

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

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

Development and Verification of Measuring Method About Concentration Decreasing Effect - PART1 -

安宅勇二* , 加藤信介** , 伊藤一秀*** , 朱 清宇**** , 村上周三*****

Yuji ATAKA, Shinsuke KATO, Kazuhide ITO, Qingyu ZHU, Shuzo MURAKAMI

In this paper, a measuring method of the performance of passive adsorption building materials that are used for reducing pollutant concentration in a room is developed. The convective mass transfer characteristic has a great influence on its performance. In order to control the convective mass transfer rate precisely in the performance test, the authors have developed the Boundary Layer Type Small Test Chamber in which precise control of airflow along the test materials can be done. The equivalent ventilation rate (Q_{ads}) of adsorption performance is drawn as the new index that corresponds to the rate of convective mass transfer rate in the case of the adsorption surface concentration to be zero. To demonstrate the performance test, the adsorption test of the gypsum board that has the ability of decomposing HCHO within the board by the addition of some chemical materials is performed. The adsorption rate of the gypsum board predicted by the CFD corresponds well with the experimental result.

Keywords: *Adsorptive Building Material, Small Test Chamber, adsorption rate, Mass transfer coefficient, CFD, Experiment*
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、実験

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、換気による排出や吸着等による汚染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。

筆者らの一人は、室内空気汚染物質であるアルデヒド類濃度を低減する目的で（今回の対象化学物質はホルムアルデヒド（HCHO）とする）、壁・天井の下地材として広く使用されているせっこうボードに着目し、せっこうボードにアルデヒド類と化学反応する吸着剤を添加した化学反応型パッシブ吸着建材である HCHO 吸収分解せっこうボード（以下、低減建材）を開発した³⁾。

現在、パッシブ吸着建材は、シート状やボード状などの製品が多数市販されている。室内空気汚染濃度を低減する目的で、活性炭が用いられることがあるが、活性炭は水蒸気を吸着する性質があり、この水蒸気吸着が汚染質の吸着を阻害するため、必ずしも有効な濃度低減効果は得られない場合があることが知られている⁴⁾。また、HCHO 濃度低減効果に関する試験法は製造メーカーで統一されていないのが現状である。長谷川らは⁴⁾、小型ファンを設置した Test Chamber (150L)

内に HCHO 発生源となる木質系建材を設置し、パッシブ吸着建材を併置した場合と併置しない場合の濃度低減効果を比較する簡易試験法を検討している。また、成富らは⁵⁾、実際の室内での使用を想定し、低 HCHO 濃度域でのパッシブ吸着建材の評価を行っている。1次評価としてデシケーターを用いて濃度減衰からスクリーニング試験を行い、2次評価として Test Chamber を用いて流通法（定常法）で濃度低減効果を評価している。

パッシブ吸着建材は、室内における吸着材表面への汚染物質の物質伝達率および吸着建材自身の吸着特性（吸着等温線）、建材内部への拡散抵抗等により、その吸着性能が定まるものと考えられる。また実用上、実際の室内での性能に対応した性能試験が望まれることから、対応した汚染質濃度、温度、湿度のみならず、パッシブ吸着建材周辺の気流による汚染質の物質伝達率も対応させる必要があると考えられる。Test Chamber 内にファンを設置した場合などは、パッシブ吸着建材表面の物質伝達率が過度に大きくなり、実現象に対応しなくなり、パッシブ吸着建材の性能を過大評価する場合がある。このような点から、パッシブ吸着建材に関する濃度低減効果試験は、特に物質伝達率を考慮した実現象に対応した試験法が必要と考えられるが、この点に着目した低減性能の測定法は必ずしも確立されていない。この物質伝達率を考慮した試験を行うことにより、パッシブ吸着建材の材料自体

* 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
*** 東京工芸大学 講師・工博
**** 東京大学生産技術研究所 JSPS Fellow・工博
***** 慶応義塾大学理工学部 教授・工博

Yoshino Gypsum Co., Ltd.
Prof., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.
Lecturer, Tokyo Institute of Polytechnics, Dr. Eng.
JSPS Fellow, Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.
Prof., Keio University, Dr. Eng.

が有する濃度低減性能を評価することが可能である。

筆者らは、建材表面での境界層の気流性状を精密に制御する物質伝達率制御型小形 Chamber を開発しており、ペイントおよび接着剤等の蒸散支配型建材からの化学物質放散性状は、建材表面における境界層の性状すなわち物質伝達特性に大きく依存することを報告している^{6),7)}。この物質伝達率制御型小形 Chamber は、また JIS A 1901 小形チャンバー法の性能を満たしている⁸⁾。パッシブ吸着建材による空気中から建材表面への汚染質吸着性状に関しても、その物質伝達率が多大の影響を及ぼすと考えられるため、測定にあたっては建材表面での物質伝達率のばらつきを避けるため、表面気流を一様に制御するなど、その物質伝達率特性を特定制御できる Test Chamber を用いて測定を行う必要があると考えられる。

本報では、物質伝達率制御型小形 Chamber を用いて、パッシブ吸着建材に対する HCHO 濃度、温度、湿度、物質伝達率、建材面積の各条件を変えた場合の HCHO 濃度低減効果に関する実験及び数値解析 (CFD 解析) を行い、同 Test Chamber を用いた測定法が有用であることを報告する。

2. パッシブ吸着建材の濃度低減性能 (吸着速度)

