

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及び CFD 解析

学生会員 ○太田 直希(東京大学 大学院)

正会員 加藤 信介(東京大学 生産技術研究所)

正会員 村上 周三(慶應義塾大学)

正会員 伊藤 一秀(東京工芸大学)

学生会員 朱 清宇(東京大学 大学院)

1. 序 既報^{文1)}において、建材からの汚染質の放散と吸脱着モデルを開発し、そのモデルを CFD に組み込んだ汚染質濃度分布予測を行った。また、数値解析の有効性を検証するため、実大スケールの単純形状の 2 次元気流模型を用い、汚染質濃度分布性状や活性炭の吸着効果に関しての測定、及び CFD 解析を行った^{文2)}。本報では模型内にパーティションを設置し、室内形状をより複雑として行った実大スケール模型における汚染質濃度分布性状の解析、及び活性炭の吸湿性状も含めた吸着効果測定に関しての実験結果^{文3)}、さらに対応する CFD 解析結果を報告する。

2. 実験概要 一般的な居室をモデル化した実大模型を用いて、床面に化学物質汚染源及び吸着材を設置した場合の室内濃度分布及び化学物質放散速度、吸脱着速度を測定する。

2.1 実大居室模型 実験に用いた模型の概略を図 1 に示す。模型は一般的な居室をモデル化したもので $1500^X \times 300^Y \times 1000^Z$ mm の大きさを持つ。X-Y 方向に 2 次元的な流れ場を形成することを意図し、キャビティ幅(300mm、Z 方向)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(Y 方向)20mm(=L₀)である。模型内には X 方向に 500mm、1000mm の位置に高さ 500mm のパーティションを設置し、室内を 3 分割している。天井、床、左右両壁面及びパーティションは 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恒温恒湿室内に設置され、一定温湿度(23℃、50%)で制御される。居室模型の吹出風速 U₀ は 3 m/s (換気回数 144 回/h)に制御している。

2.2 化学物質汚染源・吸着材 汚染源は蒸散支配型の建材をモデル化し decane 溶液を使用する。decane 溶液は $100^X \times 300^Y \times 5^Z$ mm の sus 製容器に満たし、模型床面の右側(吸込口側)の空間に設置する。吸着材は黒色顆粒状の活性炭で、4-6mesh(粒径 3.336-4.76mm)を使用^{注1)}。実験に用いる活性炭は前処理として、シリカゲルと共に真空乾燥器

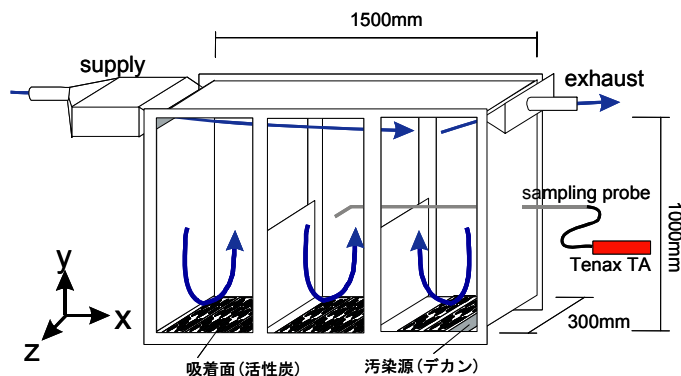


図 1 実大居室模型及びサンプリング方法
表 1 実大居室模型実験ケース

実験ケース	汚染源	吸着材	温度 湿度
Case1	Decane 溶液を sus 製容器に設置 ($100^X \times 300^Y \times 5^Z$ mm)	無し	23℃ 50%
Case2		粒状活性炭 sus 製容器を 10 個設置 ($100^X \times 300^Y \times 5^Z$ mm)	
Case3	無し		

の中(0.1Torr 以下)で3時間以上 170℃程度の環境に曝している。吸着材は $100^X \times 300^Y \times 5^Z$ mm の sus 製容器に約 50g 敷き詰めたものを全 10 個(活性炭総量約 500g)用意し、decane の下流側に 2 つ、パーティションを挟んで隣の空間に 4 つ、さらに隣の空間に 4 つ設置する。

