えられ、水蒸気吸着等温線測定法としては有効である。

AC は他の試料よりも水蒸気吸着量が非常に大きいことがわかった。AC は相対湿度 50% 前後で急激に水蒸気吸脱着量が変化した。一方、せっこうボード (GB: 図 5(a)) は測定試料中で最も水蒸気吸着量が少なかった。しかしながら少ないというものの、相対湿度 90% 時の吸着量は約 20mg/g ある。このように水蒸気吸着量が少ない材料でも、汚染化学物質吸着量測定を行なう場合は、水蒸気吸着の影響に注意が必要なることを示唆している。また、各建材は相対湿度が 70% 程度から吸着量が増加する傾向がみられた。特に調湿建材は、高湿度域での吸着量の増加が顕著にみられた (図 5(d)～(f))。これは調湿建材に配合されている珪藻土などの吸放湿材料の特性のためと

図5 MSBによる水蒸気吸着等温線

考えられる。備長炭（BC：図5(h)）およびTCといった炭化物を用いた吸着材はACと異なり、低湿度域から水蒸気吸着量が増加する傾向があった。ただし、BCやTCの場合、ACのように工業製品ではない。製造者毎により炭化温度や細孔分布などの性状が異なるなど品質が一定でない可能性があり、常に同じ吸着性能を有するかは不明である。今後、様々な炭類を測定し、統計的に吸着特性を検討する必要がある。

以上、水蒸気吸着等温線の測定結果より、mg/g オーダーの水蒸気が吸着することから、重量変化より汚染化学物質の吸着量を求める方法は、水蒸気の影響に十分注意する必要がある。すなわち、汚染化学物質吸着量が水蒸気吸着量を無視できるほど大きくない限り、重量変化から汚染化学物質吸着量を測定することは不可能となる。

4.2 MSBによるHCHO吸着等温線

図6にGBのHCHO吸着等温線を示す。HCHO吸着等温線測定には1ヶ月以上の非常に長期間を要した。等温線はヒステリシス現象が見られ、脱着時に初期重量に戻らない現象が見られた。この原因として、吸着されたホルムアルデヒドの一部がGB内に含有される微量金属元素などの触媒作用によって分解されるなど、材料内で化学的に固定化されてしまっていることも考えられる。しかし、原因の特定ができておらず、今後の検討課題である。また図5(a)より、GBは他の試料よりも水蒸気吸着量が少ないもののmg/gオーダーである。一方HCHO吸着量は $\mu\text{g/g}$ オーダーである。これよりHCHO吸着量測定に際し、水蒸気吸着量の変動が大きく影響し、HCHO吸着量の測定が困難な場合があることを示唆している。すなわち、HCHO吸着量に対し水蒸気吸着量が無視できない場合、重量変化から

HCHO 吸着量を測定することは不可能となる。今回の GB の測定では HCHO 吸着量が少なく測定が困難であり、今後 HCHO 吸着量が多いと思われる材料に関して検討する必要がある。

4.3 吸着破過試験による HCHO 吸着等温線

図 7 に DNPH カートリッジによる HCHO 濃度と HCHO 簡易測定器による HCHO 濃度との関係を示す。本研究で用いた HCHO 簡易測定器は、DNPH との直線関係が得られ、共存ガスが存在しなければ HCHO 濃度のモニタリングには十分使用可能と判断した。

表 5 に活性炭 (AC) の吸着量 B のバラツキ試験の結果を示す。設定流速 (流量) は ASTM D 6646-01 の設定値 $v=4.78 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ (0.08 l/min) よりやや大きいものの、 σ_{n-1} が $0.08 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ と試験毎のバラツキは小さかった。また、試験中の流速変動は見られなかった。しかし、より安定した試験を行うためには、今後試験毎の流速が一定となるよう装置の改良も必要と思われる。吸着量 B の σ_{n-1} も $5.2 \text{ } \mu\text{g/g}$ と小さく、試験毎のバラツキはあまりないと考えられる。

