

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

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY ON EMISSION, DIFFUSION AND SORPTION IN MODEL ROOM

加藤信介*, 伊藤一秀**, 朱 清宇***, 村上周三****

Shinsuke KATO, Kazuhide ITO, Qingyu ZHU, Shuzo MURAKAMI

In this paper, a room model experiment is carried out to verify the effectiveness of the numerical analysis based on the physical model which includes emission, adsorption / desorption and diffusion of the chemical pollutants. The analyzed room model has one supply inlet and one exhaust outlet, and its cavity is composed of 1.5m (x) : 0.3m (y) : 1.0m (z) in which a two-dimensional mean flow field is developed. A clear re-circulating flow is observed in a room generated by the forced ventilation.

In this experiment, the activated carbon and Tenax TA are used as an adsorbent and liquid decane is used as the evaporative diffusion type emission material. Especially, to assume the adsorption characteristic to be clear for the activated carbon, as the amount of the chemical material adsorbed and adsorption isotherm are measured by weight method. Moreover, CFD analysis, which corresponds to the experimental conditions, are carried out and the results are in good agreement with the results of the room model experiment.

Keywords : *CFD, VOCs, Emission, Diffusion, Adsorption, Desorption, Model Experiment*
計算流体力学, 揮発性有機化合物, 放散, 拡散, 吸着, 脱着, 模型実験

1. 序

化学物質室内空気汚染は、建材、家具、什器等と深く関わるほか、室内での化学製品、防虫防蟻剤などの薬剤使用、さらには、建築物・住宅の気密性・換気にも大きく関連する問題である。室内の化学物質濃度増加は、化学物質使用を増大させる経済的および社会的圧力と、暖冷房エネルギー削減のため、建物の気密性を向上させ換気熱負荷を低減させたことに起因している。今後、地球温暖化防止、炭酸ガス排出抑制との兼ね合いで、室内の換気量を最小化する傾向はますます高まるものと考えられる。このような状況の下で、人体の健康と衛生を確保するためには、この室内化学物質の放散量を極小化させること、および、少ない換気と汚染物質に対して吸着・分解を行う建材等の使用により室内汚染質の効率的な除去を行うことが効果的となる。

本報を含む一連の研究は、室内の化学物質の分布性状を汎用的な計算機シミュレーションにより詳細に解析・予測する方法の開発を最終目的としている。既報^{*1,2)}においては、建材内部での拡散、吸脱着現象の物理モデルを開発し、そのモデルをCFD(計算流体力学)に組み込み、2次元室内モデルを対象として化学物質濃度分布予測を行った結果を報告してきた。本報では、汚染質の放散と吸脱着モデルに基づく数値解析の有効性を検証する為、一般居室をモデル化した2次元室内モデルで行った化学物質濃度分布、及び活性炭等の吸着材の吸脱着効果の測定結果に関して報告する。特に活性炭に関しては、その吸着特性を明らかとするために、重量法により化学物質吸着量ならびに吸着等

温式を推定した結果を報告する。また居室模型による化学物質放散・吸脱着に関する実験結果に対応するCFD解析結果に関しても併せて報告する。居室模型を用いて化学物質の室内濃度分布を詳細に測定した事例、および居室模型内に吸着材を設置し、その室内濃度低減効果を詳細に測定した例はほとんど無く、本研究はこの点に関して重要な意味を持つ。

2. 活性炭の吸着量および吸着等温線の測定

気体の吸着材への吸着量測定法には大別して重量法、容量法の2通りがある。今回は重量法により吸着等温線の推定実験を行う。本報では吸着対象化学物質としてdecaneを用いる。吸着量の測定および吸着等温線の推定は、吸着材として活性炭を対象として行う。

2.1 重量法概要

重量法による吸着量測定システムを図1に示す。吸着材である活性炭を石英スパイラル製のバネばかりに設置し、真空装置内に設置する。吸着物質であるdecaneを少量真空装置内に投入し、吸着平衡に達したときのバネの伸びで吸着量の変化を測定する。真空装置内のdecane濃度を圧力計で測定することでdecane分圧、すなわちdecane濃度を計算し吸着等温線を推定する。温度はウォーターバスを用いて25℃一定に制御する。活性炭重量は0.186gの条件とし、decane濃度を段階的に変化させて実験を行う。

* 東京大学生産技術研究所 教授・工博
** 東京工芸大学工学部 講師・工博
*** 東京大学生産技術研究所 工博
**** 慶應義塾大学理工学部 教授・工博

Prof., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.
Assistant Prof., Tokyo Institute of Polytechnics, Dr. Eng.
Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.
Prof., Keio Univ., Dr. Eng.