2.3 実験ケース 実験ケースを表 1 に示す。床面に汚染源の decane 溶液のみを設置する case1 と、汚染源の他に吸着材の活性炭を設置する case2、活性炭のみを設置して空気中の水蒸気の吸着量を評価する case 3 の 3 ケースを設定する。すべての実験は温度 23℃、湿度 50%で行う。活性炭による吸着効果を期待するため、汚染源は床面近傍の流れの上流側に設置し、活性炭は汚染源の下流側に設置する^{注2)}。

2.4 化学物質サンプリング・分析法 室内各点の化学物質濃度は模型内に挿入した sus 製のサンプリングチューブを介して、Tenax TA により吸着捕集(0.1L/min の速度で全 0.5L サンプリング)する。分析は加熱脱着の後、GC/MS で行う。GC/MS の分析条件は既報^{文2)}と同様である。

3. CFD 解析概要 実大居室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。解析ケースは表 1 の case1,2 とする。

3.1 流れ場の解析条件 流れ場は境界層粘性底層における拡散を精度良く解析するために低 Re 型 k-ε model (Abe-Nagano model)により解析する。解析は模型の中央断面(図 1 の X-Y 面)を対象とし 2 次元で行う。メッシュ数は 206(X)×306(Y)、スカラー方程式, 運動方程式ともに移流項は QUICK を用いる。

3.2 拡散場の解析条件 汚染発生源である decane 溶液は、表面に decane の飽和蒸気圧から算出される飽和気相濃度($C_s=8.8 \text{ g/m}^3$, 23°C)を与える。吸着面での吸着容量は極めて大きく、吸着材(活性炭)の吸着濃度は実験を通してほとんど 0 と見なせるものと仮定して、吸着面での気相濃度には 0 を与える^{注 1)}。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、吸込口より室外に排出される。空气中の decane 拡散係数は $D_a=4.80 \times 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$ 。数値解析条件を表 2 に示す。

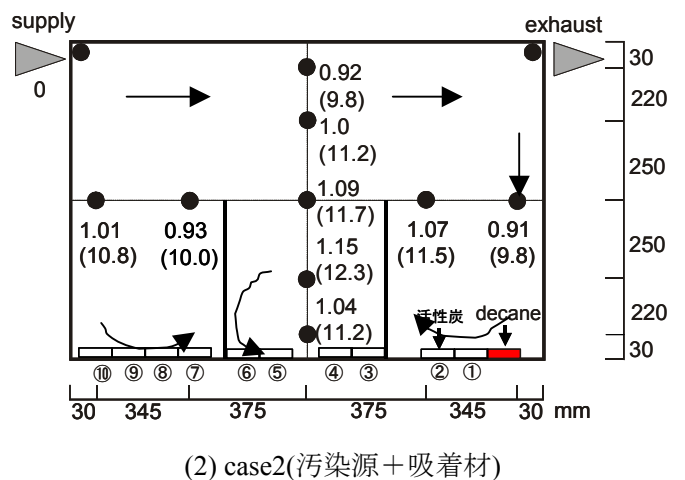
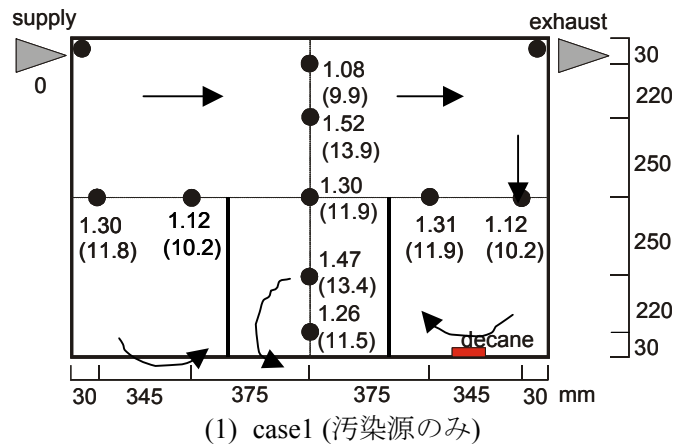
4. 実大室内模型実験結果 図 2(1),(2)に実験による模型内の濃度分布測定結果を示す。図中の測定値は decane の放散速度(電子天秤による重量測定から直接算出)と換気量より算出される完全混合濃度で無次元化している(括弧内の値は測定値 mg/m^3)。表 3,4 の decane 放散速度及び活性炭吸着速度(水蒸気等を含み decane のみとは限らない、床面に設置した容器 10 個の活性炭の平均値として算出)は時間によらず一定として算出している。濃度測定は模型内に decane 溶液を設置した時点より 5 時間経過した後に行っている。