既報^{9)~11)}で報告しているとおり、パッシブ吸着建材の汚染濃度低減性能は、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) を横並びに比較するための標準的な測定を行うためには、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 (濃度境界層の性状) により律速されるものと考えられ、吸着速度計測は、この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、①Test Chamber 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 (充分に大きい物質伝達率) や、②Test Chamber 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 (粉砕) 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状を有し、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 Test Chamber 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 3

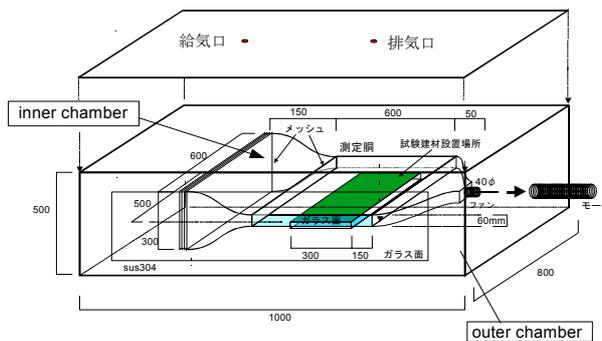


図1 物質伝達率制御型小形 Chamber

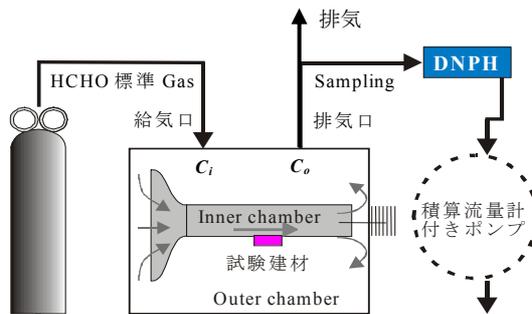


図2 物質伝達率制御型小形 Chamber を含むサンプリングシステム

表1 測定試料

測定建材	表面処理	記号
化学反応型パッシブ吸着建材 (低減建材)	—	H
比較対象建材 (比較建材)	—	G
化学反応型パッシブ吸着建材 (低減建材)	不織布製壁紙	RH
化学反応型パッシブ吸着建材 (低減建材)	塩ビ製壁紙	VH

~6W/m²K (水蒸気の物質伝達率 9~18m/h) 程度であり、室内に設置されるパッシブ吸着建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。なお物理吸着は、一般に温度の影響を強く受ける。したがって、標準的な試験は恒温状態で行われる必要がある。また吸着は一般に妨害物質の影響を受けるため、特に空気中の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

既報⁹⁾では、吸着速度の測定は減衰法と定常法に分類できる。

3.1. 減衰法 試験建材を設置した Test Chamber 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。Test Chamber 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 Test Chamber 内の分子拡散に律速される可能性を生じる。この律速状態を避けるために Test Chamber 内をファンなどで攪拌を行う場合は、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。Test Chamber 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 Test Chamber 内濃度に影響を与えないよう、十分内容積のある Test Chamber を用いる必要がある。濃度減衰は試験建材の他、Test Chamber 内壁への吸着、分解によっても生じるため、この影響を考慮する必要がある。

3.2. 定常法 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

表2 実験及びCFD解析ケース

Case	温度 [°C]	相対湿度 [%]	給気 HCHO 濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3(\text{ppm})$]	換気回数 [h^{-1}]	U_{center}^{**} [m/s]	実験 L1 ^{***}	CFD解析		表面処理
							L1 ^{***}	L2 ^{***}	
1	15	0	100(0.08)	0.5	0.10	H	H	—	—
2	23	0	100(0.08)	0.5	0.06	—	H	—	—
3	23	0	100(0.08)	0.5	0.10	H, G	H	H	—
4	23	50	100(0.08)	0.5	0.10	H	—	—	—
5	23	75	100(0.08)	0.5	0.10	H	—	—	—
6	23	0	480(0.40)	0.5	0.06	H	H	—	—
7	23	0	480(0.40)	0.5	0.10	H	H	H	—
8	40	0	100(0.08)	0.5	0.10	H	H	—	—
9	23	0	100(0.08)	0.5	0.10	RH	—	—	不織布製壁紙
10	23	0	100(0.08)	0.5	0.10	VH	—	—	塩ビ製壁紙

※: $U_{\text{center}}=0.10\text{m/s}$ および 0.06m/s は、それぞれ物質伝達率 15.5m/h および 9.2m/h に対応

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

する。Test Chamber 内は給気に伴う流動があるため、Test Chamber 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 Test Chamber 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も容易となる。Test Chamber 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。Test Chamber 内は定常法では一般に一定濃度になるため、Test Chamber 内壁の吸着も平衡し、濃度低下に対する影響は小さくなる。しかし、Test Chamber 内壁での分解は測定結果に影響するため、これを最小化することが必要となる。Test Chamber の材質は ASTM D 5116 - 97 で規定されている電解研磨したステンレスとし、HCHO の分解の影響が小さいものとする^{6), 12)}。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、記述は定常法とする。

4. 吸着速度の評価

吸着速度 ads [$\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$] は、Test Chamber での出入口濃度差 ($C_i - C_o$) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] と Test Chamber 換気量 Q_v [m^3/h] および試験建材面積 A [m^2] から算出される^{9), 13)}。

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

パッシブ吸着建材の吸着速度 ads [$\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$] を清浄空気 (汚染濃度ゼロ) を導入した場合の換気量 Q_{ads} [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$] 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。

