

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

吸着現象のモデル化と検証 第2報

STUDY ON DECREASING EFFECT OF POLLUTANT CONCENTRATION WITH CHEMICAL ADSORPTIVE BUILDING MATERIAL

Modeling and verification of adsorption phenomenon Part 2

安宅勇二*, 加藤信介**, 朱清宇***, 村上周三****, 横田知博****, 伊藤一秀*****
Yuji ATAKA, Shinsuke KATO, Qingyu ZHU,
Shuzo MURAKAMI, Tomohiro YOKOTA, Kazuhide ITO

In this paper, modeling and the verification of the adsorption phenomenon concerning the effect of the concentration decrease of a chemical passive adsorptive building materials were conducted. The adsorption phenomenon was modeled in consideration of the chemical reaction and the adsorption capacity in building materials. The verification of modeling of the adsorption phenomenon used the Boundary Layer Type Small Test Chamber. When CFD was analyzed by using the adsorption model, the chemical passive adsorptive building materials showed the effect of the concentration decrease. The result of the CFD analysis used this adsorption model was corresponding to the experiment result well.

Keywords : *Adsorptive Building Material, Small Test Chamber, Adsorption rate, Mass transfer coefficient, CFD*
パッシブ吸着建材、物質伝達率制御型小形 Chamber、吸着速度、物質伝達率、数値流体力学

1. 序

近年、住宅・オフィス・学校等において、化学物質による室内空気汚染が顕在化している^{1,2)}。室内空気汚染濃度の低減は、汚染源対策のほか、パッシブ吸着建材等による濃度低減手段が考えられる。特に建材自身に室内濃度低減効果を持たせることは、特別な設備の運転も必要としないため、新築のみならず改築においても簡便かつ有効な対策になるものと考えられる。

前報では³⁾、物質伝達率制御型小形 Chamber を用いて化学反応型パッシブ吸着建材（以下、低減建材：H）であるホルムアルデヒド（HCHO）吸収分解せっこうボード⁴⁾の HCHO 濃度低減効果試験法に関する実験および CFD 解析の簡易モデルを示した。特に低減建材の HCHO 濃度低減効果試験を行う上で、物質伝達率をコントロールした試験条件が必要であること、低減建材による汚染濃度低減効果を換気と直接比較できる評価指標として換算換気量 Q_{ads} を示し、濃度低減効果を横並びに評価できる標準的測定法として有効であることを示した。また、検証に用いた低減建材（H）は温湿度条件に左右されることなく HCHO 濃度低減効果を示し、清浄空気中への吸着 HCHO の再放散が無いことを確認した。

本報では、建材内部で生じる物質移動^{3,4,5)}や化学反応を考慮し、より精密な吸着現象のモデル化を行った場合の HCHO 濃度低減効

果に関する CFD 解析結果について報告する。

2. パッシブ吸着建材の吸着現象のモデル化

2.1. 表面濃度ゼロモデル（吸着モデル 1）

前報では³⁾、低減建材の飽和吸着量 C_{ad} は極めて大きいことを前提に、建材表面濃度をゼロとして建材の吸着による室内汚染濃度低減作用をモデル化した（吸着モデル 1）。

2.2. 化学反応組み込みモデル（吸着モデル 2）

通常のせっこうボード（以下、比較建材：G）における等温過程の建材内部の化学物質輸送現象は、表 1 の式(1)で表すことができる。低減建材も化学物質輸送に関しては、同様の性状を有するものと考えられる。

低減建材内の化学物質輸送を再現するより忠実なモデル化を行うためには、表 1 の式(3)で表される低減建材内での化学反応を考慮する必要がある（吸着モデル 2）。式(3)において、 $\rho_{air}C$ が HCHO 濃度、 m_a が低減建材に添加した吸着剤の残存量を表しており、この 2 物質の化学反応に対し、反応速度定数 k を用いたモデル化を行う。本モデルは、化学吸着の進行による反応可能な吸着剤濃度が減少する吸着容量を考慮したモデル化となっている。比較建材および低減建材内の HCHO の拡散過程における建材内濃度分布の時間変化の模式

* 吉野石膏株式会社

工修

** 東京大学生産技術研究所

教授・工博

*** 東京大学生産技術研究所 博士研究員・博士(工学)

**** 慶応義塾大学理工学部

教授・工博

***** 慶応義塾大学院理工学研究科

修士

***** 東京工芸大学

講師・工博

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

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

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

Prof., Keio University, Dr. Eng.