4.1 汚染源のみを設置したケース(case1、図 2(1)) 室内は天井面近傍の風速が強くなる他、天井を沿ってきた気流が対向壁に当たって右の空間に流入するため時計回りの循環流が生じる。また、右の空間で循環した気流は吹出口に向かって流れるため、中央と左の空間には反時計回りの循環流が生じることが LDV による気流測定により確認されている^{文 4)}。図 2(1)より中央の空間とその上部の空間で循環流の渦の中心の decane 濃度が高くなっていることが観察される。decane の放散速度は $1.98 \times 10^4 \text{ (mg/m}^2\text{h)}$ であった。(表 3)

4.2 汚染源、吸着材を設置したケース(case2、図 2(2)) case1 と比較して、室内の decane 濃度は室全体で 10~20%程度低下している。特に、右の空間での decane の下流域や循環流の中心で濃度低下が顕著であり、室内の吸着材が汚染濃度低減に効

表 2 CFD 解析条件

乱流モデル	低Re型k-ε model (Abe-Nagano Model)
Reynolds数	$U_{in}L_{in}/\nu = 4200 (U_0=3\text{m/s}, L_0=0.02\text{m})$
差分スキーム	移流項: QUICK (スカラー方程式、運動方程式共に)
流入境界	$U_{in}=3\text{m/s}, L_{in}=0.02\text{m}$ $K=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.05)^2, \varepsilon = C_\mu \cdot K^{3/2}/L_{in}$
流出境界	U_{out} : 質量保存による $K_{out}, \varepsilon_{out}$: free slip
壁面境界	No slip
温・湿度度	23°C , 50%
吹出風速	3m/s (換気回数144回/h)
供給空気濃度	$C_{in}=0$
飽和気相濃度	$C_s=8.8 \text{ g/m}^3 (23^\circ\text{C})$
空气中拡散係数	$Da=4.80 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} (23^\circ\text{C})$
表面濃度	$C_s=0$ と仮定



(図中の測定値は無次元化(括弧内の値は mg/m^3)

図 2 実大居室模型実験結果

果があることを示している。decane 放散速度は吸着材を設置しない case1 と比べ case2 の方が若干大きい値となった(表 3)。これは、活性炭を設置することによって室内の decane 濃度が低下し、decane 発生源近傍での濃度勾配が大きくなったためと考えられる。

4.3 吸着材のみを設置したケース(case3、図 6) 空气中の水蒸気の吸着量を評価するため、汚染発生源のない条件で換気し、吸着材への水蒸気吸着量を測定した。表 4 に活性炭吸着速度を、図 6 に case2 及び 3 の容器毎の活性炭吸着量分布を示す。case3

と比較して、case2 では decane 発生源に最も近い容器①で吸着量が大きく、5 時間で活性炭 1g 当たり約 40mg であり、case3 より 10mg 程度多く吸着している。しかし、容器②から⑩では case2,3 共に吸着量はほとんど変わらない。活性炭の吸着容量が十分に余っており、水蒸気と decane 吸着がそれぞれ独立して生じるものとする、case2,3 で吸着量がそれほど変わらないことから、これらの場所では decane の吸着はそれほど多くないものと考えられる。

