

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

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

HCHO パッシブ吸着材 吸着実験 CFD

1 序 既報^{文1)}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材のホルムアルデヒド (HCHO) 濃度低減試験法について報告した。境界層型小型テストチャンバーは、試験建材表面における物質伝達率をコントロールできる点に特徴がある^{文2)}。本報では、パッシブ吸着材の温湿度条件等を変えた場合の HCHO 濃度低減性能に関する実験及び CFD 解析結果について報告する^{文3,4)}。

2 パッシブ吸着材の濃度低減性能 パッシブ吸着材の汚染低減性能 (吸着速度) を Test Chamber を用いて測定するには、試験建材表面における物質伝達性状、すなわち建材表面の気流性状をコントロールした試験が必要で、試験建材が実際に室内で使用される状況と同一の物質伝達性状になるようコントロールすることが望ましいと考えられる。揮発性有機化合物の気中への物質伝達特性は、対流熱伝達特性とほぼ相似であり、試験時の Test Chamber 内の表面気流性状を、一般に馴染みの深い対流熱伝達特性で表現することは、一定の合理性がある。室内の対流熱伝達率は一般に 2~7 W/m²K 程度 (物質伝達率 6~21 m/h) であり、室内に設置されるパッシブ吸着材の吸着速度測定は、この状態に対応させることが望ましいと思われる。

3 吸着速度の測定と評価 吸着速度測定は、定常法で行う^{文1)}。定常法は、試験建材を設置した Test Chamber に所定濃度の汚染空気を供給し、給排気の濃度差から試験建材の吸着速度を算出する。吸着速度 $ads [mg/hm^2]$ は、(1)式から算出される。

$$ads = (C_i - C_o) \cdot Q_v / a \quad (1)$$

ただし、 $(C_i - C_o)$: 出入口濃度差 $[mg/m^3]$ 、 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、(2)式、(3)式となる^{注1)}。

$$ads = (C_i - C_o) \cdot Q_v / a = (C_o - 0) \cdot Q_{ads} \quad (2)$$

$$Q_{ads} = (C_i / C_o - 1) \cdot Q_v / a \quad (3)$$

4 パッシブ吸着材の境界層型小型テストチャンバーによる性能試験と対応する CFD 解析 厚さ 12.5mm のパッシブ吸着材 (本研究では HCHO 吸収分解せつこうボード^{注2)}) による室内 HCHO 濃度低減効果を境界層型小型テストチャンバーを用いて測定するとともに、対応する CFD 解析によりその有効性を検討する。4.1 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 2 参照。容量 0.4m³ の sus304 製。ファンが設置され、測定室内を一定風速で換気できる Inner chamber (風洞) とこれらを含む Outer chamber より構成される。Inner chamber 内の建材設置面 (0.3m x 0.5m) に試験建材を設置して実験を行う。Inner chamber の測定室内平均風速は、 $U_{center} = 0.1m/s$ とした。これは試験建材設置面の対流熱伝達率 5.2 W/m²K (物質伝達率 15.5 m/h) に対応。実験条件は表 1。供給 HCHO 濃度、温度、相対湿度を変えて全 6 ケースを行う。チャンバー換気量は 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。

4.2 流れ場、拡散場の CFD 解析概要 (表 1、2) 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-モデル (Abe-Nagano model) に基づく。流れ場解析の詳細と結果は文 2 参照。CFD 解析条件は表 2。流れ場解析後、試験建材設置面に吸着の境界

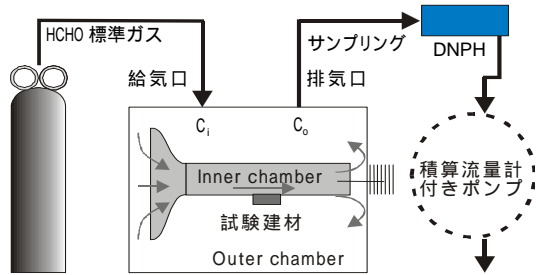


図1 境界層型小型テストチャンバーを含むサンプリングシステム

表1 実験ケース

case	温度 [°C]	換気回数 [回/h]	給気 HCHO 濃度	相対湿度 [%]	U_{center} [m/s]	CFD 解析
1	15	0.5	0.08	0	0.10	
2	23	0.5	0.08	0	0.10	
3	23	0.5	0.08	50	0.10	×
4	23	0.5	0.08	75	0.10	×
5	23	0.5	0.40	0	0.10	
6	40	0.5	0.08	0	0.10	

表2 CFD 解析条件

乱流モデル	低 Re 型 k- 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: $U_{in} = 1.44m/s$, $l_{in} = 1/7 \cdot L_f$, $k_{out} = 3/2 \cdot (U_{in} \times 0.05)^2$, $l_{in} = C_u \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$ (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} , l_{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 $U_{fan} = 2.69(m/s)$ $k_{out} = 3/2 \cdot (U_{fan} \times 0.05)^2$, $l_{in} = C_u \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$ ($l_{in} = 1/7 \cdot L_f$, L_f = fan の半径) = 20mm)
壁面境界	No-slip
3 次元、対象性を考慮し Y 方向は 1/2 の領域で解析。 流れ場の解析後、inner chamber 測定室内の建材設置位置に表面気相濃度 (0) を与え、拡散場解析を行う。	