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

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

式(2)で示される建材単位面積あたりの換算換気量 Q_{ads} [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$] は、試験建材表面濃度がゼロ、気中参照濃度が 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、式(3)から求められる換算換気量 Q_{ads} [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$] は、その汚染濃度によらず一定 (すなわち物質伝達率 [m/h]) となる。

5. 実験方法

5.1. 物質伝達率制御型小形 Chamber 概要 物質伝達率制御型小形 Chamber を図 1 に示す⁶⁾。物質伝達率制御型小形 Chamber は、inner chamber および outer chamber より構成されている。inner chamber は、試験建材 (テストピース) 表面上を定められた風速で気流を制御する

ことが可能である。outer chamber は inner chamber を格納し、換気のための給気口および排気口を有する。物質伝達率制御型小形 Chamber は、SUS304 製で表面を電解研磨している。inner chamber にはファンが設置されており、測定室内は第 3 種機械換気により換気される。物質伝達率制御型小形 Chamber 内での汚染質発生を防ぐため、モーター部は outer chamber の外側に設置している。物質伝達率制御型小形 Chamber 内に供給される空気量と inner chamber 測定室内の換気回数 (建材表面風速) は、独立して制御が可能である。物質伝達率制御型小形 Chamber は恒温室内に設置されている。inner chamber 内の試験建材設置面積は最大で $0.5\text{m} \times 0.3\text{m}$ である。建材上部における平均風速は、ファンの回転数により $0 \sim 0.2\text{m/s}$ の範囲で一定制御が可能である。本試験では、inner chamber 内の平均風速を 0.10m/s および 0.06m/s に制御した。これは試験建材設置面の物質伝達率が、 15.5m/h および 9.2m/h (対流熱伝達 $5.2\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ および $3.1\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) に対応する^{6), 7)}。JIS A 1901 で規定されている小形チャンバー法の物質伝達率は $9 \sim 18\text{m/h}$ と規定されており、JIS 規格に対応する⁸⁾。

5.2. 測定試料 表 1 に測定試料を示す。HCHO 濃度低減効果試験に用いた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) である。また、比較対象建材として、通常のせっこうボード (以下、比較建材) を用いた。各試験建材の厚さは 12.5mm を用いた。これらは一般製造工程中で無作為に選択し、試験建材とした。

また、低減建材に表面処理をした場合の HCHO 濃度低減効果への影響を検討するため、低減建材を基材とし、壁紙で表面処理した場合の HCHO 濃度低減効果試験を行っている。壁紙は通気性のある不織布製壁紙および通気性のない塩ビ製の壁紙を用い^{注2)}、壁紙用接着剤はゼロホルムアルデヒドタイプの壁紙用でんぶん系接着剤を標準使用量塗布して基材へ張りあわせた¹⁴⁾。

5.3. 測定条件 表 2 に測定条件を示す。パッシブ吸着建材に対する HCHO 低減効果に影響する因子として、①温度、②供給 HCHO 濃度、③相対湿度、④物質伝達率、⑤建材設置面積 (数値解析のみ) の 5 つをパラメータとして検討した。全ての試験を通じ、換気回数は 0.5h^{-1} とした。温度は 23°C を基本ケースとし、高温環境下の 40°C および低温環境下の 15°C とした。供給 HCHO 濃度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。また、湿度に対する HCHO 濃度低減効果への影響を検討するために、相対湿度を $0, 50, 75\%RH$ として試験を行った。物質伝達率は、 15.5m/h および 9.2m/h とした。これは、inner chamber 内の平均風速を

0.10m/s および 0.06m/s に制御した場合に相当する^{6,7)}。試験建材面積は実験の場合、0.5m×0.3m (Loading Factor : $L1=0.38\text{m}^2/\text{m}^3$ ($Q_v/A=1.3\text{m}/\text{h}$)) とした。

5.4. 定常法による HCHO 濃度低減効果試験方法 物質伝達率制御型小形 Chamber 内に試験建材 (低減建材または比較建材) を設置し、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、給気口濃度および排気口濃度を測定する³⁾。定常状態を確認したうえで、HCHO の供給を停止し、清浄空気のみ供給することで試験建材に吸着した HCHO 再放散を確認する試験を行う。供給 HCHO 濃度は、HCHO 標準ガス (20ppm / N₂ベース) を所定の濃度に清浄空気希釈調整し、試験建材を設置した物質伝達率制御型小形 Chamber に供給する。

5.5. 化学物質サンプリングと分析方法 物質伝達率制御型小形 Chamber を中心とした化学物質サンプリングの一連のフローを図 2 に示す。全ての配管はテフロンチューブを使用している。試験の前に気密性性能および回収率を確認している⁴⁾。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 (0.5L/min、15.0L) し、高速液体クロマトグラフ (HPLC) により化学物質の定性・定量分析を行う。

6. 数値解析概要

6.1. 流れ場解析 実験条件と同様に、outer chamber に対する換気回数は 0.5h^{-1} とし解析を行う。流れ場の解析ケースを表 1 に示す⁵⁾。inner chamber の測定洞内の平均風速 U_{center} は、実験と同様に 0.10m/s および 0.06m/s に制御する (物質伝達率 15.5m/h および 9.2m/h)。物質伝達率を正確に予測するためには、壁面近くの速度分布・乱れエネルギーを詳細に知る必要がある。そのため流れ場は低 Re 数型 $k-\epsilon$ モデル (Abe-Nagano model)¹⁵⁾ に基づく 3 次元解析を行う。試験建材表面の第 1 メッシュの壁座標 z^+ ($=U^*Z/\nu$) は 0.03 とした⁶⁾。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。表 3 に解析条件、図 3 に解析メッシュを示す。