5. CFD 解析結果と考察 図 3 に既報^{文4)}の実験と数値解析の風速ベクトル図を、図 4 に実験と数値解析の $x=750\text{mm}$ における平均風速分布 u/U_0 及び $y=500\text{mm}$ における風速成分 v/U_0 の比較を示す。図 4 に示されるように模型断面 x,y 方向の中央における風速 u,v はよく一致している。また、風速ベクトル図を比べると数値解析では実験に比べて左の空間において循環流が若干弱くなっているが概ね一致していると言える。この流れ性状を用いて decane 放散・拡散シミュレーションを行った。図 5(1), (2) 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。今回の数値解析では、case1,2 共に decane の放散量は実験に比べ約 4 倍程度大きい値となった。シミュレーション結果においても実験同様に、シミュレーション結果における 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。

5.1 汚染源のみを設置したケース (図 5(1)) 図 5(1)に汚染源のみを設置した case1 の室内濃度分布解析結果を示す。実験結果(図 2(1))と同様に、室内循環流の中心で高濃度となっている。しかしながら濃度分布性状は、実験より若干ではあるが室全体で均一な傾向を示す。数値解析の放散速度が実験に比べて 4 倍程度大きくなった。この原因は不明であるが、他の解析(例えば Small Test Chamber^{文5)}等)では実験と数値解析はよく一致しており、数値解析の精度は確認されているため、この差異は実験と数値解析における微少な境界条件の差異が流れ場での大きな差異となり、さらに放散量(物質伝達率)の差異となったと考えられる。

5.2 汚染源、吸着材を設置したケース (図 5(2)、図 6) 図 5(2)に汚染源と吸着材を併せて設置した case2 の室内濃度分布解析結果を示す。汚染源のみのケース(case1)と比較すると、実験では室内で 10

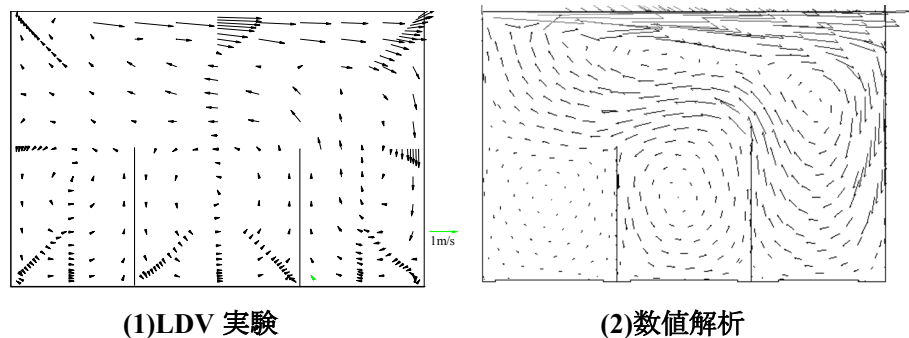
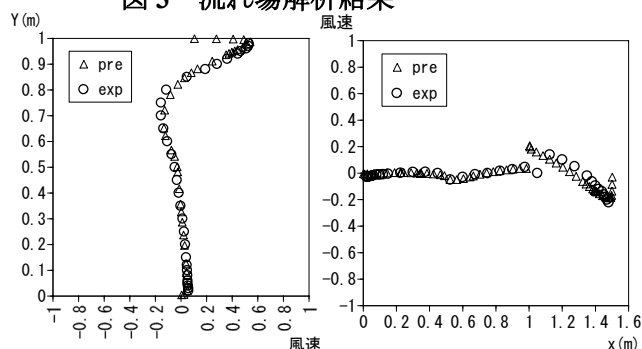
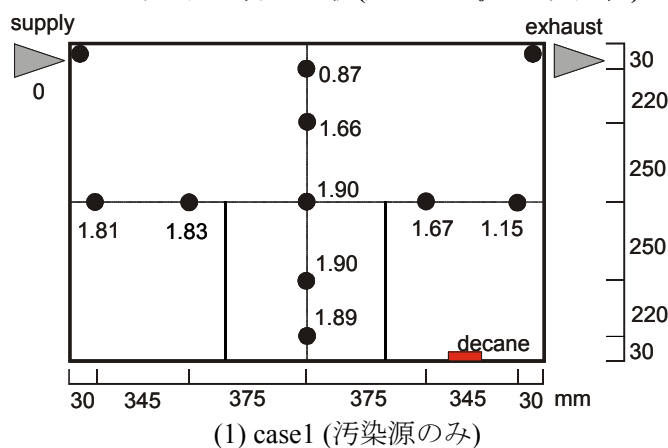