吸着破過試験による破過曲線の一例を図 8 に示し、HCHO 吸着等温線を図 9(a)~(f) に示す。吸着破過試験は測定時間が比較的短時間であり、吸着量測定法としては簡便な試験法と考えられる。

パッシブ吸着建材である HCHO 吸収分解せつこうボード (HGB : 図 9(e)) は、せつこうボード (GB 図 9(d)) に比べ HCHO 吸着量が非常に大きかった。原紙を含有した試験 (記号 : P) では、原紙を含まない場合よりもわずかに吸着量が増加する傾向があった。HGB は化学吸着が支配的であるため、HCHO 濃度に対する飽和吸着量に大きな変化はなかった。竹炭 (TC) の HCHO 吸着量は、他の試料よりも非常に大きかった。これは TC の細孔分布特性だけでなく、TC 中に含有している成分元素が吸着に大きく影響していると思われる。藤原らは炭化物中の元素分析を行なっているが²⁵⁾、竹類は樹木類に比べ、K (カリウム) ならびに Mg (マグネシウム) を多く含み、Ca (カルシウム) 分は樹木類と同程度含有されていることを報告している。特に竹炭は K 分が多く、弱アルカリ性を示すとしている。ホルムアルデヒドはアルカリを作用させると、カニツァロ反応といわれる反応を起こし、ギ酸とメタノールを生成することが知られている。また、塩基触媒で数分子が重合して糖の混合物 (モルホース) が得られるとされている²⁶⁾。これらの反応によっても TC の吸着量が増加している要因の一つと思われるが、他の要因も考えられるので、今後数種類の TC での測定を行い、吸着量増加の要因を検討する必要がある。一方、本研究で用いた備長炭 (BC) は、GB と同程度に吸着量が小さかった。

ここで、厚生労働省指針値である $100 \mu\text{g/m}^3$ 時の HCHO 吸着量予測値を求めると、表 6 となる。吸着破過試験より HCHO 吸着量を求める方法は、出口濃度を計測するための簡易測定器の検出下限値が $10 \mu\text{g/m}^3$ のため、ある程度入口濃度を高濃度とした条件で試験を行ない、破過濃度 C_B を計測することになる。その結果から吸着等温式などを利用し、室内化学物質汚染が問題となっている低濃度域での吸着量を予測することになる。この際、物理吸着支配の試料は、Langmuir 式より求めた²⁷⁾。また HGB は化学吸着が支配的で直線関係が得られるので、 $100 \mu\text{g/m}^3$ 時の吸着量は外挿して求めた。HGB の $100 \mu\text{g/m}^3$ 時の吸着量 B を求めると、 $60 \sim 70 \mu\text{g/g}$ となった。これより、 $100 \mu\text{g/m}^3$ 時の吸着量は化学吸着する HGB が大きく、物理吸着支配の場合は、 $10 \mu\text{g/g}$ 以下と予測された。

図 6 MSB による HCHO 吸着等温線

図 7 DNPH カートリッジと HCHO 簡易測定器の関係

表 5 AC の吸着量 B のバラツキ試験結果

No.	流速 v [$\times 10^{-2} \text{ m/s}$]	流量 F [l/min]	入口濃度 C [$\times 10^3 \mu\text{g/m}^3$]	吸着量 B [$\mu\text{g/g}$]
1	5.01	0.085	3.55	97.0
2	4.83	0.082	3.74	92.3
3	4.83	0.082	3.87	104.4
4	4.83	0.082	3.83	99.2
5	4.89	0.083	3.95	92.0
平均	4.88	0.083	3.79	97.0
σ_{n-1}	0.08	0.001	0.15	5.2

図 8 破過曲線 (HGB, $C=6.49 \times 10^3 \mu\text{g/m}^3$ の場合)

