

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)
化学反応型パッシブ吸着建材の濃度低減効果に関する実験と CFD 解析

正会員 ○ 安宅 勇二*1 同 加藤 信介*2 同 村上 周三*3
同 朱 清宇*4 同 伊藤 一秀*5 同 横田 知博*6

HCHO パッシブ吸着建材 吸着実験 CFD

1. 序 既報¹⁻⁵⁾で境界層型小型テストチャンバーを用いたパッシブ吸着建材のホルムアルデヒド(HCHO)濃度低減試験法及び対応する CFD 解析について報告した。既報¹⁻⁴⁾での CFD 解析では、飽和吸着量 C_{ad} が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低減作用をモデル化(吸着モデル I)した。本報では、建材内の物質移動も考慮し、より精密な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. 吸着現象のモデル化(表 1, 図 1) 本研究で検討対象としたパッシブ吸着建材は、せっこうボードに HCHO 吸収分解性能を持たせた製品(HCHO 吸収分解せっこうボード^{注 1)}: 分解品)であり、HCHO を捉えた後、化学反応により分解し、再放散しないメカニズムを有する。通常品のせっこうボード(通常品)における等温過程の建材内部 VOCs 輸送現象は、式(1)で表すことができる(表 1)。分解品も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。分解品の吸着現象のモデル化に際し、既報¹⁻⁴⁾では吸着モデル I (建材表面濃度ゼロ)を用いた。建材内の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、建材内での化学反応を考慮する必要がある(式(2),(3):吸着モデル II)。式(3)において、 $\rho_{air}C$ が HCHO、 m_a が分解品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。通常品及び分解品内の 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図を図 1 に示す。

3. 境界層型小型テストチャンバーによるパッシブ吸着建材の濃度低減性能に関する実験と CFD 解析 パッシブ吸着建材(12.5mm 厚)を用いた濃度低減性能に関する実験と対応する CFD 解析を行う。吸着面には表 1 に示す吸着モデル II(式(2) - (5))を用いる。実験と CFD 解析の対応から吸着モデル II の妥当性を検討する。**3.1. 吸着速度の測定と評価** 吸着速度測定は、定常法で行う¹⁾。試験建材を設置したテストチャンバーに所定濃度の汚染空気を供給し、給排気口の濃度差から試験建材の吸着速度を算出する。吸着速度 $ads[\mu g/hm^2]$ は、式(6)から算出する。

$$ads = (C_i - C_o) \cdot Q_v / a \quad (6)$$

ただし、 $(C_i - C_o)$: 出入口濃度差 [$\mu g/m^3$]、 Q_v : Test Chamber 換気量 [m^3/h]、 a : 試験建材面積 [m^2]。

また、パッシブ吸着材の汚染低減効果を換算換気量 $Q_{ads}[m^3/hm^2]$ で表すと、式(7)、式(8)となる^{注 2)}。

$$ads = (C_i - C_o) \cdot Q_v / a = (C_o - \theta) \cdot Q_{ads} \quad (7)$$

$$Q_{ads} = (C_i / C_o - 1) \cdot Q_v / a \quad (8)$$

3.2. 実験概要(図 1, 表 1) 境界層型小型テストチャンバーの概要は文 6 参照。容量 $0.4m^3$ の sus304 製。ファンが設置され、測定胴内を一定風速で通気できる Inner chamber とこれらを含む Outer chamber より構成される。Inner chamber 内の建材

表 1 吸着相内(建材内)における支配方程式

a. 通常のせっこうボード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 [kg_{air}/m^3], C : 気相換算濃度 [kg_{VOCs}/kg_{air}]

D_c : 有効拡散係数 [m^2/s]

b. HCHO 吸収分解せっこうボード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 II)

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

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

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

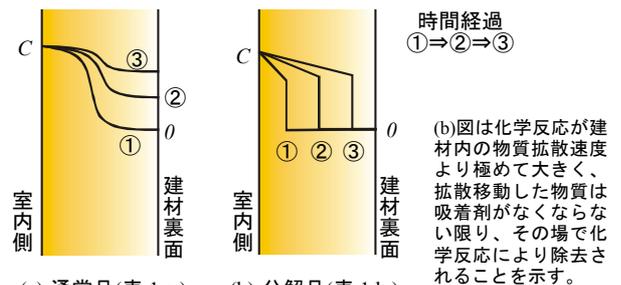
$$m = \int S / \rho_{sol} dt \quad (5)$$

k : 反応速度定数 [$1/(kg_{VOCs}/kg_{sol})s$]

m_{ads} : 飽和吸着量 [kg_{VOCs}/kg_{sol}]

m_a : 建材内吸着剤残存量 [kg_{VOCs}/kg_{sol}]

m : HCHO 吸着量 [kg_{VOCs}/kg_{sol}], ρ_{sol} : 建材密度 [kg_{sol}/m^3]



