

パッシブ吸着材の濃度低減効果試験法に関する実験とCFD解析による検討

正会員○ 加藤 信介*¹ 同 村上 周三*²
同 朱 清宇*³ 同 伊藤 一秀*⁴

HCHO 吸着実験 CFD

1 序 既報^{文1)}で境界層型チャンバーを用いた建材からの揮発性有機化合物の放散試験について報告した。境界層型チャンバーは、試験建材表面における物質伝達率をコントロールして建材からの放散速度を測定する点に特徴があり、特に蒸散支配型建材の測定で有用となる。

本報では、室内汚染濃度低減の目的で使用されるパッシブ吸着建材の性能試験法^{文2)}に関して考察を行うとともに、同チャンバーを用いる性能試験について報告する。

2 パッシブ吸着建材の濃度低減性能(吸着速度) パッシブ吸着建材の性能は、①材料の吸着特性(吸着等温線など)と、②吸着材内部の拡散性状、③気中から吸着材表面への物質伝達性状の3点が関係すると考えられる。そのため、パッシブ吸着建材の汚染低減効果(汚染吸着速度)をテストチャンバーを用いて測定するには、③に係わる試験建材表面における物質伝達性状すなわち気流性状をコントロールした試験が望まれる。活性炭のように気中濃度が低くても平衡吸着量が大きく、内部拡散が速やかで、吸着材表面の気中濃度がほとんどゼロとみなし得る場合の吸着速度は、③の試験建材表面における物質伝達性状により律速されるものと考えられ、吸着速度計測は、物質伝達性状をコントロールして行うことが必須となる。

物質伝達性状のコントロールは、①テストチャンバー内を試験建材表面まで一様に完全混合(瞬時一様拡散)濃度となるよう表面境界層を限りなく薄くさせる場合(十分に大きい物質伝達率)や、②テストチャンバー内の試験建材を実際に建材が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場合が考えられる。前者は、微細(粉碎)試料を用いた吸着等温線の作成実験など、速やかに吸着平衡状態(吸着速度ゼロ)に至らず測定が必要な際に実現されるが、試験建材が建材としての形を持ち、ゼロでない有限の吸着速度を持つ状態での測定では、建材表面近傍での濃度勾配を許さない完全混合の状態を実現させられない。実際に建材表面近傍で濃度勾配が生じ、有限の物質伝達率が生じるのであれば、後者の定められた物質伝達性状の下で行うことが合理的となる。

吸放湿材(固体)表面と気中との間で生じる水蒸気の物質伝達は、固体表面と気中との熱伝達と相似であり、ルイスの関係を用いて水蒸気の物質伝達率と対流熱伝達率が関係付けられている。また水蒸気と揮発性有機化合物の物質伝達率は、一般に両者のシュミット数比が1のオーダーのため、ほぼ一致する。すなわち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、試験時のテストチャンバー内の気流性状を、一般に馴染みのある対流熱伝達特性で表現することには一定の合理性がある。室内の対流熱伝達率は、一般に数W/m²K程度であり、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を提案する。

なお吸着は、一般に温度の影響を強く受ける。したがって試験は恒温状態で行われる必要がある。水蒸気の影響が懸念されれば恒湿条件も付加される。

3 吸着速度測定 3.1 減衰法 試験建材を設置したテストチャンバーに汚染ガスを封入しその濃度減衰から吸着速度を計測する減衰法は、吸着により試験建材周辺の汚染濃度がまず低下する。テストチャンバー内の空気が静止していると汚染質輸送が分子拡散で行われるため、吸着速度はこのテストチャンバー内の分子拡散に律速される可能性を生じる。これを避けるため攪拌を行う場合は、必要以上に攪拌して物質伝達率を上げ過ぎないように注意が必要となる。テストチャンバー内の濃度測定のため、少なからずの空気容量のサンプルを必要とする場合、サンプルがテストチャンバー内濃度に影響を与えないよう、十分内容積のあるテストチャンバーを用いる必要がある。

3.2 定常法 定常法は、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、給排気の濃度差から試験建材の吸着速度を算出する。テストチャンバー内は給気に伴う流動があるため、テストチャンバー内の汚染質輸送が分子拡散律速となる可能性は小さくなる。定常的に給気されるため、吸着速度が一定であればテストチャンバー内濃度も一定となる。また給気があるため排気口での濃度測定のスAMPLINGも容易と

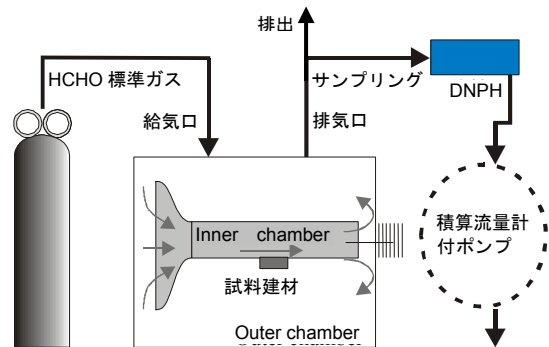


図1 境界層型チャンバーを含むサンプリングシステム

表1 解析ケースと建材モデル(雰囲気気温度は23°Cとする)