また、吸着破過試験での GB の吸着量は MSB に比べ、非常に小さかった。これは水蒸気吸着の影響の有無があったためと思われる。このように MSB のような重量変化で HCHO の吸着量を測定するには、水蒸気吸着の影響が無視できず HCHO 吸着量の測定が困難な場合がある。一方吸着破過試験では、出口濃度を計測することによって吸着量を求めるので、水蒸気による吸着量変化の影響を受けにくく、実験手順も簡単であり、比較的短時間で測定が行なえることから、実用的な測定法である。

図9 吸着破過試験によるHCHO吸着等温線

5. 結論

磁気浮遊天秤を用いた吸着装置 (MSB) による試験および吸着破過試験により、建築材料、吸着材の水蒸気およびHCHOの吸着等温線を測定し、基礎的な検討を行なった。MSBによる吸着等温線測定では、

- (1) 水蒸気吸着等温線は、他の測定例と比較して十分に測定可能なものであった。これより、MSBを用いた水蒸気吸着等温線測定法は、有用な測定法である。また、他の建築材料などに対してMSBでの水蒸気吸着等温線測定を行なえば、有用な基礎的データとなる。
- (2) 水蒸気吸着等温線の測定結果より、mg/g オーダーの水蒸気が吸着することから、重量変化より汚染化学物質の吸着量を求める方法は、水蒸気の影響に十分注意する必要がある。すなわち、汚染化学物質吸着量に対し水蒸気吸着量が無視できない限り、重量変化から汚染化学物質吸着量を測定することは不可能である。
- (3) 吸着等温線と脱着等温線が等しくならないヒステリシス現象を示した。
- (4) 活性炭の水蒸気吸着量は大きく、相対湿度 50%程度から急激に吸着量が増加した。また、各建材は相対湿度が約 70%付近から水蒸気吸着量が増加した。

また、吸着破過試験でのHCHO吸着等温線測定では、

- (5) 出口濃度を計測することによって吸着量を求めるので、水蒸気による吸着量変化の影響を受けにくく、実験手順も簡単である。また、比較的短時間で測定が行なえるので、実用的な測定法で

表6 各試料の100μg/m³(0.08ppm)時のHCHO吸着量予測値

試料名	吸着量 $B[\mu\text{g/g}]$ (100μg/m³時)	Langmuir 係数		回帰直線係数	
		C_s^0	K_L	a	b
AC	9.4	0.17	0.58	—	—
TC	7.8	0.085	0.093	—	—
BC	0.2	0.15	0.013	—	—
GB	0.1	0.027	0.038	—	—
GB:P*	0.3	0.037	0.080	—	—
HGB	60.2	—	—	6.03	59.5
HGB:P*	68.9	—	—	5.26	56.1
SIL	3.4	19.18	0.0018	—	—

* P:原紙ありの場合

※ 物理吸着:Langmuir 式より算出, 化学吸着(化学反応):外挿

ある。

- (6) ある程度高濃度域での吸着等温線を測定し、吸着等温式などから室内化学物質空気汚染が問題となる比較的低濃度域での吸着量を予測することができる。
- (7) 吸着量 B などのバラツキ確認の基礎的検討を行なった結果、試験毎の流速のバラツキは小さく、実験中の流速変動も見られなかった。また、試験間の吸着量 B のバラツキも小さかった。
- (8) 竹炭のHCHO吸着量は大きかった。これは細孔分布特性だけでなく含有元素などによる影響のため、吸着量が増加したと思われる。
- (9) 今回測定した試料の厚生労働省指針値での吸着量予測値は、物理吸着を原理とする試料では約10μg/g以下、化学吸着を原理とする試料では60~70μg/gと予測された。

6. 今後

- (1) 様々な建築材料、吸着材を対象として、水蒸気吸着等温線ならびに HCHO や他の化学物質（例えばトルエン）の吸着等温線を測定する。
- (2) MSB による GB の HCHO 吸着等温線測定で、脱着時に初期重量に戻らない現象が見られた原因の検証が不十分である。どのようなメカニズムでこの現象が生じるのか検討が必要である。
- (3) 竹炭の吸着量が大きかった原因が十分に解明されていないので、今後の課題である。