Graduate Student, Keio University

Lecturer, Tokyo Institute of Polytechnics, Dr. Eng.

図を図1に示す^{注2), 文6)}。

3. 数値解析概要

本報では前報と同様、図2に示す物質伝達率制御型小形 Chamber を用いて定常法^{注3)}により、低減建材の HCHO 濃度低減効果のモデル化を検証した^{文7,8)}。

3.1. 解析対象建材

解析対象とした化学反応型パッシブ吸着建材は、HCHO 吸収分解せっこうボード（低減建材：H）である。また、比較対象建材は、通常のせっこうボード（比較建材：G）とした。各試験建材の厚さは 12.5mm とした。

3.2. 解析条件

表2に解析ケースを示す。供給 HCHO 濃度 (C_i) は厚生労働省指針値の $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm) およびその5倍の濃度である $490\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.40ppm) とした。温度は 23°C とし、相対湿度は前報で低減建材の HCHO 濃度低減効果に関する湿度依存性がないことから、0% とした^{文3)}。また換気回数は 0.5h^{-1} とした。物質伝達率は $15.5\text{m}/\text{h}$ とした。これは、inner chamber 内の平均風速を $0.1\text{m}/\text{s}$ に制御した場合に相当する^{文9,10)}。JIS A 1901 で規定されている小形チャンパー法の物質伝達率は、水蒸気で $9\sim 18\text{m}/\text{h}$ と規定されており、JIS 規格にも対応している^{文11)}。試験建材面積は、 $0.5\text{m}\times 0.3\text{m}$ (Loading Factor : $L1=0.38\text{m}^2/\text{m}^3$ ($Q_v/A=1.3\text{m}/\text{h}$)) および設置面積を 1/2 とした場合の $0.25\text{m}\times 0.3\text{m}$ (Loading Factor : $L2=0.19\text{m}^2/\text{m}^3$ ($Q_v/A=2.7\text{m}/\text{h}$)) とし、試験建材の面積による HCHO 濃度低減効果を検討した。

3.3. 流れ場解析

表2に解析ケース、表3に解析条件を示す。流れ場は低 Re 数型 k- ϵ モデル (Abe-Nagano model) ^{文12)} に基づく 3次元解析を行う。Y 方向の空間の対称性により、半分の領域のみを解析対象とする。

3.4. 拡散場解析

流れ場の解析後、試験建材設置面に吸着の境界条件 (吸着モデル 2) を与え、拡散と物質吸着の解析を行う。表2の解析ケースに示す供給 HCHO 濃度を変えた 2 ケースを行う。

試験建材内部 (第1メッシュ : $5.0\times 10^{-6}\text{m}$) を連成し、拡散場の非定常解析を行う^{注4)}。表1の式(3)の k の値は、反応が拡散速度に比べて十分速いものと仮定し、今回 $0.02 [1/(\text{kg}_{\text{VOCs}}/\text{kg}_{\text{sol}})\text{s}]$ を与えた。また、 23°C の HCHO の空気中の物質拡散係数 (D_a) は、 $15.3\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ を与えた^{文13)}。また、建材内の HCHO 有効拡散係数は、カップ法より求めた $D_e=2.0\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ を用いた^{文4)}。