条件を与え、拡散と物質吸着の解析を行う。本試験建材の飽和吸着量 C_{ad} は極めて大きいので、Henry 型の吸着等温式 ($C_{ad} = k_f \cdot C$) における Henry 係数 k_f を無限大と仮定することに対応し、建材表面の濃度をゼロとして与えた。HCHO の空気中の物質拡散係数 (D_a) を与え^{注3)文5)}、拡散場の定常解析を行う。

4.3 実験結果 (表 3、図 2) 本パッシブ吸着材は、何れの条件においても、HCHO 濃度低減効果を示し、HCHO 再放散試験では HCHO の再放散は確認されなかった。case2 の場合を図 2 に示す。4.3.1 供給濃度変化の影響 供給濃度 C_i を 0.10 mg/m^3 (0.08ppm) から 0.48 mg/m^3 (0.40ppm) に 5 倍変化させると、試験建材の HCHO 平均吸着速度も 0.11 mg/m^2h から 0.50 mg/m^2h と約 5 倍となり、HCHO 濃度を变化させた場合の濃度低減効果の変化を確認することができた。次に case2 の平均吸着速度 0.11 mg/m^2h 及び別実験で明らかになっている本建材の飽和吸着量 1.0 g/m^2 から、テストチャンバー内に設置したパッシブ吸着材の HCHO 濃度低減効果の持続性能を推算すると、テストチャンバー内の HCHO 濃度が常時約 0.10 mg/m^3 の状態で 1 年以上の濃度低減効果が期待できる^{文3)}。実際の室内 HCHO 濃度は、本実験より低濃度の場合が多く、持続性能はさらに長くなると考えられる。4.3.2 相対湿度変化の影響

表3 吸着速度、物質伝達率、換算換気量(定常状態)

雰囲気温度	15		23				40			
	CFD	実験	CFD	実験		CFD	実験	(CFD)	実験	
相対湿度[%]	0	0	0	0	50	75	0	0	0	0
給気口濃度 [mg/m ³](ppm)	0.10 (0.08)	0.10 (0.08)	0.10 (0.08)	0.10 (0.08)	0.10 (0.08)	0.10 (0.08)	0.48 (0.40)	0.49 (0.40)	0.10 (0.08)	0.10 (0.08)
排気口濃度 [mg/m ³](ppm)	0.016 (0.013)	0.01 (0.008)	0.015 (0.012)	0.018 (0.015)	0.020 (0.016)	0.019 (0.016)	0.07 (0.06)	0.11 (0.09)	0.015 (0.012)	0.01 (0.008)
平均吸着速度 [mg/(m ² h)]	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.55	0.50	0.11	0.12
物質伝達率 [mg/(m ² h(mg/m ³))]	6.88	12.0	7.33	6.11	5.51	5.56	7.86	4.43	7.33	12.0
換算換気量 [m ³ /hm ²]	6.88	12.0	7.33	6.11	5.51	5.56	7.86	4.43	7.33	12.0

温度条件を 23、HCHO 給気口濃度を 0.10mg/m³ (0.08ppm) とすると、排気口 HCHO 濃度は相対湿度によらず、ほぼ一定値となった。これより HCHO 平均吸着速度は相対湿度によらず 0.11mg/m²h と一定であり、換算換気量 (物質伝達率) も 5.5 ~ 6.1m³/hm² とほぼ一定となることから、今回検討したパッシブ吸着材の HCHO 濃度低減効果の湿度依存性は認められない。

4.3.3 温度変化の影響 相対湿度を 0%、給気口 HCHO 濃度を 0.10 mg/m³ (0.08ppm) とした場合、試験建材の HCHO 平均吸着速度は、何れの温度条件でも約 0.11 mg/m²h と一定となり、温度依存性は認められない。**4.4 流れ場、濃度場の CFD 解析結果** (表 3、図 3) CFD 解析と実験の結果は、ほぼ対応している。図 3 より、試験建材表面近傍に表面吸着に伴う低濃度の境界層が Inner chamber 測定胴下流に発達していることが分かる。CFD 解析では、温度条件を変えた場合 (給気濃度 0.10 mg/m³) の試験建材の HCHO 平均吸着速度は 0.11 mg/m²h と一定であり、換算換気量 (物質伝達率) もほぼ一定値となった。これは、レイノルズ数 Re 及び 15、23 及び 40 のシュミット数 Sc がほぼ等しいため、各温度の拡散場は完全な相似となったためである^{注4)}。しかし、実験と CFD 解析で平均吸着速度は対応しているが、換算換気量が 23 以外はかなり異なる結果となった。これは、排気口濃度が実験誤差等の原因により僅かにバラツクと、(3)式の気中参照濃度を Test chamber の排気口濃度 C_oとするため、換算換気量に大きく影響するためと思われる。