謝辞

本研究は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受け、財団法人 建材試験センター内に設置された「建材からの VOC 等放散量の評価方法に関する標準化委員会 吸着分解低減化部会（委員長：加藤信介 東京大学生産技術研究所教授）」の研究活動の一部として行われている。また、日本建築学会特別調査委員会・シックハウス問題の解明とヘルシーな居住環境の開発特別研究委員会（委員長：村上周三 慶応義塾大学理工学部教授）および国土交通省 建設技術研究開発費補助金・室内化学物質空気汚染の事前評価と健康影響防止技術の開発（研究代表者：加藤信介 東京大学生産技術研究所教授）の活動の一環としても実施されたものである。関係各位に深甚なる謝意を表する次第である。

注

- [1] 試験体はメーカーから直接入手、あるいは建材店より入手した。メーカーから入手の場合、製造直後の製品を無作為に抽出している。試験体はアルミホイルで包み、さらにビニル袋で密閉した状態で輸送・保存している。活性炭は試薬、備長炭・竹炭は DIY ショップにて市販品（室内空気を浄化すると表記）を入手した。
- [2] 試料を粉砕する際、二次構造が破壊されない程度の粉砕とし、微粉は除去した。また、各試料は含水があるため、加熱乾燥を行ない、その後乾燥剤を入れたデシケータ中に保存した。ただし、加熱乾燥する場合、加熱により結晶構造が変化してしまう試料もあるため、乾燥条件は必ずしも同じではない。
- [3] あらかじめガラス管および石英ウールに対し、HCHO 吸着の影響がないことを確認している。
- [4] 表 3 で使用した用語を以下に説明する。
湿度平衡判断値：設定相対湿度に対し、実際の測定湿度の許容範囲。設定の相対湿度に対し、この値内で制御される。
重量平衡判断値：重量変化量が設定値以下であれば、平衡重量と判断される。ここでは水蒸気の場合、120 秒に一度重量を測定し、重量変化量が 10^{-6} g 以下となった場合、重量平衡と判断される。
重量平衡時間：重量平衡となった後の保持時間。この時間を経過後、重量平衡判断値を満たしていないと、再び平衡重量となるまで測定を行なう。
- [5] 定電位電解法とは、ガスを特定の電位で電気分解（電解）し、その際に生じる電解電流を検知してガス濃度を検知するものである。今回使用した測定器の検出下限値は $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ である。
- [6] Langmuir 式は式(2)となる。

$$C_s = \frac{C_s^0 K_L C}{1 + K_L C} \quad (2)$$

ここで、 C_s : 吸着量 [$\mu\text{g}/\text{g}$]、 C_s^0 : 吸着した分子層濃度 [$\mu\text{g}/\text{g}$]、 K_L : 吸着平衡定数 [$1/(\mu\text{g}/\text{m}^3)$]、 C : 濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] を表す。

参考文献

- [1] B.A.Tichenor, Z.Guo, J.E.Dunn, L.E.Sparks, M.A.Mason : The Interaction of Vapor Phase Organic Compounds with Indoor Sinks, *Indoor Air* 1, 23-35, 1991
- [2] R.B.Jorgensen, O.Bjorseth, B.Malvik : Chamer Testing of Adsorption of Volatile Organic Compounds (VOCs) on Material Surfaces, *Indoor Air* 9, 2-9, 1999
- [3] A.Colombo, M.D.Bortoli, H.Knoppel, E.Pecchio, H.Vissers : Adsorption of Selected Volatile Organic Compounds on a Carpet, a Wall Coating, and a Gypsum Board in a Test Chamber, *Indoor Air* 3, 276-282, 1993
- [4] D.Won, R. Corsi, M.Rynes : Sorptive Interactions between VOCs and Indoor