4. 実験概要

建材内部で生じる化学反応を考慮した吸着モデル 2 に対応する実験を行う。実験方法の詳細は前報によるが^{文3)}、定常法による HCHO 濃度低減効果試験を行う。物質伝達率制御型小形 Chamber 内に試験建材 (H または G) を設置し、数値解析と同様に表2の条件で所定濃度の HCHO を Test Chamber に供給し、定常状態になるまで給気口濃度 C_i および排気口濃度 C_o を測定する。HCHO 濃度測定は、Test Chamber の給気口空気および排気口空気を DNPH カートリッジによりサンプリング ($0.5\text{L}/\text{min}$ 、 15.0L) し、高速液体クロマトグラフ (HPLC) により定量分析を行う。

表1 吸着相内 (建材内) における支配方程式

a. 比較建材 (G) に対する輸送方程式(図1(a))

$$\rho_{air} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho_{air} D_c \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad (1)$$

ρ_{air} : 空気密度 [$\text{kg}_{air}/\text{m}^3$]
 C : 気相換算濃度 [$\text{kg}_{\text{VOCs}}/\text{kg}_{air}$]
 D_c : 有効拡散係数 [m^2/s]

b. 低減建材 (H) に対する輸送方程式(図1(b))
 建材内部での HCHO の化学反応を考慮 (吸着モデル 2)

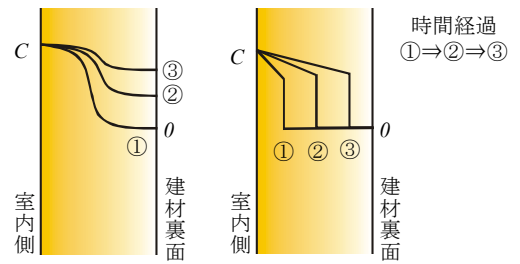
$$\rho_{air} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho_{air} D_c \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - S \quad (2)$$

$$S = k\rho_{air} C m_a \quad (3)$$

$$m_a = m_{ads} - m \quad (4)$$

$$m = \int S/\rho_{sol} dt \quad (5)$$

k : 反応速度定数 [$1/(\text{kg}_{\text{VOCs}}/\text{kg}_{\text{sol}})\text{s}$]
 m_{ads} : 飽和吸着量 [$\text{kg}_{\text{VOCs}}/\text{kg}_{\text{sol}}$]
 m_a : 建材内吸着剤残存量 [$\text{kg}_{\text{VOCs}}/\text{kg}_{\text{sol}}$]
 m : HCHO 吸着量 [$\text{kg}_{\text{VOCs}}/\text{kg}_{\text{sol}}$]
 ρ_{sol} : 建材密度 [$\text{kg}_{\text{sol}}/\text{m}^3$]



(a) 比較建材(表1 a.) (b) 低減建材(表1 b.)
 図1 建材内の HCHO 拡散過程

(b) 図は化学反応が建材内の物質拡散速度より極めて大きく、拡散移動した物質は吸着剤がなくなる限り、その場で化学反応により除去されることを示す。

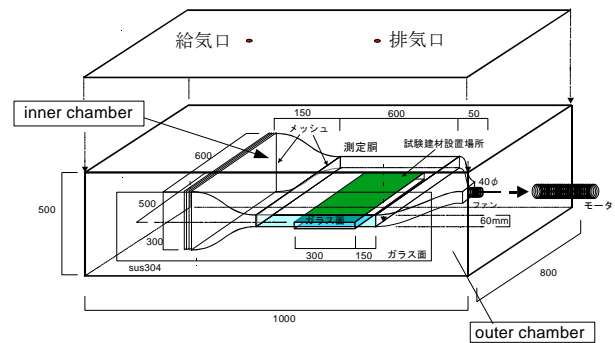


図2 物質伝達率制御型小形 Chamber

表2 CFD 解析ケース

Case	温度 [$^\circ\text{C}$]	相対湿度 [%]	給気 HCHO 濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ppm)]	換気 回数 [h^{-1}]	U_{center} [m/s]	CFD 解析 L1** L2**
1	23	0	100 (0.08)	0.5	0.1	H, G H
2	23	0	490 (0.40)	0.5	0.1	H —