	換気量 [m ³ /h]	換気回数 [回/h]	給気 HCHO 濃度 [ppm]	相対 湿度	建材 表面濃度 [ppm]	乱流 モデル
case1	0.2	0.5	0.40	0	0	低 Re
case2			0.08			

表2 CFD 解析条件

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: $U_{in}=1.44\text{m/s}$, $l_{in}=1/7 \cdot L_f$, $K_{out}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.05)^2$, $\epsilon_{in}=C_{\mu} \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$ (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	case 毎に速度固定値 U_{fan} を与える $U_{fan}=2.69\text{(m/s)}$ $K_{out}=3/2 \cdot (U_{fan} \times 0.05)^2$, $\epsilon_{in}=C_{\mu} \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$ ($l_{in}=1/7 \cdot L_f$, 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。			

なる。テストチャンパー内に空気流動があるため、物質伝達率が上がり過ぎないように注意が必要となる。所定濃度の汚染空気供給が安定して行われれば、減衰法より容易に試験建材の正確な吸着速度測定を行い得る。以後、記述は定常法に限る。

4 吸着速度の評価 吸着速度 $ads[\mu\text{g}/\text{h}\text{m}^2]$ は、テストチャンパーでの出入口濃度差 $(C_i - C_o)[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ とテストチャンパー換気量 $Q_v[\text{m}^3/\text{h}]$ 及び試験建材面積 $a[\text{m}^2]$ から算出される。

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

パッシブ吸着材の吸着速度 $ads[\mu\text{g}/\text{h}\text{m}^2]$ を清浄空気(汚染濃度ゼロ)を導入した場合の換気量 $Q_e[\text{m}^3/\text{h}\text{m}^2]$ に換算して表現できると、室内の汚染低減に関し、換気の効果とパッシブ吸着の効果と同じ尺度で比較検討できて便利と思われる。

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

$$Q_e = (C_i / C_o - 1) \cdot Q_v / a \quad (3)$$

(2)式で示される建材単位面積あたりの換算換気量 $Q_e[\text{m}^3/\text{h}\text{m}^2]$ は、試験建材表面濃度がゼロ、気中濃度が C_o とした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 $Q_e[\text{m}^3/\text{h}\text{m}^2]$ 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。

5 パッシブ吸着材の境界層型チャンパーによる性能試験と対応するCFD解析例 パッシブ吸着材(本研究ではホルムアルデヒド HCHO 吸収分解せっこうボード^{注1)}による室内 HCHO 濃度の低減効果の性能を境界層型チャンパーを用いて測定するとともに、対応する CFD 解析により有効性を検証する。

5.1 実験概要(表 1、図 1) 境界層型チャンパーの概要は文 1、2 参照。容量 400 リットルの sus304 製。境界層チャンパーはファンが設置され測定胴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×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 $U_{\text{center}} = 0.1\text{m}/\text{s}$ とした。これは試験建材設置面の対流熱伝達率、 $5.2\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ に対応^{注2)}。実験条件を表 1。測定中の室内雰囲気温度は $23.1^\circ\text{C}(\pm 0.2^\circ\text{C})$ 、湿度は 5%以下で制御。チャンパー換気量は $0.2[\text{m}^3/\text{h}]$ 。サンプリングは DNPH カートリッジを吸引($0.3\text{L}/\text{min}$)。定量分析は HPLC。**5.2 流れ場、拡散場の CFD 解析と解析条件**(表 1、2) CFD により境界層チャンパー内の流れ場を 3 次元解析、低 Re 型 k-ε モデル(Abe-Nagano model)に基づく。流れ場解析の詳細と結果は前報 文 1 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条件を与え、拡散と物質吸着の解析を行う。今回、試験建材の飽和吸収量 C_{ad} は極めて大きいので、Henry 型の吸着等温式 ($C_{ad} = k_h \cdot C$) における Henry 係数 k_h を無限大と仮定することに对应し、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) は $1.53 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ ^{注3)} を与え、拡散場の定常解析を行う。**5.3 実験結果**(表 3) case2 の実験における給気口と排気口での HCHO 濃度はそれぞれ $0.47\text{mg}/\text{m}^3$ (0.39ppm)、 $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ (0.04ppm)。試験建材の HCHO の吸着量は $0.064\text{mg}/\text{h}$ と算出され、換気量換算値(物質伝達率)は $8.53\text{m}^3/\text{h}\text{m}^2$ となる。**5.4 流れ場、濃度場の CFD 解析結果**(表 3、図 2) 風速は既報と同一条件の解析であり