図 3 流れ場解析結果

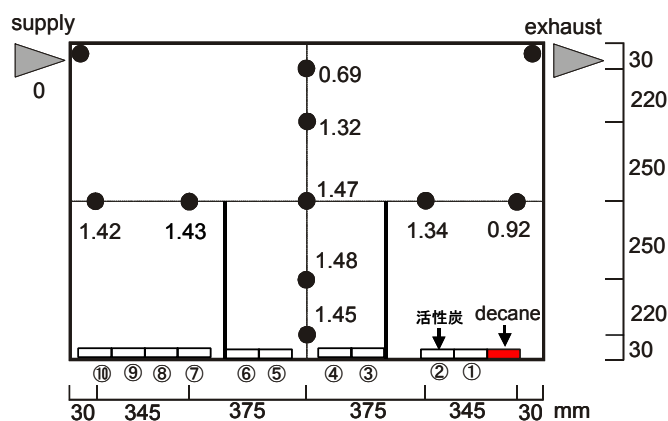


(1) $X=0.75\text{m}$ における風速 u/U_0 (2) $Y=0.5$ における風速 v/U_0

図 4 平均風速分布比較(風速は U_0 で無次元化)



(1) case1 (汚染源のみ)



(2) case2 (汚染源+吸着材)

図 5 CFD 解析結果(図中の値は無次元化)

~20%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。また decane 放散速度は、実験においては吸着材を設置しない case1 に比べ活性炭を設置した case2 で多少大きくなったのに

対し、数値解析においては case2 が対応して多少大きい、ほぼ同じ値となった。図 6 に示す活性炭吸着量分布に関しては、汚染発生源の隣の容器の活性炭吸着量は非常に大きい、2 番目の活性炭の吸着量は急激に減少し、パーティションで隔たれた隣接空間では汚染質はほとんど吸着されていない。この結果は模型実験の case2,3 を比較した結果と同じ場合である。

6. 考察 (1) 模型実験の case2 において、排出口濃度はおよそ $9.8\text{mg}/\text{m}^3$ 程度である^{注3)}。流入空気の decane 濃度が 0 であることから、換気によって持ち去られる decane 量は $9.8\text{mg}/\text{m}^3 \times 0.45\text{m}^3 \times 144 \text{回}/\text{h} \times 5\text{h} = 3.18\text{g}$ となる。汚染源から放散した decane の量は $0.69\text{g}/\text{h} \times 5\text{h} = 3.45\text{g}$ であることから、活性炭への decane の吸着量は $3.45 - 3.18 = 0.27\text{g}$ であると考えられ、模型実験において放散された全 decane 量に対し、活性炭による吸着分が 8%、排気口より室外に輸送される分が 91%の割合となった。また吸着材を設置した case2 の数値解析結果において、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%の割合となり、実験とほぼ対応する結果となった。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。(2) 既報^{文1)}のパーティションを設置しない場合と比較して、室全体で完全混合濃度により無次元化した decane 濃度は、実験では case1,2 共に約 2 倍程度、数値解析では case2 において約 3 倍強上昇している。これはパーティションの設置によって、室内の空気循環が妨害され、decane の室内滞在時間が長くなったことが原因と考えられる。

7. 結論 (1) 室内の吸着材は室内汚染低減に効果がある。(2) 室内をパーティション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。室全体の濃度はパーティションがない場合に比べ上昇した。(3) 今回の実験では活性炭への吸着は、換気(換気回数 144 回/h)による除去量に比べ濃度低減に対する寄与は小さい。数値解析においても同様の傾向が確認された。(4) 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。(5) 今後はより厳密な吸脱着モデルを組み込んで数値解析を行う。(6) また、疎水性の吸着剤として Tenax TA を使用した場合についても実験を行い、吸着剤の差異による影響の検討を行う。

表 3 decane 放散速度(case1 の放散量で無次元化)