2.2 吸着材

本実験で用いた活性炭は黒色顆粒状で、4-6mesh(粒径3.36-4.76mm)である。実験に用いる活性炭は前処理として、純水と共に10分程度沸騰させアッシュ(ash)を取り除き、その後、シリカゲルと共に真空乾燥器の中(0.1 Torr 以下)で3時間以上170°C程度の環境に曝すことで、汚染物質の脱着・除去を行っている。

3. 居室模型実験概要

本研究で用いる室内模型の概略を図2に示す。模型は居室をモデル化したもので $1500^x \times 300^y \times 1000^z$ mmの空間容積を有する。Y方向に均一な2次元流れ場を形成することを意図し、キャビティ幅(y方向)と同幅のスロット状吹出口と吸込口を備える。吹出・吸込口は共に幅(z方向)20mmである。この模型形状は別報^{文3)}で報告している精密室内気流模型のworking cavityを厳密に再現したものである。天井、床及び左右両壁面はsus 304で構成し、その他はガラス製である。この模型は、化学物質フリーの環境を実現するsus304製の恒温恒湿室内に設置され、温度23°C一定に制御される。居室模型の吹出風速は3 m/s(換気回数144回/h)に制御している。

3.1 流れ場

既報^{文3)}で報告している精密室内気流模型実験ではLDV(Laser Doppler Velocimeter)を用いて測定した平均風速分布の他、各種乱流統計量のデータが蓄積されている。居室模型内の風速を測定し、精密室内気流模型内の流れ性状を厳密に再現することを確認している。天井面に沿って吹出口、対向壁に吸込口を設置した場合の流れ場測定結果を図3(1)に、居住域に高さ $z=500$ mmのpartitionを2枚設置した場合の流れ場測定結果を図3(2)に示す。partitionを設置しない場合には、模型内に時計回りの大循環流が生じ、床面隅部に主流とは逆向きの2次渦が観察される。居住域にpartitionを設置した場合には、partitionで囲まれた居住域内において風速が大きく低減し、淀み域が形成されている。

3.2 化学物質汚染源・吸着材

化学物質放散源として蒸散支配型の建材をモデル化しdecane溶液を使用する。decaneは $100^x \times 300^y \times 5^z$ mmのsus製容器に満たし、床面の右側に設置する(図2参照)。吸着材として、重量法で吸着量および吸着等温線の測定を行った活性炭の他、Tenax TAを用いる。Tenax TAは疎水性のため、一般の居住環境下に存在する湿度の影響を無視した状態で実験を行うことが可能となる。活性炭は2.2節で示した前処理を行った状態で実験に使用している。Tenax TAについても活性炭と同様の前処理を行っている。吸着材は $100^x \times 300^y \times 5^z$ mmのsus製容器に約50g敷き詰める。吸着材を設置した容器は全10個(総量約500g)で、床面の左側(decaneの下流側、図2参照)に設置する。

3.3 実験ケース

模型実験ケースを表1に示す。床面に汚染源のdecane溶液のみを設置したcase1と、汚染源の他、吸着材ならびに居住域partition設置の組み合わせで全6ケース設定する。吸着材による吸着効果を期待するため、汚染源は床面の上流側に設置し、吸着材は汚染源の下流側に設置する。室内模型は恒温恒湿室内に設置し、吹出空気を含め、温度23°C($\pm 0.1^\circ\text{C}$)、相対湿度50%($\pm 5\%$)に制御している。

3.4 化学物質サンプリング・分析法

模型内には活性炭フィルタを通過した清浄空気を温度・湿度を制御

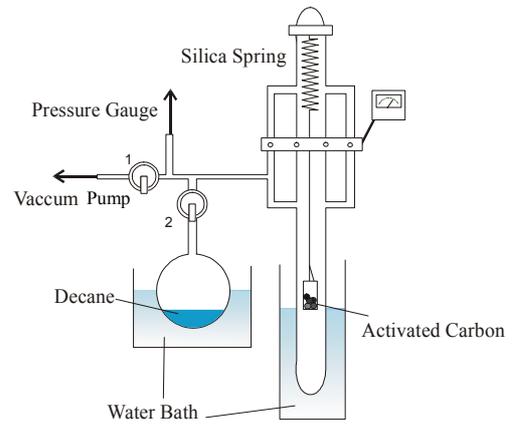


図1 重量法による吸着量測定システム

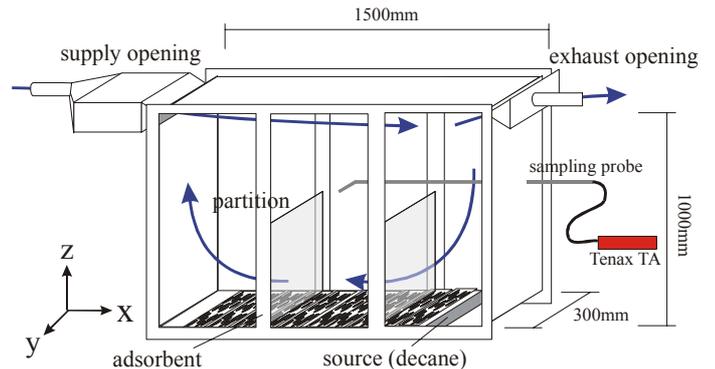
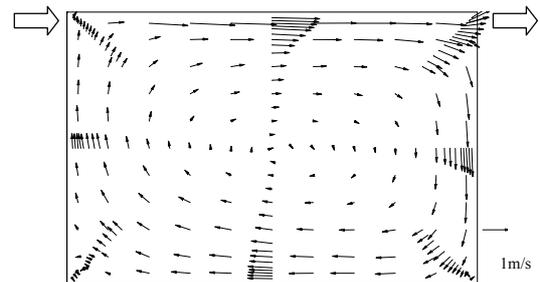
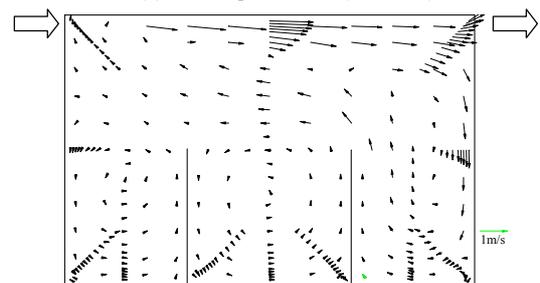