6.2. 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を与え、拡散と化学物質吸着の解析を行う。試験建材面積は、0.5m×0.3m (Loading Factor: $L1=0.38\text{m}^2/\text{m}^3$ ($Q_v/A=1.3\text{m}/\text{h}$)) および inner chamber 気流方向に面積を 1/2 とした $0.25\text{m} \times 0.3\text{m}$ (Loading Factor : $L2=0.19\text{m}^2/\text{m}^3$ ($Q_v/A=2.7\text{m}/\text{h}$)) とし、設置した試験建材の面積による濃度低減効果を検討した。吸着材であるパッシブ吸着建材は、汚染質発生量に対して十分に大量にあると仮定し、試験建材表面の濃度は定常的に表面濃度 $C_s=0$ とし与え、拡散場 (空気中の輸送) の定常解析を行う。これは、試験建材の飽和吸収量 C_{ad} は極めて大きく内部への拡散輸送抵抗も小さい場合に対応し、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も対応する⁷⁾。HCHO の空気中の物質拡散係数 (D_a) は、15°C の場合 $1.46 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ 、23°C の場合 $1.53 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ 、40°C の場合 $1.69 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ を与えた¹⁶⁾。

7. 実験結果

表 5-1、5-2 および図 4~9 に試験建材 (低減建材および比較建材) の HCHO 吸着速度、物質伝達率の定常状態の実験結果を示す。

7.1. 低減建材および比較建材の HCHO 濃度低減効果 図 4、case3 の低減建材の実験結果を示す。低減建材は、供給 HCHO 濃度 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm) に対し、排気口濃度が $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.02ppm) となったこと

表 3 CFD 解析条件^{注 5)}

乱流モデル	低 Re 型 $k-\epsilon$ model (Abe-Nagano model) ¹⁵⁾		
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: $U_{in}=1.44\text{m}/\text{s}$, $l_{in}=1/7 \cdot L_1$, $k_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.05)^2$, $\epsilon_{in}=C_\mu \cdot k_{in}^2/l_{in}$ (L_1 =(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	$U_{fan}=3.63(\text{m}/\text{s})$ $k_{out}=3/2 \cdot (U_{fan} \times 0.05)^2$, $\epsilon_{out}=C_\mu \cdot k_{out}^2/l_{out}$ ($l_{out}=1/7 \cdot L_1$, L_1 =(ファン半径)=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 測定洞内の建材設置位置に表面濃度ゼロを適用し、HCHO 拡散場解析を行う。			

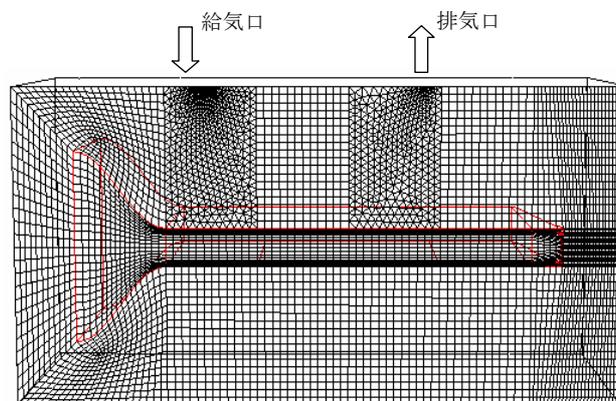


図 3 解析メッシュ

から、HCHO 濃度低減効果を示した。また HCHO 再放散試験では、低減建材からの HCHO 再放散は確認されなかった。一方、図 5 に示すように比較建材の場合、時間経過に伴い、排気口の HCHO 濃度が上昇し、給気口濃度 ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm)) と排気口濃度 ($96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm)) がほぼ一致したことから HCHO 濃度低減効果は見られなかった。また、HCHO 再放散試験では、吸着 HCHO の再放散を確認した。

7.2. 供給濃度変化の影響 供給 HCHO 濃度が case3 の $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm) に対し case7 の $490 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.40ppm) と 5 倍異なる場合、低減建材の HCHO 平均吸着速度は $109 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ に対し $503 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ と約 5 倍となった。また、CFD 解析結果で case3 と case7 を比較すると、給気 HCHO 濃度の変化に対応して排気口濃度、吸着速度が変化するが、換算換気量は同じ値となる。このことから、吸着速度は給気 HCHO 濃度変化に対応し、換算換気量は給気 HCHO 濃度によらないものと考えられる。実験結果で換算換気量にバラツキが生じた原因は、実験による排気口濃度の測定にバラツキが若干あるためと思われる。

7.3. 相対湿度変化の影響 温度条件を 23°C、供給 HCHO 濃度を $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm) とし、相対湿度を 0, 50, 75%RH とすると、低減建材の排気口 HCHO 濃度は、 $18 \sim 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.02ppm) となり、平均吸着速度は相対湿度によらず、 $107 \sim 110 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ とほぼ一定となった。また、換算換気量 (物質伝達率) は、 $5.5 \sim 6.1\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ とほぼ一定であった。これより、今回検討した低減建材の HCHO 濃度低減効果の湿度依存性は認められなかった。