5 結論 (1)パッシブ吸着材である HCHO 吸収分解せつこうボードは、室内 HCHO 濃度低減効果を有することが示された。(2)本試験建材は、清浄空気中への吸着 HCHO の再放散が無いことを確認した。(3)実験と CFD 解析結果は、ほぼ対応した。(4)気中 HCHO 濃度の違いによる HCHO 低減性能は変化しない。(5)HCHO 濃度低減性能の湿度依存性は認められない。(6)HCHO 濃度低減性能の温度依存性は吸着速度の測定結果からは認められない。しかし換算換気量で実験と CFD 解析結果の対応があまりよくないため、今後実験誤差等含め検討する必要がある。(7)チャンパー内に設置した本試験建材の HCHO 濃度低減効果は、テストチャンパー内の HCHO 濃度が常時約 0.10 mg/m³ の状態で 1 年以上継続すると推算された。実際の室内 HCHO 濃度は、本実験より低濃度の場合が多く、持続性能はさらに長くなると考えられる。

謝辞 本研究の一部は、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)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) (2)式で示される建材単位面積あたりの換算換気量 Q_{ads} [m³/hm²]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を表している。試験建材の表面濃度がゼロと仮定でき、吸着

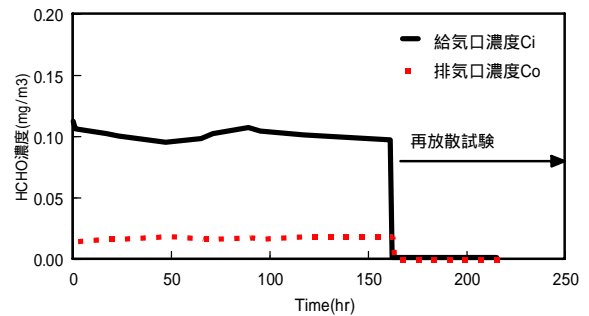


図2 定常法試験(case2)
(温度:23, 相対湿度:0%, 給気口濃度:0.10mg/m³)
(C_{in}=0.48 [mg/m³]) (C_{out}=0.07 [mg/m³])

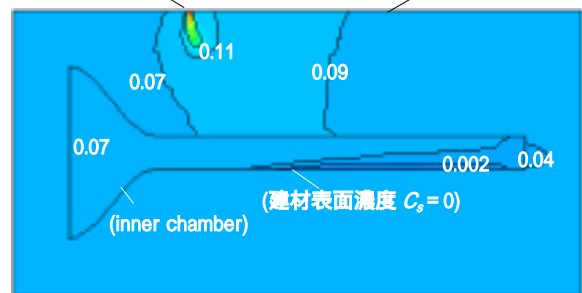


図3 境界層型チャンパー内の濃度分布:case5
(X-Z断面, 雰囲気温度 23、単位[mg/m³])

速度が物質伝達率のみにより律速される理想的な吸着材では、(3)式から求められる換算換気量 Q_{ads} [m³/hm²]は、その汚染濃度によらず一定 (すなわち物質伝達率) となる。**2)** 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、更にビニル袋で密閉した状態で輸送、保存している。**3)** HCHO の空気中の物質拡散係数 (D_a) は、23 : 1.53 × 10⁻⁵ m²/s、15 : 1.46 × 10⁻⁵ m²/s、40 : 1.69 × 10⁻⁵ m²/s とした⁵⁾。**4)** 無次元化されたスカラー量 (φ) の輸送方程式を以下に示す:

$$\frac{\partial \phi^*}{\partial t} + \frac{\partial (u_i \phi^*)}{\partial x_j} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Sc}} \left\{ \frac{\partial^2 \phi^*}{\partial x_j^2} \right\}$$

ここで、添え字 * は量を表し、φ: VOC 濃度、u_i = u_i/U₀、x_i = x_i/L₀、t = t/(L₀/U₀)、L₀:代表長さ(m)、U₀:代表速度(m/s)、レイノルズ数 Re = (U₀L₀)/ν、シュミット数 Sc = ν/D_a、ν: 空気動粘性係数(m²/s)、D_a: 空気中における物質拡散係数(m²/s)、i=(1,2,3)、j=(1,2,3)。(3)式よりレイノルズ数 Re およびシュミット数 Sc が等しい場合、φの拡散場は完全な相似となる。

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) 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文集, 3) 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, 4) 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, 5) 化学工学協会編(1968)化学工学便覧改訂 3 版

*1 吉野石膏株式会社 Yoshino Gypsum Co., Ltd.
*2 慶応義塾大学理工学部 教授 工博 Keio Univ. Professor, Dr. Eng
*3 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