* : $U_{center} = 0.1\text{m}/\text{s}$ は、物質伝達率 $15.5\text{m}/\text{h}$ に対応

** : $L1 = 0.38\text{m}^2/\text{m}^3$ ($Q_v/A = 1.3\text{m}/\text{h}$) , $L2 = 0.19\text{m}^2/\text{m}^3$ ($Q_v/A = 2.7\text{m}/\text{h}$)

5. 数値解析結果

5.1. 流れ場解析結果

図3に物質伝達率制御型小形 Chamber 内の平均風速ベクトル図を示す。ファンにより吹出す空気が outer chamber 内壁に衝突する性状、ならびに inner chamber 内から outer chamber へ循環する様子が観察された。既報^{9,10)}と同様に inner chamber 内風速分布は、数値解析結果と実験結果との対応が確認されており、十分よい精度で一致する。

5.2. 拡散場解析結果

表4および図4~6に試験建材(HおよびG)のCFD解析結果より求めた定常状態のHCHO平均吸着速度 ads 、換算換気量 Q_{ads} (物質伝達率)を示す(吸着モデル2)。また、前報の対応する実験結果およびCFD解析結果(吸着モデル1)も併せて示す³⁾。表4および図4に示すようにCase1の低減建材(H)の場合(試験設置面積L1)、給気口濃度 $C_i=100\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm)に対し、実験および吸着モデル2を適用した排気口濃度 C_o は、共に $18\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.02ppm)でよく対応している。Case2の場合も同様に、実験とCFD解析の結果がよく対応している(表4, 図5)。吸着モデル2のCFD解析では、約6時間後に定常状態となっている。

Case1の低減建材設置面積を気流方向に1/2とした場合(L2; $0.25\text{m}\times 0.3\text{m}$)、吸着モデル2を適用したCFD解析での物質伝達率(換算換気量)は、全面試験建材設置(L1; $0.5\text{m}\times 0.3\text{m}$)のときの5.7m/hに対し、5.9m/hと変化がなかった。

比較建材(G)の場合も表4、図6に示すように、実験結果とCFD解析結果はよく一致した。定常状態では $C_i=100\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm)に対し、 C_o は実験の場合 $96\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm)、CFD解析では $91\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.07ppm)となり、HCHO濃度低減効果は見られなかった。

図7にCase1の低減建材(H)の場合のTest Chamber内濃度分布を示す。低減建材表面近傍の濃度が減少しており、試験建材がHCHO濃度低減効果を有することが確認できる。一方、図8の比較建材(G)の場合、Test Chamber内の濃度減少は見られず、HCHO濃度低減効果が小さいことが確認できる。

これらのことから、本研究で用いたパッシブ吸着建材の数値予測モデル(吸着モデル2)は、 k 値の同定はしていないものの妥当であると考えられる。

6. 考察

パッシブ吸着建材の数値予測モデル(吸着モデル2)は、排気口濃度 C_o 、換算換気量 Q_{ads} (物質伝達率)が実験とCFD解析でよく

表3 CFD解析条件^{注4)}

乱流モデル	低 Re 型 k-ε model (Abe-Nagano model) ^{文12)}
メッシュ分割	216,600
差分スキーム	移流項: QUICK
流入境界	outer chamber 給気口: $U_{in}=1.44\text{m/s}$, $l_{in}=1/7\cdot L_f$, $k_{in}=3/2\cdot(U_{in}\times 0.05)^2$, $\epsilon_{in}=C_\mu\cdot k_{in}^{3/2}/l_{in}$ (L_f =(inlet 直径)=7mm)
流出境界	outer chamber 排気口: U_{out} =(質量保存による) k_{out} , ϵ_{out} = free slip
inner chamber 内ファン位置の境界条件	$U_{fan}=3.15(\text{m/s})$ $k_{out}=3/2\cdot(U_{fan}\times 0.05)^2$, $\epsilon_{out}=C_\mu\cdot k_{out}^{3/2}/l_{out}$ ($l_{out}=1/7\cdot L_f$, L_f =(fan の半径)=20mm)
壁面境界	No-slip