図2 居室模型概要



(1) 居住域 partition 無 (case1,2,5)



(2) 居住域 partition 有 (case3,4,6)

図3 LDVによる流れ場の測定結果^{文3)}

表1 実験ケース

ケース	居住域 partition	汚染源	吸着材
Case1	-	Decane 溶液	-
Case2	-		粒状活性炭
Case3	500 ² mm ² × 2枚		-
Case4	500 ² mm ² × 2枚		粒状活性炭
Case5	-		Tenax TA
Case6	500 ² mm ² × 2枚		Tenax TA

(Decaneは $(100^x \times 300^y \times 5^z)$ mmのsus製容器に設置)
(活性炭・Tenax TAは $(100^x \times 300^y \times 5^z)$ mmのsus製容器を10個設置)

した状態で供給する。室内各点の化学物質濃度は模型内に挿入した sus304 製のサンプリングチューブを介して、Tenax TA 管により吸着捕集(0.1L/minの速度で全 0.5 L サンプリング)する。分析は加熱脱着の後、GC/MS で行う。GC/MS の分析条件を表 2 に示す。

4. 数値解析概要

室内模型実験と同条件で CFD 解析を行い数値解析精度の検証を行う。

4.1 流れ場

模型内流れ場は、境界層粘性底層の拡散現象を解明するために低 Re 型 k-ε model (Abe-Nagano model)^{5,4)}により解析する。吹出風速は 3 m/s ($=U_m=U_0$ 、換気回数 144 回/h)、吹出気流の乱れの強さは実験値に基づき 1.2%とする。解析は模型の中央断面(図 2 の X-Z 面)を対象とし 2 次元で行う。メッシュ数は 206(x)×306(z)分割とし、移流項は QUICK、その他は中心差分を用いる。CFD による流れ場の解析結果と実験結果の比較を図 4 に示す。数値解析結果は実験結果と十分な精度で一致している。

4.2 汚染源及び吸着面のモデル化

汚染源である液体 decane は、表面に decane 飽和蒸気圧から算出される飽和気相濃度($C_{sat}=8.80 \text{ g/m}^3$ 、23°C)を与える。吸着材である活性炭および Tenax TA は、汚染質発生量に対して十分に大量であると仮定し、両者ともに定常的に表面濃度 $C_s=0$ を与える^{注1)}。

4.3 拡散場

空气中に放散された化学物質(decane)は室内気流により移流・拡散され、吸入口より室外に排出される^{5,6)}。本解析では、低 Re 型 k-ε model により流れ場を解析するため、壁座標 y^+ 以内に 3 メッシュ以上確保している。即ち、境界層粘性底層における濃度勾配の予測、即ち物質伝達率の予測を正しく行うことが可能であり、蒸散支配型の物質放散ならびに吸着材に対する吸着量を正しく予測することが可能となる。計算・解析条件を表 3 に示す。

5. 重量法による吸着等温線推定結果

真空装置内に投入する decane 濃度 $C(\text{mg/m}^3)$ を変化させ、活性炭の吸着量 $C_{ad}(\text{mg/g})$ を測定した結果を図 5 に示す。100 ($\mu\text{g/m}^3$) 近傍の濃度で最適近似した Henry 型の吸着等温式($C_{ad}=k_h \cdot C$)のプロットも併せて示す。25°C の場合 Henry 定数 k_h は $1.8 \times 10^{-2} (\text{m}^3/\text{g})$ であり、飽和吸着量 C_{ad0} は 410 (mg/g) 程度と推定された。

6. 室内模型実験結果

濃度分布の測定値は、各ケースの decane の放散速度と換気量より算出される完全混合濃度で無次元化した値と括弧内に実際の測定値 $[\text{mg/m}^3]$ の両者を示す。測定は模型内に decane 溶液を設置した時点より 5 時間経過した後に行っている。また本測定に先立って全実験系のブランクテストを行った結果、供給空気及び模型内での decane 濃度は GC/MS の検出限界以下であることを確認している^{7,8)}。