7.4. 温度変化の影響 相対湿度を 0%RH、供給 HCHO 濃度を $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm) とし、温度を 15, 23, 40°C とした場合、低減建材の排気口

濃度は、 $18\sim 26\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.02ppm) となり、平均吸着速度は $99\sim 109\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ と算出された。これより何れの温度条件でも HCHO 濃度低減効果はほぼ一定となり、温度依存性は認められなかった。

7.5. 物質伝達率変化の影響 物質伝達率 $15.5\text{m}/\text{h}$ (case7) を $9.2\text{m}/\text{h}$ (case6) に下げて実験を行った場合、低減建材での排気口濃度が $114\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.09ppm) から $167\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.14ppm) へと上昇した (図6および図7)。それに対応して、平均吸着速度が $503\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ から $411\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、換算換気量は $4.4\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ から $2.5\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ と低下した (表5-2)。吸着速度は建材表面での物質伝達率に比例しており、パッシブ吸着建材の性能試験では、物質伝達率をコントロールして一定条件で実験を行う必要性が確認できた。

7.7. 低減建材の表面処理の影響 低減建材を壁紙で表面処理を行い、供給 HCHO 濃度を $100\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm) とした場合、通気性のない塩ビ製壁紙の排気口濃度は $96\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm)、平均吸着速度は $5\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、換算換気量 $0.1\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ と HCHO 濃度低減効果はなかった (図8, 表5-2)。通気性がある不

表 5-1 吸着速度、物質伝達率、換算換気量 (定常状態)

Case	1		2	3			4	5
試料記号	H	H	H	H	H	H	G	H
Loading Factor**	L1	L1	L1	L1	L2	L1	L1	L1
温度[°C]	15		23	23			23	23
$U_{\text{center}}[\text{m}/\text{s}]$	0.10		0.06	0.10			0.10	0.10
実験/CFD	CFD	実験	CFD	CFD	CFD	実験	実験	実験
相対湿度[%]	0	0	0	0	0	0	50	75
給気口濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] ([ppm])	100 (0.08)							
排気口濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] ([ppm])	16 (0.01)	25 (0.02)	25 (0.02)	15 (0.01)	26 (0.02)	18 (0.02)	96 (0.08)	20 (0.02)
平均吸着速度 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$]	106	100	95	106	185	109	6	110
物質伝達率[m/h]	6.7	4.1	3.8	6.9	7.1	6.1	0.1	5.5
換算換気量 [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$]	6.7	4.1	3.8	6.9	7.1	6.1	0.1	5.6

表 5-2 吸着速度、物質伝達率、換算換気量 (定常状態)

Case	6		7		8		9	10
試料記号	H	H	H	H	H	H	RH	VH
Loading Factor**	L1							
温度[°C]	23		23		40		23	23
$U_{\text{center}}[\text{m}/\text{s}]$	0.06		0.10		0.10	0.10	0.10	0.10
実験/CFD	CFD	実験	CFD	実験	CFD	実験	実験	実験
相対湿度[%]	0	0	0	0	0	0	0	0
給気口濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] ([ppm])	480 (0.40)	480 (0.40)	480 (0.40)	490 (0.40)	100 (0.08)	100 (0.08)	100 (0.08)	100 (0.08)
排気口濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] ([ppm])	125 (0.10)	167 (0.14)	77 (0.06)	114 (0.09)	15 (0.01)	26 (0.02)	37 (0.03)	96 (0.08)
平均吸着速度 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$]	473	411	534	503	107	99	87	5
物質伝達率[m/h]	3.8	2.5	6.9	4.4	7.3	3.8	2.4	0.1
換算換気量 [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$]	3.8	2.5	6.9	4.4	7.3	3.8	2.4	0.1

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

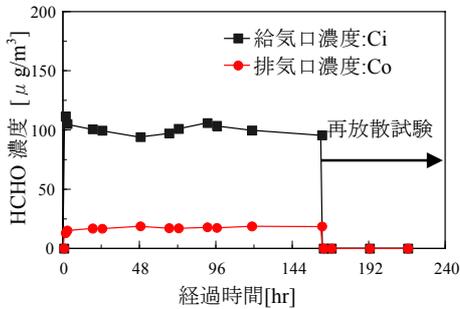


図4 定常法試験における HCHO 濃度 (Case3 : パッシブ吸着建材(H)) (23°C, 0%RH, $C_i=100\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)

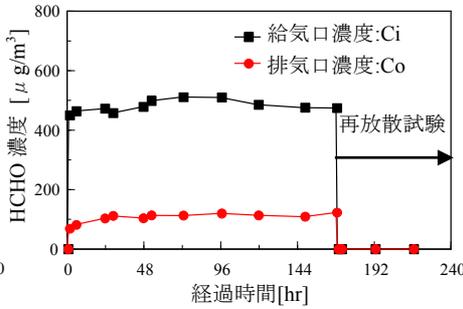


図6 定常法試験における HCHO 濃度 (Case7 : パッシブ吸着建材(H)) (23°C, 0%RH, $U_{\text{center}}=0.10\text{m}/\text{s}$, $C_i=490\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)