3次元、対称性を考慮しY方向は1/2の領域で解析。
流れ場の解析後、inner chamber 測定胴内の建材設置位置に吸着モデルを適用し、HCHO 拡散場解析を行う。

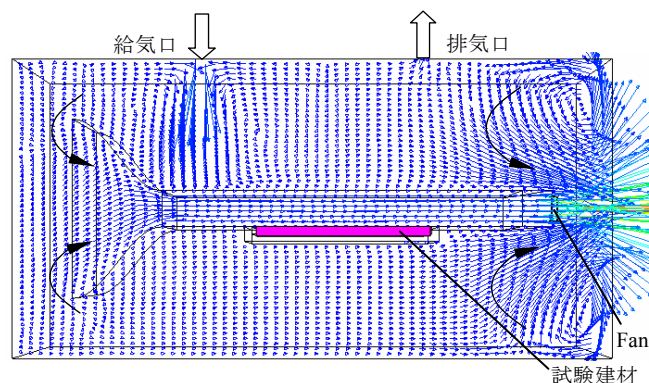


図3 物質伝達率制御型小形 Chamber 内平均風速分布

対応していることから、 k 値の同定はしていないものの妥当であると考えられる。ただし、今後 k 値の同定が必要と思われる。

また、低減建材の設置面積を1/2とした場合、全面設置の場合と物質伝達率(換算換気量 Q_{ads})の変化はなかった。これは、気流方向に面積を1/2として低減建材を設置したので、面積効果の影響がなかったためと考えられる。

表4に示すCFD解析結果によれば、表面濃度をゼロとして与えた吸着モデル1の方が、化学反応を考慮した吸着モデル2よりHCHO濃度低減効果を大きく評価している。これは、吸着モデル1では建材表面濃度をゼロとして与えたため、気中-建材表面間の濃度勾配が大きくなったことに起因すると考えられる。化学反応を考慮した吸着モデル2は、有限な吸着容量も考慮したモデル化となっており、長期の時間変動の解析にも対応したモデルである。

また、吸着現象が気相-建材間または建材内部のどちらに影響を

表4 吸着速度、物質伝達率、換算換気量(定常状態)

Case	試験建材	設置面積	CFD/実験	吸着モデル	給気口濃度 C_i [$\mu\text{g}/\text{m}^3$](ppm)	排気口濃度 C_o [$\mu\text{g}/\text{m}^3$](ppm)	平均吸着速度 ads [$\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$]	物質伝達率 [m/h]	換算換気量 Q_{ads} [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$]
1	H	L1	CFD	1	100 (0.08)	15 (0.01)	106	6.9	6.9
			CFD	2	100 (0.08)	18 (0.02)	102	5.7	5.7
			実験	-	100 (0.08)	18 (0.02)	109	6.1	6.1
	G	L1	CFD	1	100 (0.08)	26 (0.02)	185	7.1	7.1
			CFD	2	100 (0.08)	30 (0.02)	175	5.9	5.9
			実験	-	100 (0.08)	96 (0.08)	6	0.1	0.1
2	H	L1	CFD	1	480 (0.40)	77 (0.06)	534	6.9	6.9
			CFD	2	490 (0.40)	93 (0.08)	530	5.7	5.7
			実験	-	490 (0.40)	114 (0.09)	503	4.4	4.4

温度: 23°C, 相対湿度: 0%, L1 = $0.38\text{m}^2/\text{m}^3$ ($Q_v/A = 1.3\text{m/h}$), L2 = $0.19\text{m}^2/\text{m}^3$ ($Q_v/A = 2.7\text{m/h}$)