6.1 室内濃度分布

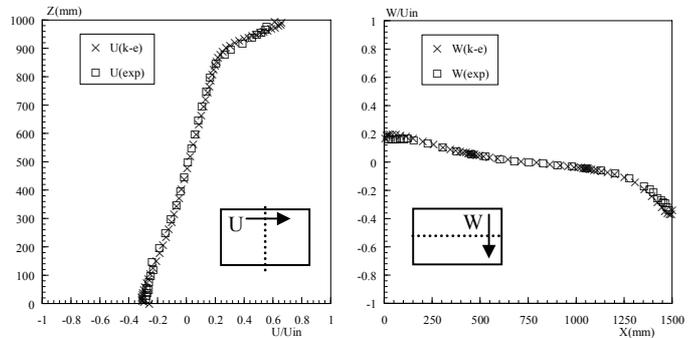
室内各点の decane 濃度測定結果を図 6 に示す。汚染源のみを設置した case1 では、室内には時計回りの大循環流が生じている為、床面附近及び模型内左側領域(吹出口側)で相対的に高濃度となっている。吸

表 2 GC/MS 分析条件

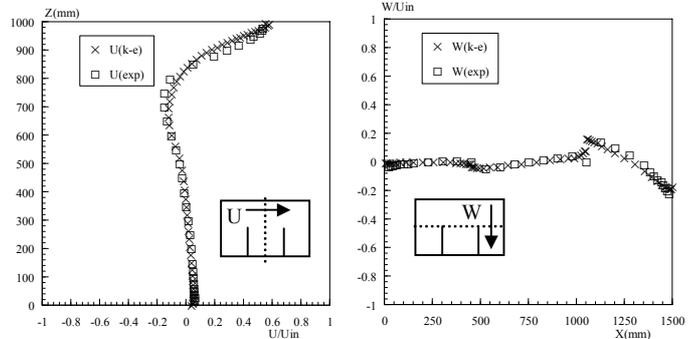
GC	HP6890
加熱脱着装置	Gestel TDS (Thermal Desorption System)
加熱脱着温度	20°C(5min)→60°C/min→280°C(2min)
CIS 温度	-100°C(0.01min)→12°C/sec→300°C(3min)
カラム	HP5 (60m×0.25mm×1 μm)
オープン温度	40°C(3min)→10°C/min→220°C(10min)
Split 比	100 : 1
検出器 (MS)	HP5973MSD

表 3 計算および解析条件

低 Re 型 k-ε model (Abe-Nagano model)による 2 次元解析	
メッシュ数	206(X)×306(Z)
Reynolds 数	$U_0 L_0 / \nu = 4200$ ($U_0=U_m=3\text{m/s}$, $L_0=0.02\text{m}$)
汚染源(decane)	
飽和気相濃度	$C_{sat} = 8.80 \text{ g/m}^3$ (23°C)
空气中拡散係数	$D_a = 4.80 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (23°C)
吸着材(活性炭、Tenax TA)	
表面濃度	$C_s = 0$ (=const.)と仮定



(1) 居住域 partition 無 (case1, 2, 5)



(2) 居住域 partition 有 (case3, 4, 6)

図 4 流れ場の解析結果(図中 k-e は低 Re 型 k-ε model による解析結果を示す)