表 3 吸着速度、物質伝達率、換算換気量(定常状態)

	(case1)	(case2)	
	(CFD)	(CFD)	実験
給気口濃度 $[\text{mg}/\text{m}^3]$ (ppm)	0.09 (0.08)	0.48 (0.40)	0.47 (0.39)
排気口濃度 $[\text{mg}/\text{m}^3]$ (ppm)	0.02 (0.01)	0.07 (0.06)	0.05 (0.04)
平均吸着速度 $[\text{mg}/\text{m}^2\text{h}]$	0.11	0.53	0.43
物質伝達率 $[\text{mg}/\text{m}^2\text{h}(\text{mg}/\text{m}^3)]$	6.67	7.62	8.53
換算換気量 $[\text{m}^3/\text{h}\text{m}^2]$	6.67	7.62	8.53

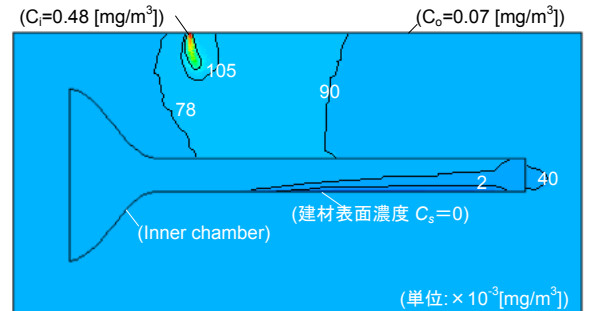


図 2 CFD 解析による境界層型チャンパー内の濃度分布:case2 (X-Z 断面, 雰囲気温度 23°C)

実験との対応を含め前報 文 1 参照。流れ場に関し実験と CFD は極めてよい対応を示す。実験に対応する case2 の数値解析による拡散場解析結果を図 2 に示す。建材表面近傍に濃度の薄い境界層が Inner chamber 測定胴下流に発達。チャンパーの給排気口濃度、建材の吸着速度解析結果を表 3 に示す。case1、case2 それぞれの給気口での濃度 0.08ppm と 0.40ppm に対して、排気口での濃度は 0.01ppm と 0.06ppm となり、換気量換算値(物質伝達率)はそれぞれ $6.67\text{m}^3/\text{h}\text{m}^2$ と $7.62\text{m}^3/\text{h}\text{m}^2$ となる。case2 の実験による換気量換算値(物質伝達率)は $8.53\text{m}^3/\text{h}\text{m}^2$ であり CFD 解析結果は、ほぼ対応する結果となっている^{注2)}。

6 結論 (1) パッシブ吸着材の性能試験は、試験材料表面の気流性状をコントロールした条件が必要である。その性状は対流熱伝達率で評価される。(2)吸着による汚染低減効果を換気と直接比較できる評価指標として吸着速度の換気量換算値が導かれる。これは吸着面表面濃度をゼロとする物質伝達率に対応することを示した。(3)気流性状のコントロールの容易な境界層型チャンパーを用いて HCHO 吸収分解せっこうボードの吸着性能試験を行い、その換気量換算値を得た。CFD による HCHO 吸収石膏ボードの吸収速度は実験と良く対応する。

謝辞 本研究の一部は、科学技術庁科学技術振興調整費(生活・社会基盤研究 生活者ニーズ対応研究「室内化学物質空気汚染の解明と健康・衛生居住環境の開発」)に基づいて設けられた建築学会学術委員会・室内化学物質空気汚染調査研究委員会(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) 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。**2)** この対流熱伝達率は、別報(文 4)に示す同一建材の吸着性試験時の対流熱伝達率 $0.8\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 比べ、6.5 倍大きい。本報での結果は、対流熱伝達が大いに比例して別報で示す結果より、吸着速度(対応する換気量換算値)が約 6 倍大きい。なお別報(文 4)の結果は約 1 ヶ月継続した吸着性能測定に基づいている。

参考文献 (1) 朱清宇ら(1999)揮発性有機化合物の放散・吸着等々のモデリングとその数値予測に関する研究(その 14~15)、日本空気調和・衛生工学会学術講演梗概集、(2)木村、長谷川、小峰ら(2000)、パッシブ型ホルムアルデヒド(HCHO)除去製品の性能試験方法に関する検討—その 1、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、(3)化学工学協会編:化学工学便覧 改訂 3 版(1968 年)、(4)安宅勇二ら(2001)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(環境) 関東

*1 東京大学生産技術研究所 教授 工博 IIS, Univ. of Tokyo, Professor, Dr. Eng
*3 東京大学院院生 Graduate School Univ. of Tokyo, Graduate Student

*2 慶応義塾大学理工学部 教授 工博 Keiyou Univ. Professor, Dr. Eng
*4 東京工芸大学 講師 工博 Tokyo Inst. of Polytechnics, Lecturer, Ph. D