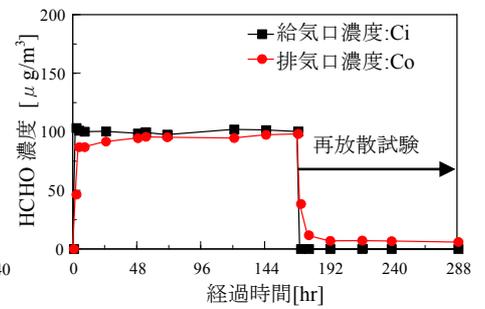


図8 定常法試験における HCHO 濃度 (Case10 : 塩ビ製壁紙処理(VH)) (23°C, 0%RH, $C_i=100\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)

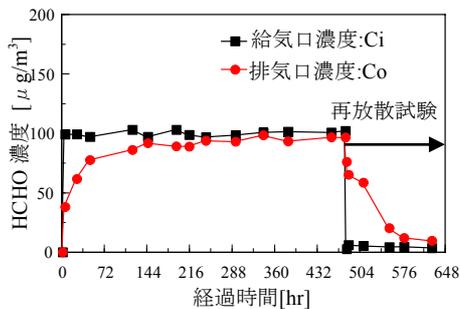


図5 定常法試験における HCHO 濃度 (Case3 : せっこうボード(G)) (23°C, 0%RH, $C_i=100\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)

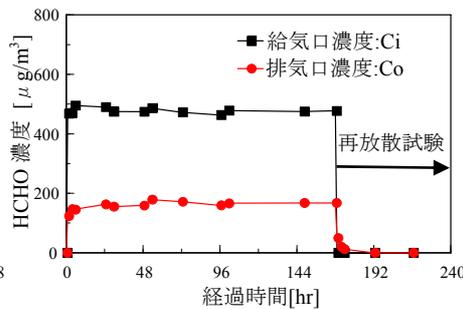


図7 定常法試験における HCHO 濃度 (Case6 : パッシブ吸着建材(H)) (23°C, 0%RH, $U_{\text{center}}=0.10\text{m}/\text{s}$, $C_i=490\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)

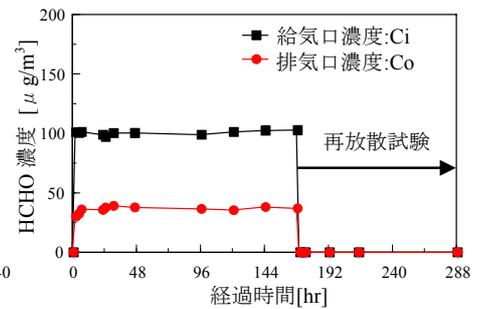


図9 定常法試験における HCHO 濃度 (Case9 : 不織布製壁紙処理(RH)) (23°C, 0%RH, $C_i=100\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)

織布製壁紙の場合（図9、表5-2）、排気口濃度は $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.03ppm) となり、平均吸着速度は $87 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ と表面処理を行わない場合よりも効果が低下したものの、HCHO 濃度低減効果を示した。

8. 数値解析結果

8.1. 流れ場解析結果 図10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。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^{6),7)}。

8.2. 拡散場解析結果 実験に対応する CFD 解析結果を表5-1, 5-2に示す。また、図11に case7 の場合の物質伝達率制御型小形 Chamber 内濃度分布を示す。

CFD 解析と実験による吸着性状は、ほぼ対応している。図11に示すように、低減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おり、パッシブ吸着建材が HCHO 濃度低減効果を有することが確認できる。

8.2.1. 温度変化の影響 温度条件を変えて CFD 解析を行った場合（供給 HCHO 濃度 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）、低減建材の HCHO 平均吸着速度は約 $106 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 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 及び各温度条件のシュミット数 Sc が温度変化に依らずほぼ等しいため、各温度条件における拡散場が相似となったためである^{注8)}。

8.2.2. 物質伝達率変化の影響 表5-1, 5-2に示すように（case2 と case3 および case6 と case7）、物質伝達率の違いによる濃度低減効果の差異も実験同様 CFD 解析で再現された。

8.2.3. 試験建材面積の影響 低減建材設置面積を inner chamber の気流方向に $1/2$ とした場合、物質伝達率はいわゆる面積効果（濃度境界層の平均厚さの違い）により、多少異なることが予想される。この場合、排気口濃度は $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と上昇し、平均吸着速度も $185 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ となった。しかし物質伝達率は、 $6.9\text{m}/\text{h}$ に対し $7.1\text{m}/\text{h}$ と試験建材面積が変化してもそれほど大きく変わらない（表5-1）。

9. 考察

今回検討した低減建材は、化学吸着によりアルデヒド類を選択的に吸着する吸着剤がせっこうボード内に添加されており、その吸着性状に温度、湿度などは大きく影響しないものと考えられる。また、低減建材は吸着容量が大きく、建材面での吸着性状は吸着されるべき汚染質量（濃度）に比例して吸着速度がコントロールされている。一方、比較建材は HCHO 濃度低減効果試験を開始した初期段階では、ある程度 HCHO 濃度低減効果を示すが、物理吸着のため有限の吸着量しかなく飽和してしまい、給気口濃度と排気口濃度が一致した状態で定常となる。また物理吸着のため、HCHO 再放散試験では脱着現象が確認できた。このことから、HCHO 濃度低減効果試験を行う場合、パッシブ吸着建材の濃度低減試験以外に吸着 HCHO 再放散試験を行うことも必要と考えられる。

case2,3 および case6,7 で物質伝達率を変化させた試験を行った場合、パッシブ吸着建材の濃度低減効果に変化した。このことから、パッシブ吸着建材の濃度低減効果試験を行う場合、建材表面の物質伝達性状を制御した測定の必要性が示された。この物質伝達性状を制御した測定法は、パッシブ吸着建材の濃度低減効果を横並びに比較するための