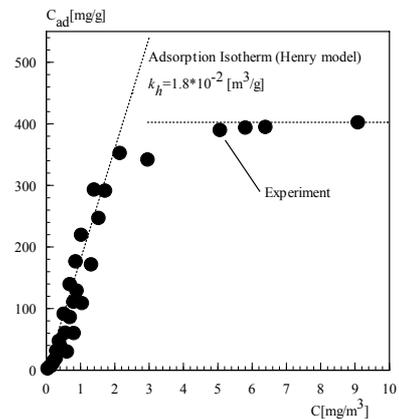


図 5 吸着等温線の推定結果

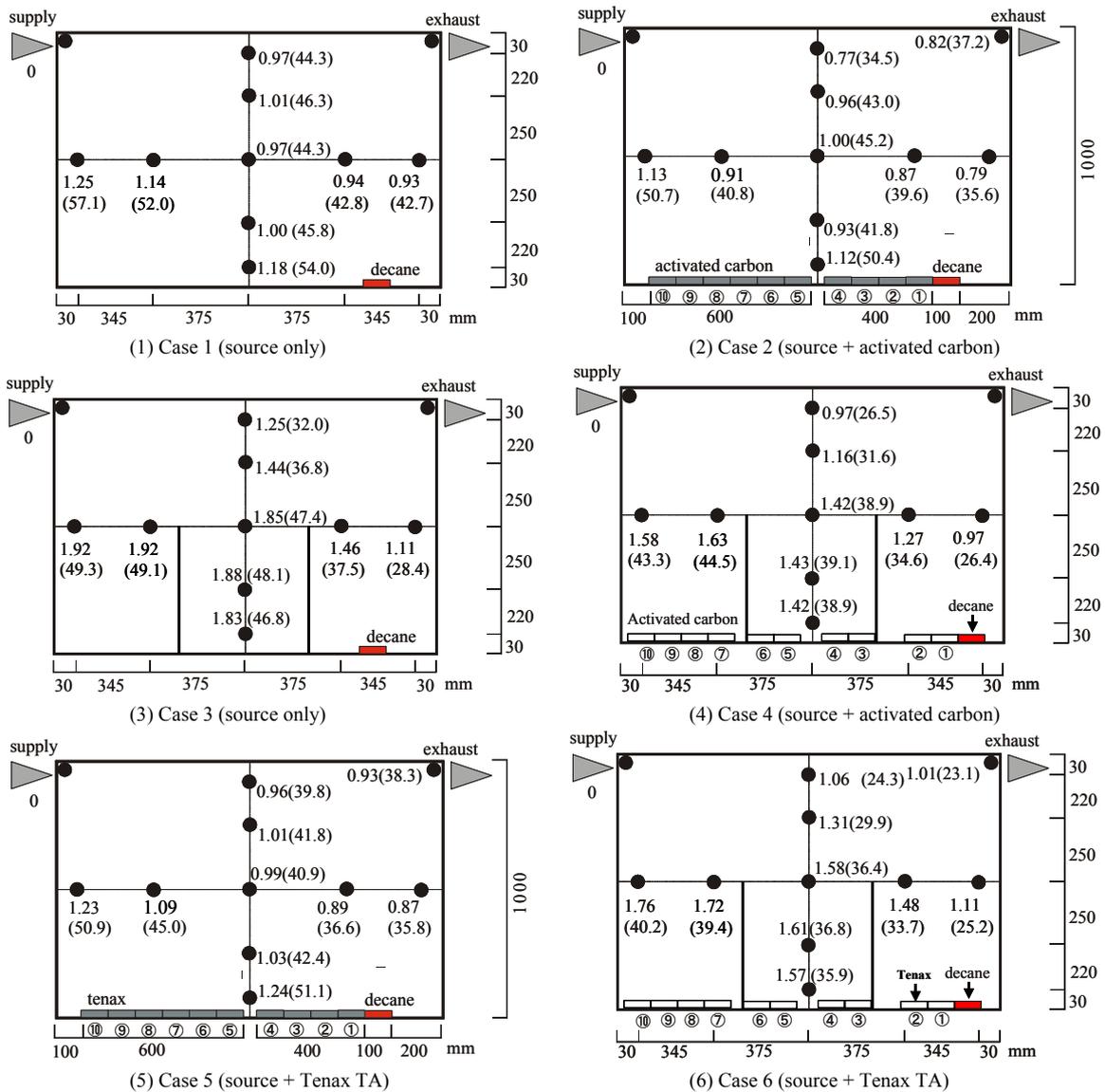


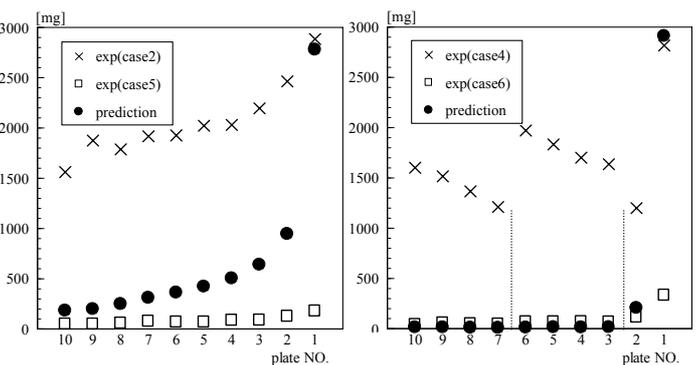
図6 室内各点のdecane濃度(模型実験結果、無次元値、但し括弧内は[mg/m^3])

着材として活性炭を併せて設置した case2 では、汚染源のみの case1 と比較し、室内の decane 濃度は 10~20%程度低下している。特に、左右両壁面付近で濃度低下が相対的に大きく、室内の吸着材が汚染濃度低減に効果があることを示している。また居住域に partition を設置した case3 及び case4 を比較すると、吸着材を設置した case4 において室内の decane 濃度が室全体で 10%~20%程度低下している。特に居住域中央部や左側の領域の滞留域において吸着材による濃度低減効果が相対的に大きい。

吸着材として Tenax TA を用いた case5 では、活性炭を用いた case2 と比較して全体的に室内の実次元 decane 濃度が高くなっている^{注2)}。また居住域に partition を設置した case6 では、吸着材を設置しない case3 と比較すると室内での濃度低減が観察されるが活性炭を用いた case4 と比べ、無次元濃度の低減効果は小さくなっている。

6.2 decane 放散速度および吸着材の吸着速度

表4に sus304 製容器を用いて設置した decane の重量変化より直接算出した放散速度を示す。吸着速度は時間一定とし、図6の床面に設



(1) Partition 無しの場合 (2) Partition 有りの場合
図7 活性炭の吸着量分布(plate番号は図6(2)の①~⑩に対応)

置した容器①から⑩の全活性炭の平均値として算出している。表中の無次元値は case1 の放散 flux で無次元化している。

汚染源のみの case1 および活性炭をあわせて設置した case2 では、decane の放散速度は両者ともに $9.7 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$ 程度でほぼ一致した値となった。また居住域に partition を設置した case3 では、case1 と比