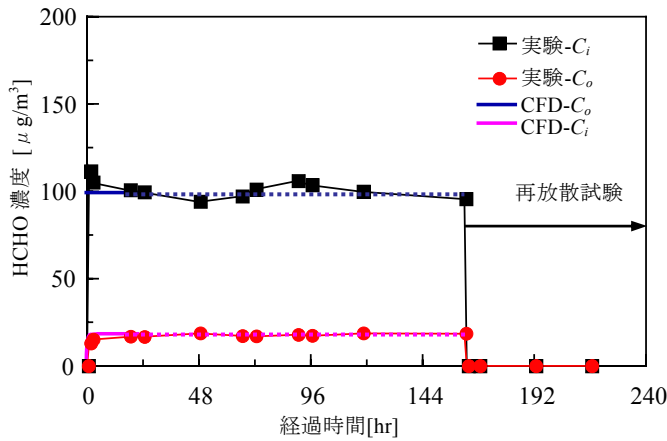


図4 定常法試験における HCHO 濃度(Case1 : H)
(23°C, 0%RH, $C_i = 100\mu\text{g}/\text{m}^3$)

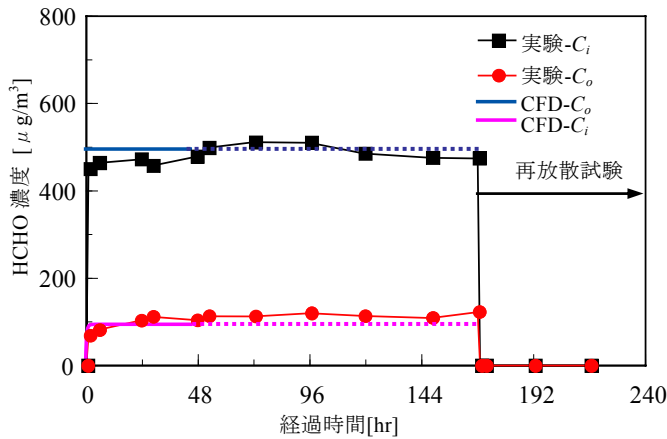


図5 定常法試験における HCHO 濃度(Case2 : H)
(23°C, 0%RH, $C_i = 490\mu\text{g}/\text{m}^3$)

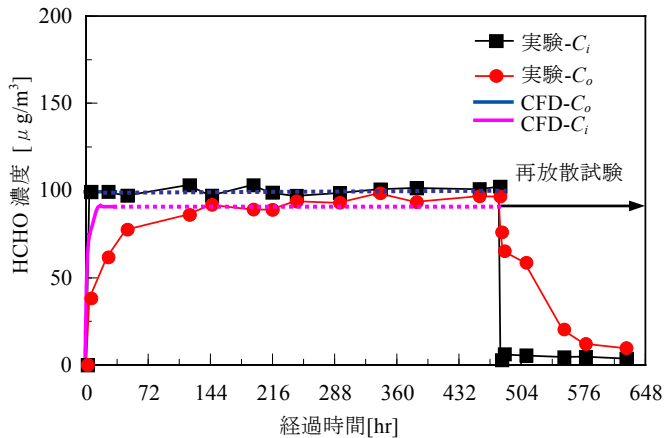


図6 定常法試験における HCHO 濃度(Case1 : G)
(23°C, 0%RH, $C_i = 100\mu\text{g}/\text{m}^3$)

受けるかを考えると、室内環境下から建材内部までの物質伝達率 α [m/h] は、建材内部の物質伝達率 α_{mat} [m/h] および空気中の物質伝達率 α_{air} [m/h] であらわすことができる¹⁴⁾。

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_{air}} + \frac{1}{\alpha_{mat}} \quad (6)$$