(a) 通常品(表 1 a.) (b) 分解品(表 1 b.)
図 1 せっこうボード内の HCHO 拡散過程

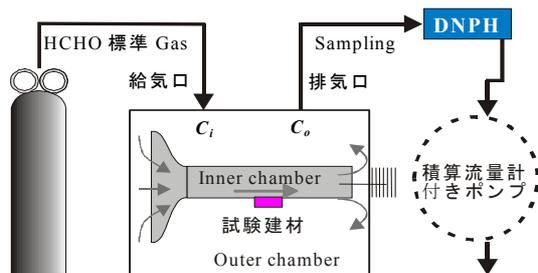


図 2 境界層型小型テストチャンバーを含むサンプリングシステム

設置面(0.3m×0.5m)に試験建材を設置して実験を行う。Inner chamber の測定胴内平均風速は、 $U_{center} = 0.1 m/s$ とした。これは、試験建材設置面の物質伝達率 $15.5 m/h$ (対流熱伝達率 $5.2 W/m^2K$)に対応。実験ケースは表 2。供給 HCHO 濃度を変えて 2 ケース行う。Outer chamber 換気量は $0.2 [m^3/h]$ 。サンプリングは DNPH カートリッジ、定量分析は HPLC。**3.3. 流れ場・拡散場の CFD 解析概要(表 2, 3)** CFD により境界層型小型テストチャンバー内の流れ場を 3 次元解析、低 Re 型 $k-\epsilon$ モデル(Abe-Nagano model)に基づく。流れ場解析の詳細と結果は文 6 参照。解析ケースは表 2。CFD 解析条件は表 3。流れ場解析後、

設置された試験建材に吸着モデルⅡを適用し、HCHO 拡散場を解析する。分解品内の HCHO 有効拡散係数は、カップ法より求めた $D_c = 2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (文7)を用い、空気中の物質拡散係数は $Da = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ とした(文8)。試験建材内部(第1メッシュ: $5.0 \times 10^{-6} \text{ m}$)を連成し、拡散場の非常数解析を行う(注3)。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 $0.02 [1/(kg_{VOCs} / kg_{sol})s]$ を与えた。

4. 実験及びCFD解析結果(表4, 図3, 4) Case1の実験及び対応するCFD解析におけるHCHO濃度を図3及び表4に示す。表4には比較のため、モデルⅠの検討結果も併せて示す。給気口濃度 $C_i = 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ に対し、実験及び吸着モデルⅡの排気口濃度 C_o は、共に $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ でよく対応している。CFD解析では、約6時間後に定常状態となっている(図3)(注5)。図4にテストチャンパー内濃度分布を示す。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。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, 図省略)。このことから、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Ⅱ)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。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Ⅰの方が、化学反応を考慮した吸着モデルⅡ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Ⅰ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。化学反応を考慮した吸着モデルⅡ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する。

5. 結論 (1) 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Ⅱ)を提案した。(2) 実験とCFD解析結果は、よい対応を示した。(3) 吸着モデルⅠ(建材表面濃度ゼロ)は吸着モデルⅡより濃度低減効果を大きく評価する。

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、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)及び国土交通省 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。関係各位に深甚なる謝意を表する次第である。

注 1) 吉野石膏(株)のタイガーハイクリンボード。試験体ボードはメーカーで製造直後にアルミホイルで包み、更にビニール袋で密閉した状態で輸送、保存している。また本試験建材は、通常の使用で3-4年以上のHCHO低減持続性能を有する(文9)。2) 式(8)で示される建材単位面積あたりの換算換気量 $Q_{ads} [\text{m}^3/\text{hm}^2]$ は、試験建材表面濃度がゼロ、気中参照濃度が C_o の場合の物質伝達率 α_m を表している。3) HCHO濃度低減性能に湿度依存性がないため、0%RHで実験・CFD解析を行った。4) CFD解析には商用コードFluent(Ver.6.1)を使用した。5) CFD解析結果(吸着モデルⅡ)は、テストチャンパーに汚染空気供給開始後、24時間経過時の値を示している。

参考文献 1) 加藤ら(2001),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),日本建築学会年次大会, 2) 安宅ら(2002),パッシブ吸着材の濃度低減効果試験に関する実験とCFD解析,第36回 空気調和・冷凍連合講演会, 3) 安宅ら(2002),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33),日本建築学会年次大会, 4) 安宅ら(2002),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35),空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 5) 安宅ら(2001),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,日本建築学会年次大会, 6) 朱ら(1999),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論文集, 7) 加藤ら(2000),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),日本建築学会年次大会, 8) 化学工学協会編(1968),化学工学便覧改訂3版

表2 実験・解析ケース(注2)

Case	給気口濃度 C_i [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] ([ppm])	温度 [$^{\circ}\text{C}$]	湿度 [%]	換気回数 [回/h]	U_{center} [m/s]
1	100 (0.08)	23	0	0.5	0.1
2	480 (0.40)	23	0	0.5	0.1