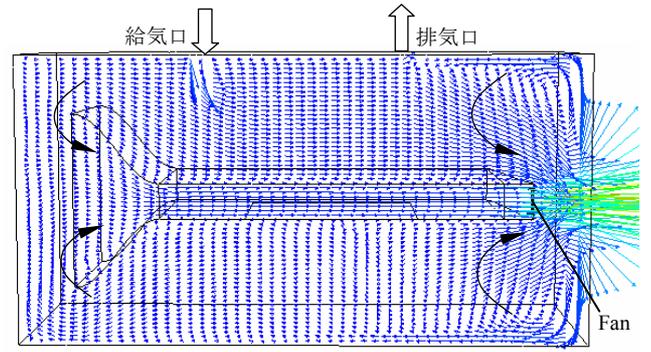


図10 物質伝達率制御型小形 Chamber 内平均風速分布

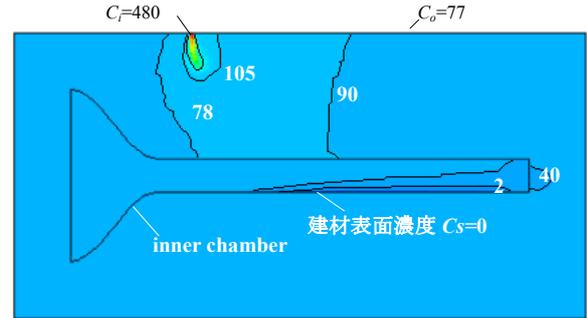


図11 境界層型チャンバー内の濃度分布:case7 (X-Z断面, 23℃, 単位[$\mu\text{g}/\text{m}^3$])

標準的測定法として有用であると考えられる。

また、パッシブ吸着建材の濃度低減効果を評価する上で重要な指標として、濃度低減効果の持続性能を考える必要がある。今回、この点に関して経時変化を見る検討を行っていないが、低減建材の case3 の平均吸着速度 $109 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ および別実験で明らかになっている低減建材の飽和吸着量 $1.0\text{g}/\text{m}^2$ を考慮して¹⁷⁾、Test Chamber 内に設置した低減建材の HCHO 濃度低減効果の持続性能を推算すると、Test Chamber 内の HCHO 濃度が約 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ の場合、約1年以上の濃度低減効果が期待できるものとなる。今回の試験継続時間の範囲内では、ほぼ定常状態とみなされる。実際の室内 HCHO 濃度は、本実験より低濃度の場合も多く、持続性能はさらに長くなると考えられる。さらに、低減建材を6畳部屋 ($3.6\text{m} \times 2.7\text{m} \times 2.4\text{m}$) の床面積 A の2倍使用した場合 (19.4m^2 ; $L=0.83\text{m}^3/\text{m}^2$) を考える。この場合、定常・完全混合を仮定する。式(3)を変形すると、

$$C_i Q_V = (Q_{ads} A + Q_V) C_o \quad (4)$$

となる。このことから、パッシブ吸着建材を用いた場合、 $Q_{ads} A$ 分だけ多くの換気量（換気回数 $n=Q_{ads} A/V=Q_{ads} L$ ）が得られることになる。したがって、case3 の換算換気量 $Q_{ads}=6.1\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ を用いた場合、パッシブ吸着建材で空気浄化可能と考えられる換気量（換気回数）の増加分は $118.6\text{m}^3/\text{h}$ (5.1h^{-1}) となる。同様に case7 の $Q_{ads}=4.4\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ の場合、 $85.5\text{m}^3/\text{h}$ (3.7h^{-1}) となる。

10. 結論

- (1) パッシブ吸着建材の濃度低減効果に関し、実験と対応する CFD 解析を行った。
- (2) Test Chamber 内のパッシブ吸着建材表面での気流性状（物質伝達率）を変化させて試験を行った場合、HCHO 濃度低減効果が明らかに変化することから、パッシブ吸着建材表面の物質伝達率をコントロールした条件での試験が必要であることを確認した。

- (3) すなわち、パッシブ吸着建材の濃度低減効果を Test Chamber を用いる標準的な方法を定める際には、建材表面の物質伝達率を共通とすることが必要である。
- (4) 換算換気量 Q_{ads} は、パッシブ吸着建材による汚染低減効果を換気の効果と直接比較でき、評価指標として有用である。
- (5) 本研究で用いたアミノ基を有する吸着剤を添加した低減建材（パッシブ吸着建材）は、温度、湿度、HCHO 濃度には左右されることなく HCHO 濃度低減効果を示した。さらに清浄空気中への吸着 HCHO の再放散もなく、実験結果と CFD 解析結果が良く対応した。
- (6) 今後、他のパッシブ吸着建材を用いて、濃度低減効果に関する実験を行う。