Materials, *Indoor Air* 11, 246-256, 2001

- [5] 安宅勇二, 加瀬田郎, 横山 至, 加藤信介, 村上周三 : 定常法による HCHO 吸収分解せつこうボードの濃度低減効果の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp875-876, 2001
- [6] 加藤信介, 村上周三, 朱 清宇, 伊藤一秀 : 揮発性有機化合物の放散・吸脱着等のモデリングとその数値予測に関する研究 (その 26), 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp809-810, 2001
- [7] 鈴木昭人, 川合秀治, 田辺新一 : 多孔質セラミックス調湿建材に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp995-996, 2002
- [8] 下之園孝, 大河原忠義, 半田晋也, 和久井健洋, 堀 雅宏 : グラフト重合高分子塗膜剤を用いる室内環境中ホルムアルデヒド低減方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp975-976, 2003
- [9] 長谷川麻子, 木村 洋, 小峰裕己, 鎌田元康 : パッシブ型ホルムアルデヒド (HCHO) 除去製品の簡易性能試験方法, 日本建築学会計画系論文集, No.548, pp57-62, 2001.10
- [10] 安宅勇二, 加藤信介, 村上周三, 朱 清宇, 伊藤一秀 : 化学反応型パッシブ吸着建材の濃度低減効果に関する研究 濃度低減効果測定法の開発と検証 第 1 報, 日本建築学会環境系論文集, No.581, pp59-66, 2004.7
- [11] 安宅勇二, 加藤信介, 朱 清宇, 徐 長厚 : パッシブ吸着建材のホルムアルデヒド放散抑制性能試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp1017-1020, 2004
- [12] 桑沢保夫, 坊垣和明, 大澤元毅, 野崎淳夫 : 吸着性建材の性能測定法に関するチャンバ実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp1021-1024, 2004
- [13] 安宅勇二, 加藤信介, 朱 清宇, 徐 長厚 : パッシブ吸着建材のホルムアルデヒド放散抑制性能試験 (その 3), 日本環境管理学会・室内環境学会合同研究発表会講演予稿集, pp220-223, 2004
- [14] A. L. Tiffonnet, P. Blondeau, F. Allard, F. Haghighat : Sorption Isotherms of Acetone on Various Building Materials, *Indoor Built. Environ.*, 11, 95-104, 2002
- [15] 石丸章 : 小容量チャンバーを用いたホルムアルデヒド吸着特性試験法, 神奈川県産業技術総合研究所研究報告, No.7, pp79-83, 2001
- [16] 守屋好文, 宇野克彦, 福田 祐 : 有機性ガス等の除去技術について, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp529-532, 2000
- [17] 安宅勇二, 加藤信介, 朱 清宇, 徐 長厚, 長谷川あゆみ : 各種建築材料および吸着材の吸着等温線の測定, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 D-2, pp1383-1386, 2004
- [18] JIS A 1475 : 建築材料の平衡含水率測定方法, 2004
- [19] 近藤精一, 石川達雄, 安部郁夫 : 吸着の科学, 第 2 版, 丸善, 2001
- [20] ASTM D 6646-01 : Standard Test Method for Determination of the Accelerated Hydrogen Sulfide Breakthrough Capacity of Granular and Pelletized Activated Carbon, 2001
- [21] 竹内 雍 監修 : 最新吸着技術便覧 -プロセス・材料・設計-, 初版, エヌ・ティ・エス, 1999
- [22] 藤井 実, 吉永 淳, 村瀬陽子, 柳沢幸雄 : 多孔質セラミックス建材の室内空気質浄化機能に関する研究, 室内環境学会総会講演集, 92-93, 2001
- [23] 竹内 雍, 川井利長, 越智健二, 佐藤忠正 : 解説 化学工学, 初版代 11 刷, 培風館, 1988
- [24] 化学工学協会編 : 化学工学便覧 改訂六版 丸善, 2001
- [25] 藤原 敏, 嶋 一徹, 千葉喬三 : 竹炭の基本的特性と調湿能, 木材学会誌, Vol.49, No.5, 333-341, 2003
- [26] 大木道則 他編 : 化学大辞典, 第 1 版, 東京化学同人, 1989

(2005年 1月10日原稿受理, 2005年 5月29日採用決定)