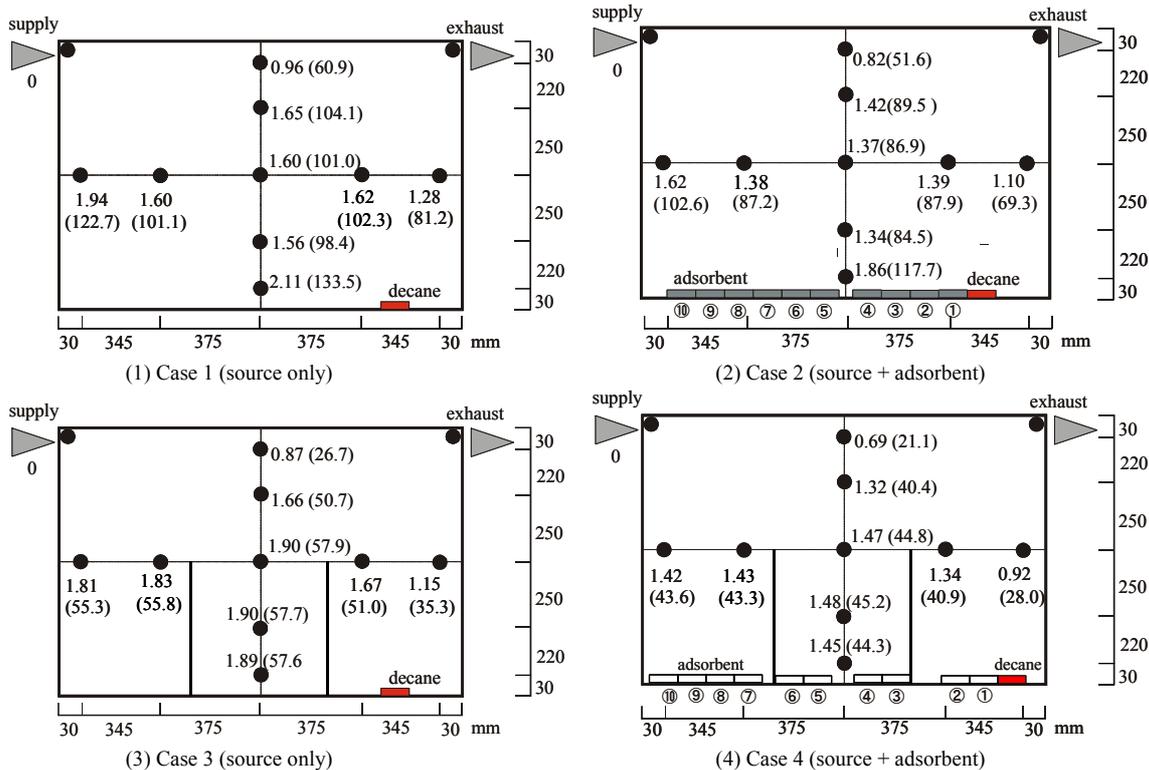


図8 室内各点の decane 濃度 (数値解析結果、無次元値、但し括弧内は[mg/m^3])

較し decane の放散速度が 40%程度に減少している。これは居住域に partition を設置したことにより室内の循環流が阻害され、decane 溶液表面の風速が減衰し、物質伝達率が低下したこと、および decane 溶液近傍の濃度が上昇しポテンシャル差が小さくなったことに起因する。居住域 partition の他、吸着材を設置した case4 では、case3 と比較し、10%程度放散速度が増加している。

吸着材として Tenax TA を用いた case5 および case6 では、吸着材として活性炭を用いた case2 および case4 と比較し、放散速度は 10%程度低い値となった。

表5に各ケースにおける decane の吸着速度($\text{mg}/\text{m}^2\text{h}$)の測定結果を示す。吸着速度は、吸着材の重量変化を測定し、床面に設置した容器10個の平均値から時間一定として算出している。表中の無次元値は各ケースの放散 flux で無次元化している。

吸着材として活性炭を用いた case2 では吸着速度の測定値は $1.72 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$ 、居住域に partition を設置した case4 では $1.14 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$ となった。本実験は相対湿度 50%で行っているため、本測定結果は decane のみならず水蒸気吸着を含んだ値である^{注3)}。疎水性の吸着材である Tenax TA を用いた case5 および case6 では、水蒸気吸着が無視できるため、活性炭を使用した case2 および case4 と比較して 3~5%程度の吸着速度となっている。

6.3 吸着材の吸着量分布

図7に容器毎の活性炭の吸着量分布を示す。全ての実験ケースにおいて decane 発生源に最も近い容器①で吸着量が最大となっており、パーティションを設置しないケースでは風下側に向かって吸着量が減少していく傾向がある。パーティションを設置するケース(特に case4)では、パーティションによって生じた逆流に沿って吸着量が減少していくことが分かる。

表4 decane 放散速度

	Experiment	CFD
Case1	1.00 ($9.69 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)	1.00 ($13.6 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)
Case2	1.00 ($9.72 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)	1.00 ($13.6 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)
Case3	0.57 ($5.54 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)	0.48 ($6.58 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)
Case4	0.61 ($5.91 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)	0.49 ($6.60 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)
Case5	0.92 ($8.94 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)	1.00 ($13.6 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)
Case6	0.51 ($4.94 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)	0.49 ($6.60 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)

(実験・計算共に case1 の放散 flux で無次元化)