	実験	数値解析
case1 (汚染源のみ)	1 ($1.98 \times 10^4(\text{mg}/\text{m}^2\text{h})$) (0.59g/h)	1 ($6.58 \times 10^4(\text{mg}/\text{m}^2\text{h})$) (1.97g/h)
case2 (汚染源+吸着材)	1.16 ($2.31 \times 10^4(\text{mg}/\text{m}^2\text{h})$) (0.69g/h)	1 ($6.60 \times 10^4(\text{mg}/\text{m}^2\text{h})$) (1.98g/h)

表 4 活性炭吸着速度(decane 放散量で無次元化)

	実験	数値解析
case2 (汚染源+吸着材)	0.47 ($9.24 \times 10^3(\text{mg}/\text{m}^2\text{h})$) (2.77g/h)	0.02 ($1.41 \times 10^3(\text{mg}/\text{m}^2\text{h})$) (0.38g/h)
case3(汚染源なし)	— ($9.16 \times 10^3(\text{mg}/\text{m}^2\text{h})$) (2.70g/h)	—

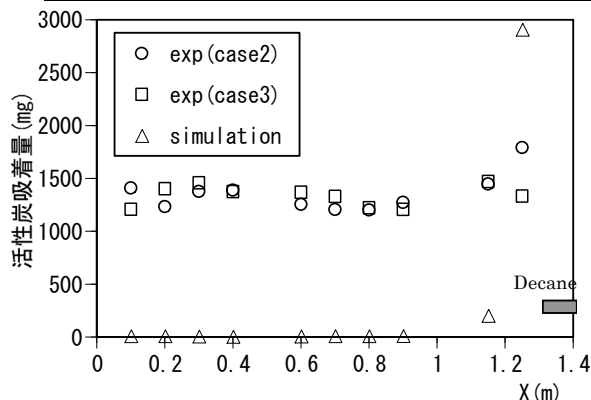


図 6 活性炭吸着量分布

謝辞 本研究の一部は、科学技術庁科学技術振興調整費(社会・基盤研究 生活者ニーズ対応研究「室内科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健康学会学術委員会・室内科学物質空気汚染調査研究会(委員長: 村上周三 慶應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。関係各位に甚大なる謝意を表する次第である。**注(1)** 本報で使用する活性炭は重量法により decane の吸着量を調べており、 $100(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 近傍の濃度で最適近似した Henry 型の吸着等温式($C_{\text{ad}} = k_h \cdot C$)の Henry 定数 k_h は $1.8 \times 10^{-2} (\text{m}^3/\text{g}, 25^\circ\text{C})$ であり、飽和吸着量 C_{ado} は $410 (\text{mg}/\text{g})$ 程度である。本模型の decane 濃度は $10 \text{mg}/\text{m}^3 (= 10\text{ppm})$ と一般的な化学物質汚染室内濃度に比べ 100 倍程度高い。高濃度では低濃度の場合と比較し、吸着等温線の傾きが多少異り、吸着等は異なった性状となる。**(2)** 既報^{文2)}で報告した実験は供給空気の湿度を調整しておらず、今回の実験より低湿度の条件で実験している。再実験により湿度が活性炭の吸着性状、及び decane 放散性状に多少影響を与えることを確認している。**(3)** 排気濃度測定値は変動が大きく^{文2)}、今回は排気口上流の室内濃度による推定値を使用。**参考文献** (1) 加藤、村上、近藤ら: 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 9) 多孔質建材内部における吸脱着を考慮した拡散現象のモデル化と各濃度ポテンシャルの関係: 空気調和衛生工学会講演論文集、1999.9、II、pp 473-476 (2) 朱他: 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 A-II、P5-8 (3) 太田他: 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): 日本建築学会大会学術講演論文集、2001.9(4) 伊藤他: 換気効率指標の数値解析検証用の 2 次元室内気流実験: 日本建築学会計画系論文集、No. 534、2000.8(5) 神他: 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 22) Small test Chamber を設置した建材表面の物質伝達率に関する CFD 解析: 空気調和衛生工学会講演論文集、2000.9 A-II、P1-4