表3 CFD解析条件(注3)

乱流モデル	低 Re 型 k- ϵ model (Abe-Nagano model)		
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: $U_{\text{in}}=1.44\text{m/s}$, $l_{\text{in}}=1/7 \cdot L_f$, $k_{\text{in}}=3/2 \cdot (U_{\text{in}} \times 0.05)^2$, $\epsilon_{\text{in}}=C_{\mu} \cdot k_{\text{in}}^{3/2} / l_{\text{in}}$ (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	case 毎に速度固定値 U_{fan} を与える。 $U_{\text{fan}}=3.15(\text{m/s})$ $k_{\text{out}}=3/2 \cdot (U_{\text{fan}} \times 0.05)^2$, $\epsilon_{\text{out}}=C_{\mu} \cdot k_{\text{out}}^{3/2} / l_{\text{out}}$ ($l_{\text{out}}=1/7 \cdot L_f$, L_f = (fan の半径)=20mm)		
壁面境界	No-slip		

3次元、対称性を考慮し、1/2の領域で解析。流れ場解析後、inner chamberの建材設置位置に吸着モデルⅡを適用し、HCHO拡散場を解析。

表4 吸着速度,物質伝達率,換算換気量(定常状態, 23 $^{\circ}\text{C}$, 0%RH)(注5)

Case	1			2		
	CFD	実験	—	CFD	実験	—
吸着モデル*	I	II	—	I	II	—
給気口濃度 C_i [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] ([ppm])	100 (0.08)	100 (0.08)	100 (0.08)	480 (0.40)	490 (0.40)	490 (0.40)
排気口濃度 C_o [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] ([ppm])	15 (0.01)	18 (0.02)	18 (0.02)	77 (0.06)	93 (0.08)	114 (0.09)
平均吸着速度 ads [$\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$]	106	102	109	534	530	503
物質伝達率 α_m [m/h]	6.9	5.7	6.1	6.9	5.7	4.4
換算換気量 Q_{ads} [m^3/hm^2]	6.9	5.7	6.1	6.9	5.7	4.4

* 吸着モデル I: 建材表面濃度ゼロ, II: 化学反応

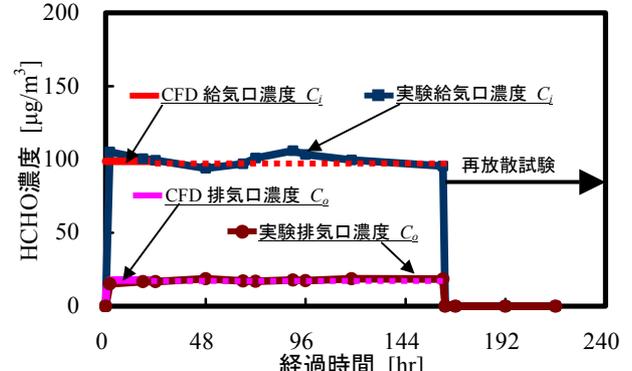


図3 定常法試験におけるチャンパー内HCHO濃度 (Case1:実験結果) (温度:23 $^{\circ}\text{C}$, 相対湿度:0%, 給気口濃度 $C_i = 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

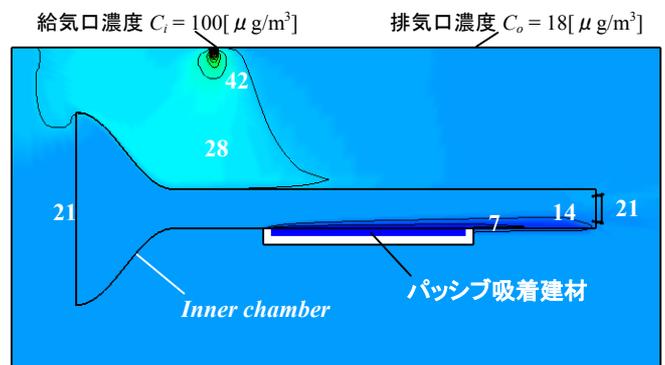


図4 境界層型小型テストチャンパー内の濃度分布 (Case1:CFD解析結果) (X-Z断面, 温度 23 $^{\circ}\text{C}$, 単位 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$])

*1 吉野石膏(東大生研民間等研究員) 工修 Yoshino Gypsum Co., Ltd. M. Eng

*3 慶応義塾大学理工学部 教授 工博 Keio Univ. Professor, Dr. Eng

*5 東京工芸大学 講師 工博 Tokyo Inst. of Polytechnics, Lecturer, Dr. Eng

*2 東京大学生産技術研究所 教授 工博 IIS, Univ. of Tokyo, Professor, Dr. Eng

*4 東京大学生産技術研究所 工博 JSPS Fellow, Univ. of Tokyo, Dr. Eng

*6 慶応義塾大学 大学院 大学院 Graduate Student, Keio Univ.