表5 吸着材の吸着速度

	Experiment	CFD
Case1	-	-
Case2	0.18 ($1.72 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)	0.015 ($0.21 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)
Case3	-	-
Case4	0.19 ($1.14 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)	0.021 ($0.14 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)
Case5	0.0063 ($0.056 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)	0.015 ($0.21 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)
Case6	0.012 ($0.060 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)	0.021 ($0.14 \times 10^4 \text{ mg}/\text{m}^2\text{h}$)

(実験・計算共に各ケースの放散 flux で無次元化)

7. 数値解析結果

7.1 室内濃度分布

図8に数値解析による居室モデル内の濃度分布解析結果を示す。図中の値は実験結果と同様に、decane 放散速度と換気量より算出される

完全混合濃度で無次元化して示す(括弧内の値は mg/m^3)。

図 8(1)に partition のない case1 の室内濃度分布解析結果を示す。実験結果と同様に無次元濃度分布性状は床近傍と左の空間で高濃度となる傾向を示す。有次元の濃度値(mg/m^3)は実験に比べて 2 倍程度と高い値を示している。吸着材を設置した case2 では、吸着材の効果により、case1 に比べて 15~20%の濃度低減が見られた。また、実験では濃度低減にばらつきがあったのに対し、計算は全体的に濃度が低減している。

図 8(3)に partition のある case3 の室内濃度分布解析結果を示す。case1 と同様に case3 の無次元濃度分布は実験結果と良く一致し、濃度分布性状は中央下部と左の空間で高濃度となる傾向を示した。有次元の濃度値(mg/m^3)は吹出口からの空気が影響する空間上部を除いて数値解析結果が実験結果より 1 割ほど大きい程度であり、良く一致していると言える。case1 と case3 を比較すると、partition を設置した case3 で実験結果との対応が良い。2 次元で行った CFD による流れ場の解析精度は partition の無い case1 および partition を設置した case3 の両者の幾何形状で非常に良く、実験結果との対応も良い(図 4)ことから、解析対象空間の幾何形状がより単純である case1 で濃度分布の再現性が低下している原因は、実験における微小域の 3 次元性に起因すると考えられる。即ち、case1 は 2 次元の室内模型実験の中で、空間の広い領域で障害物がなく、流れのパスが長いこと、少しい擾乱により流れ場が大きく変動する可能性がある。これは実験の信頼性が若干低下する傾向があることを意味する。case3 は、室内に設置された partition により流れのパスが短くなり、室内の流れが、あまり微細な条件に影響されず、実験の再現性が高く、信頼性も相対的に高くなっていると考えられる。

吸着材を設置した case4 では汚染源のみの case3 と比較すると、実験では室内で 10~15%の濃度低減と多少ばらつきがあったのに対し、数値解析では模型内の濃度が全般的に約 20%低減する結果となった。有次元の濃度値(mg/m^3)については良く一致する結果となっている。

7.2 decane 放散速度および吸着材の吸着速度

表 4 に数値解析による decane 放散速度結果を実験結果と併せて示す。実験、数値解析ともに各ケースの値で無次元化している。decane 放散速度は case1 および 2 で約 30%、case3 および 4 で約 10~20%ほど数値解析結果が大きくなる結果となった。これは実験と数値解析における微少な境界条件の差異等による流れ場の差異、さらには流れ場の他に室内拡散場の性状が多少異なることにより放散量(物質伝達率)の差異となったものと考えられる。

表 5 に吸着速度に関する解析結果を示す。対応する実験では、吸着材として活性炭を用いた実験の吸着量が、最も大きい値を示しているが、これらの多くは空気中の水蒸気であることが確認されている。数値計算では水蒸気吸着は考慮せず、decane の吸着量のみを評価しているため、むしろ Tenax 実験と対応した解析条件と考えられるが、今回の解析では良好な一致は得られなかった。これは、Tenax TA の表面濃度の境界条件を $C_s=0$ と仮定していることが原因の 1 つと考えられる。decane に対する Tenax TA の吸着等温線を測定し、吸着等温式を含めた適切な境界条件の設定が必要である。

7.3 吸着材の吸着量分布

図 7 に容器毎の活性炭の吸着量分布を示す。数値解析結果は decane

発生源に最も近い容器①で吸着量が最大となっており、風下側に向かって吸着量が急激に減少していく傾向がある。

7.4 考察

吸着材を設置した case4 の数値解析結果では、活性炭による吸着分が 19%、排気口より室外に輸送される分が 81%の割合となった。今回は換気回数 144 回/h で大量の換気を行っており、換気に比べ吸着による汚染質濃度低減効果は小さいが、換気量の減少とともに相対的に吸着による汚染質濃度低減効果は大きくなるものと考えられる。

また、本解析では低 Re 型 $k-\epsilon$ model を用いて、境界層粘性底層における拡散現象までを解析対象としており、建材表面での濃度勾配の予測、即ち物質伝達率の予測を正しく行うことが可能である。即ち本報で示した数値解析結果は、蒸散支配型の物質放散現象ならびに吸着材に対する吸着性状を定性的には十分な精度で再現していると考えられる。