吸着現象は化学物質放散現象同様、式(6)の右側の物質伝達率が小さい側、すなわち抵抗が大きい側が吸着速度を支配すると考えられる。

今回用いた低減建材の場合、建材中の吸着剤の吸着容量が非常に

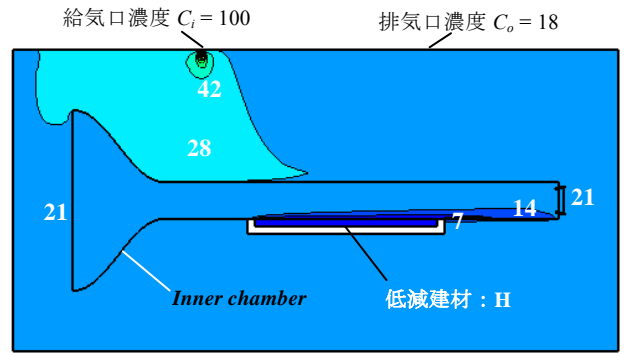


図7 物質伝達率制御型小形 Chamber 内の濃度分布 (Case1 : H)
(X-Z 断面, 温度 23°C, 単位 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$)

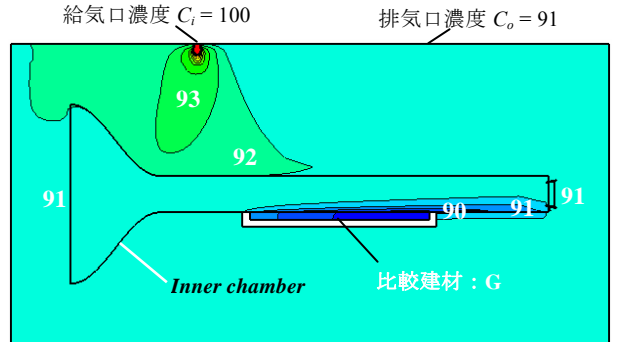


図8 物質伝達率制御型小形 Chamber 内の濃度分布 (Case1 : G)
(X-Z 断面, 温度 23°C, 単位 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$)

大きく、建材表面付近に存在する吸着剤の量も非常に多いと考えられる。このことから、建材内部の物質伝達率 α_{mat} を無視できると考えられ、

$$\frac{1}{\alpha} \approx \frac{1}{\alpha_{air}} \quad (7)$$

となる。これは、気中 - 建材間の物質伝達率 α_{air} が吸着過程を支配すると考えられる。前報³⁾で物質伝達率(建材表面風速)を変化させて試験を行った際、濃度低減効果に差異が生じたことから気中 - 建材間の物質伝達率 α_{air} が吸着過程を支配するものと考えられる。

一方 HCHO 吸着に関して十分時間経過し、HCHO の吸着が建材内深部で生じるようになると、 $\alpha_{mat} \ll \alpha_{air}$ となり、

$$\frac{1}{\alpha} \approx \frac{1}{\alpha_{mat}} \quad (8)$$

となる。これより、建材内部の物質伝達率 α_{mat} が支配的になると考えられる。今回用いた Cup 法での低減建材の有効拡散係数 D_c は $2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 、厚さが 12.5mm であるので、低減建材内の物質伝達率は 0.58m/h となる。また、吸着モデル 2 から求めた物質伝達率(換算換気量 Q_{ads}) は 5.7m/h である。このことから、吸着現象が建材内部で進行している場合は、建材内部の物質伝達率が吸着性状を支配するようになると考えられる。

今回用いた化学反応型パッシブ吸着建材は、吸着容量が非常に大きく、吸着時間が非常に長時間経過しない限り、気中 - 建材間の物質伝達率 α_{air} が吸着過程を支配するものと考えられる。