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、更にビニル袋で密閉した状態で輸送、保存している。本パッシブ吸着建材は、せっこうボードにアミノ基 (-NH₂) を有する吸着剤を添加しており、この吸着剤がアルデヒド類と化学反応しアルデヒド類を分解する。分解物質は建材中に固定される。せっこうボードは住宅・ビルなどの建築物に幅広く使用されており、一般的な建築材料と考えられる。このように汎用的な建築材料にホルムアルデヒド濃度低減効果をもたせたものなので、本研究での試験建材とした。
- [2] JIS P 8117: 1998 紙及び板紙—透気度試験方法—ガーレー試験機法により通気性を確認した。
- [3] 比較建材の場合、物理吸着が起こるため徐々に濃度低減性能が低下する。定常状態は数日間排気口濃度の変化がないことを確認することで判定した。
- [4] 加圧法により配管を含む物質伝達率制御型小形 Chamber 全系統の気密性を測定した結果、相当開口面積は 0.97mm² (10Pa 時) であり、十分な気密性が確保されていることを確認している。回収率試験は ENV 13419-1 (1999) ^{x18)}により測定した結果、99%以上の回収率が得られた。また、換気性能係数 η は、1.01 と報告されており JIS A 1901 を十分満たす^{x19)}。
- [5] CFD 解析には、商用コード *Fluent (Ver.6.1)* を使用した。
- [6] 建材表面の第 1 メッシュの壁座標 $Z^*=U^*Z_0/\nu$ 。ここでは、
- $$U^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (5), \quad \tau_w = \rho \nu \left. \frac{\partial u}{\partial z_n} \right|_{wall} \quad (6)$$
- τ_w : 壁面せん断応力 (N/m²), ρ : 流体密度(kg/m³), Z_0 : 壁面鉛直方向座標(m), ν : 分子動粘性係数(m²/s), u : 壁面接線方向速度(m/s)。
- [7] 吸着等温線を考えた場合、吸着量 C_{ad} が十分に小さい (0 に近い) 場合、吸着等温式の勾配は十分に大きく、 C_{ad} の多少の増加に関わらず吸着材表面気中濃度は低濃度に保たれる。よって、十分な量のパッシブ吸着建材が確保された場合、 C_{ad} は低レベルに保たれ、結果としてパッシブ吸着建材表面濃度 C_s を 0 と仮定することは第一次近似として妥当であると考えられる。この境界条件は吸着等温式で Henry model を用いた際に Henry 定数 $k_a = \infty$ と仮定したことが同値となる。数値解析では低 Re 型 k- ϵ model を用いて粘性底層の

拡散現象まで解析している。すなわち、 $C_s=0$ の仮定、および CFD で解析される第一離散点 (距離 Δx_j) の濃度 C_j より次式にて吸着 *flux* が算出される。 D は気中での対象物質の拡散係数を示す。

$$J_s = -D \frac{\partial C}{\partial x} = -D \cdot \frac{C(\Delta x_j) - C_s}{\Delta x_j} = -D \cdot \frac{C(\Delta x_j)}{\Delta x_j} \quad (7)$$

- [8] 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:

$$\frac{\partial \phi^*}{\partial t} + \frac{\partial (u_i^* \phi^*)}{\partial x_j^*} = \frac{1}{\text{Re}} \left\{ \frac{1}{\text{Sc}} \frac{\partial \phi^*}{\partial x_j^*} \right\} \quad (8)$$

ここで、添え字*は量を表し、 ϕ : VOC 濃度, $u_i^* = u_i/U_0, x_j^* = x_j/L_0, t^* = t/(L_0/U_0)$, L_0 : 代表長さ (m), U_0 : 代表速度 (m/s), レイノルズ数 $\text{Re} = (U_0 L_0)/\nu$, シュミット数 $\text{Sc} = \nu/D_a$, 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), $i=(1,2,3), j=(1,2,3)$ 。(8)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] 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, 767-768
- [3] 加藤信介, 伊藤一秀, 朱 清宇, 村上周三: 居室模型を用いた化学物質吸着効果・室内濃度分布の測定と数値解析, 日本建築学会計画系論文集, No.564, pp41-47, 2003
- [4] 長谷川麻子, 木村 洋, 小峯裕己, 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
- [5] 成富隆昭, 富岡一之, 山口 一: 室内濃度域におけるホルムアルデヒド低減材の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp859-860, 2001
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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 - 小形チャンバー法, 2003
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 安宅勇二, 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 35), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp709-712, 2002
- [12] ASTM D 5116 - 97: Small - Scale Environmental Chamber Determinations of Organic Emissions From Indoor Materials/Products, 1997
- [13] 羽田崇秀, 長谷川麻子, 小峯裕己, 鎌田元康: 家庭用空気清浄機によるホルムアルデヒド (HCHO) 除去性能の評価に関する研究 (その 2) 性能評価指標および試験方法の検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp1189-1192, 2001
- [14] 伴野正幸, 島田菜穂美, 舟木里香, 池田礼子, 田辺新一: 小型チャンパー

ADPAC を用いたアルデヒド類、VOC 放散量の測定に関する研究(その2 壁紙及び壁紙施工用接着剤からの化学物質放散速度測定), 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp831-832, 2000

- [15] Nagano. Y., et al. : 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., 139-151, 1994
- [16] 化学工学協会編 : 化学工学便覧改訂 3 版, 1968
- [17] (財)日本建築センター : 新建築技術認定事業報告書 室内空気中の揮発性有機化合物汚染低減建材「BCJ-AIBT-7」, 2002
- [18] ENV 13419-1 : Building products—Determination of the emission of volatile organic compounds—Part1:Emission test chamber method, 1999
- [19] 朱 清宇, 加藤信介, 安宅勇二: 大型テストチャンバーにおける建材や電気製品等からの化学物質放散量の測定に関する研究(その2), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp469-472, 2003