8. 結論

- (1) 居室模型を用いた吸着材による室内濃度低減効果に関する実験を行った結果、室内に設置した吸着材は室内汚染低減に効果があることが確認された。
- (2) 室内を partition により仕切った場合、汚染質濃度低減には汚染発生位置近傍の吸着材が大きく寄与する。室全体の濃度は partition が無い場合に比べ上昇した。
- (3) 実験に対応する数値解析を行った結果、定性的対応は十分であるが定量的対応は不十分であった。より厳密な吸着モデルを組み込んだ数値解析を今後行う予定である。

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。また本研究を行うにあたり太田直希氏(研究当時東京大学大学院)から多大なるご協力を得た。関係各位に深甚なる謝意を表する次第である。

注

[1] 図 5 の吸着等温点の分布図より、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、十分な量の活性炭が確保された場合、 C_{ad} は低レベルに保たれ、結果として活性炭表面濃度 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 $k_H=\infty$ と仮定したことと同値となる。

数値解析では低 Re 型 $k-\epsilon$ model を用いて粘性底層の拡散現象まで解析している。即ち、 $C_s=0$ の仮定、および CFD で解析される第一離散点(距離 Δx_1)の濃度 C_1 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。

$$J_s = -D \frac{\partial C}{\partial x} = -D \cdot \frac{C(\Delta x_1) - C_s}{\Delta x_1} = -D \cdot \frac{C(\Delta x_1)}{\Delta x_1} \quad (A1)$$

- [2] Tenax TA の前処理として行っている恒温乾燥による脱着が不十分であり、Tenax TA の吸着能力を最大限に利用できていない可能性がある。この原因を解明する為にはdecaneに対するTenax TAの吸着等温線を測定する必要がある。また、活性炭(顆粒状)と比較して、実験に使用したTenax TAは細メッシュ(粉末状)であった。このため吸着材内部に対する拡散が抑制され、見かけ上の吸着能力が過小評価された可能性がある。これらの原因解明に関しては、今後の課題である。
- [3] case2の条件で、汚染源であるdecane溶液を除去した条件で、吹出空気の相対湿度を20%、50%および80%の3段階で変化させ、活性炭の吸着速度を測定した結果を表A-1に示す。相対湿度が上昇するに従い、活性炭への吸着速度が上昇している。Decaneを設置したcase1と比較すると活性炭に対する吸着物質の大部分が汚染源から放散されたdecaneではなく、空気中の水蒸気であることが分かる。

表 A-1 相対湿度を変化させた場合の吸着速度

相対湿度	活性炭吸着速度 (mg/m ² h)
20%	0.11×10^4
50%	1.27×10^4
80%	4.56×10^4

記号表

U_{in}	: 吹出風速=代表風速 [= 3.0 m/s]
U_0	: 代表風速 [= 3.0 m/s]
L_0	: 代表長さ [= 0.02m]
U	: x 方向風速成分 [m/s]
W	: z 方向風速成分 [m/s]
C	: decane 気中濃度 [mg/m ³]
C_s	: 吸着材表面濃度 [mg/m ³]
C_{sat}	: 飽和気相濃度 [mg/m ³]
C_{ad}	: 吸着相濃度(吸着量) [mg/g]
C_{ad0}	: 飽和吸着量 [mg/g]
k_h	: Henry 定数 [m ³ /g]
D	: 気中での decane の拡散係数 [m ² /s]
J_s	: 吸着 flux [mg/m ² s]
Δx_i	: 固体境界面から第一離散点までの距離[m]

参考文献

- [1] 村上周三、加藤信介、伊藤一秀：床材からの内部拡散支配型物質放散に対する材料温度の影響と換気除去効果 CFD 解析による室内の化学物質空気汚染の解明 第1報：日本建築学会計画系論文集 No. 523、1999.9、pp 63-69
- [2] 近藤靖史、村上周三、加藤信介、藤村淳一、伊藤一秀、山本明：多孔質固体内部における物質拡散のモデル化とマイクロマクロモデルによる室内濃度予測 揮発性有機化合物(VOCs)の吸脱着・放散現象のモデル化とその数値予測 第1報：日本建築学会計画系論文集、No. 535、2000.9、pp 15-21
- [3] 伊藤一秀、加藤信介、村上周三：換気効率指標の数値解析検証用の2次元室内気流実験 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究：日本建築学会計画系論文集、No. 534、2000.8、pp 49-56
- [4] 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
- [5] Sparks, L.E., Tichenor, B.A., Chang, J. and Guo, Z. : Gas-phase mass transfer model for predicting volatile organic compound (VOC) emission rates from indoor pollutant sources., Indoor Air 6, pp. 31-40, 1996
- [6] Little, J.C., Hodgson, A.T. and Gadgil, A.J. : Modeling emissions of volatile organic compounds from new carpets, Atmospheric Environment, Vol. 28, No.2, pp. 227-234, 1994
- [7] 朱清宇、村上周三、加藤信介、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23) 実大居室模型を対象とした化学物質放散・吸脱着のCFD解析：空気調和衛生工学会講演論文集、2000.9、pp5-8
- [8] 太田直希、加藤信介、村上周三、伊藤一秀、朱清宇：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28) 実大居室模型を用いた化学物質の吸着効果と濃度分布の測定(2)：日本建築学会年次大会、2001.9、D-2、pp813-814