7. 結論

(1) 化学反応型パッシブ吸着建材内の化学反応を考慮した数値予測

モデル（吸着モデル 2）を提案した。

- (2) 数値予測モデル（吸着モデル 2）を用いた CFD 解析結果と実験結果はよい対応を示したことから、モデル化は妥当なものと考えられる。
- (3) 化学反応を考慮した本モデルは、有限な吸着容量も考慮したモデル化をしており、長期の時間変動の解析にも対応したモデルである。
- (4) 今回用いた低減建材（H）は、建材表面付近に吸着容量の大きい吸着剤があるため、HCHO 低減効果に関して気中 - 建材間の物質伝達が吸着過程を支配すると考えられる。
- (5) 今後、反応速度定数 k の同定など更なる検討が必要である。

謝辞

本研究は、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実施したものである。関係各位に深謝する。

注

- [1] 解析対象とした化学反応型パッシブ吸着建材は、せっこうボードに HCHO と化学反応する吸着剤を添加したものである。
- [2] 図 1(b)において、建材表面から建材内部へ向かって吸着剤と HCHO の化学反応が順次生じていくが、この化学反応が終了するまで（吸着剤がなくなる限り）建材表面から建材深部への化学物質の拡散が起こらないため、CFD 解析を行うには数ヶ月を要する。
- [3] 定常法は、試験建材を設置した Test Chamber に実現象に対応した既知濃度の HCHO を一定濃度で供給し、給・排気濃度 (C_i , C_o) を測定することによって吸着速度 $ads[\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})]$ および換算換気量 $Q_{ads}[\text{m}^3/(\text{hm}^2)]$ を求め、パッシブ吸着建材の室内 HCHO 濃度低減性能を評価するものである。定常法より求まる吸着速度 $ads[\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})]$ および換算換気量 $Q_{ads}[\text{m}^3/(\text{hm}^2)]$ は次式となる。
$$ads = (C_i - C_o) \cdot Q_v / A \quad (9)$$
$$Q_{ads} = (C_i / C_o - 1) \cdot Q_v / A \quad (10)$$
ここで、 Q_v は換気量 [m^3/h]、 A は試験建材面積 [m^2] を表す。
- [4] CFD 解析には、商用コード *Fluent (Ver.6.1)* を使用した。

参考文献

- [1] Steve M. Hays, (1995) Indoor Air Quality, Solutions and Strategies, McGraw-Hill, Inc.
- [2] Shin-ichi Tanabe (1997) Review of Indoor Air Pollution Studies and Guidelines on HCHO and VOCs, Annual Meeting J. Archit, D-2, pp767-768
- [3] 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
- [4] 加藤信介, 村上周三, 伊藤一秀, 朱 清宇, 近藤靖史, 神 卓也: 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 17), 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp881-882, 2000
- [5] 安宅勇二, 加藤信介, 朱 清宇, 村上周三, 横田知博: Chamber 法による建築材料中の HCHO の有効拡散係数の測定, 日本建築学会環境系論文集, No.581, pp67-72, 2004.7
- [6] 安宅勇二, 加藤信介, 村上周三, 朱 清宇, 伊藤一秀, 横田知博: 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 36), 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp969-970, 2003
- [7] 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

- [8] 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 吸収分解せっ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
- [9] 伊藤一秀, 村上周三, 加藤信介, 近藤靖史, 朱 清宇, 神 卓也: 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 14), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp493-496, 1999
- [10] 朱 清宇, 加藤信介, 村上周三, 伊藤一秀: 境界層型小形 Test Chamber の開発と試験建材表面の化学物質伝達率に関する実験と CFD 解析, 日本建築学会計画系論文集, No.549, pp45-50, 2001.11
- [11] JIS A 1901: 建築材料の揮発性有機化合物(VOC), ホルムアルデヒド及び他のカルボニル化合物放散測定方法 - 小形チャンパー法, 2003
- [12] Nagano, Y., et al. (1994) A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows- 1. Flow field calculations, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 38, No.1., pp139-151
- [13] 化学工学協会編: 化学工学便覧改訂 3 版, 1968
- [14] 村上周三監修: JIS 使い方シリーズ - シックハウス対策に役立つ小形チャンパー法 解説[JIS A 1901], 日本規格協会, 2003