

室内化学物質による呼吸空気質汚染の数値解析とその制御に関する研究 (その1)

床材からの TVOC 放散と換気除去効果の検討

正会員 ○加藤信介\*<sup>1</sup> 同 村上周三\*<sup>2</sup>  
同 伊藤一秀\*<sup>3</sup> 同 近藤靖史\*\*

数値解析、TVOC、Flushing

1. 序 近年、住宅・オフィスにおいて微量化学物質による空気汚染の問題が顕在化している<sup>1,2)</sup>。本研究は、特に総揮発性有機化合物(TVOC)に着目し、その建材等からの室内への放散・拡散の構造を CFD を用いて詳細に解析し、呼吸空気質の汚染低減法を考察する。本報では特に人体呼吸域汚染に大きな影響を与えると思われる床材からの TVOC 放散に関して換気の観点から検討する。

2. TVOC 放散・拡散モデル TVOC の放散・拡散過程を単一物質の放散・拡散にモデル化する(図 1、表 1)<sup>3,4)</sup>。

2-1. 分子拡散による輸送現象(建材中) 建材中の TVOC は 1 次元拡散方程式で表現されるものと仮定する(表 1(1)式)。材料中における TVOC の拡散係数  $D$  を定義し、材料中の初期濃度  $C_0$  分布と共にチャンパー法による放散実験結果よりこれを推定する<sup>5)</sup>。2-2. 建材表面・空気境界面での輸送現象 建材表面での空気中への放散量と材料中の輸送量は保存される(表 1(2)式)。2-3. 移流・拡散による輸送現象(空气中) 空气中に放散された TVOC は室内気流により移流・拡散され、吸込口より排出される(表 1(3)式)。境界層粘性底層の拡散現象を解くため、低 Re 型  $k-\epsilon$  model に基づく気流解析を使用<sup>7)</sup>。

3. Flushing 建材から室内への TVOC 放散・拡散現象は、建材等の TVOC 汚染源強度(材令)、拡散係数(材料温度)、汚染質空中濃度、換気量、空気温度等、様々な要因の影響を受ける。種々の要因の中でも、汚染源強度(材令)、材料中拡散係数(温度)、換気量の 3 者は TVOC 放散・拡散現象を特徴づける主因となる<sup>8)</sup>。本報では特に換気に着目し、換気の効果を検討する。なお、本研究では換気量の一時的増大による室内洗浄を、通常の換気による汚染質除去である Purging と区別し、Flushing と定義する。Flushing 効果を、建材中の TVOC 拡散係数を材料温度上昇により増加させて短期に放散させる bake-out 効果と比較する。このため、室温、建材温度は 23℃ 及び 30℃ 両者の検討を行う。

4. 解析空間及び TVOC 発生源 4-1. 解析空間(図 2) 吹出スロット幅を代表長さ( $L_0=0.06m$ )とし、 $(x) \times (z)=75L_0 \times 50L_0$  ( $=4.5m \times 3.0m$ ) の 2 次元居室。本解析対象は精密模型実験により詳細な風速データが得られている<sup>9)</sup>。4-2. TVOC 発生源(図 3) カーペットの一種である SBR (polypropene Styrene-Butadiene Rubber <sup>10)</sup>) を対象とする。カーペット厚は  $0.25L_0$  ( $0.015m$ ) とし、カーペット中の TVOC については均一に初期濃度  $C_0=1.92 \times 10^8 \mu g/m^3$  を与える<sup>11)</sup>。

5. 解析ケース 5-1. 流れ場 吹出風速  $1/10 \cdot U_0$  ( $=0.1m/s$ 、換気回数 1.6 回/h)、及び  $U_0$  ( $=1.0m/s$ 、換気回数 16 回/h) の 2 種の流れ場。低 Re 型  $k-\epsilon$  model (MKC model <sup>7)</sup>) により解析。なお、スカラ方程式移流項は 1 次風上、その他は中心差分。5-2. 解析ケース(表 2) 室温 23℃、吹出風速  $1/10 \cdot U_0$  の場合を基本ケース(case1)。24 時間に 1 時間の割合で 吹出

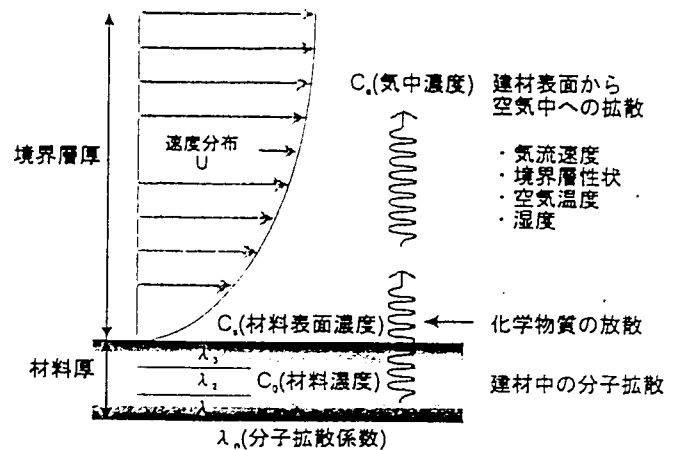


図 1 建材からの TVOC 放散・拡散現象

表 1 支配方程式

1. 分子拡散による輸送 (建材中)  
TVOC を単一物質にモデル化し材料厚方向(Z 方向)の 1 次元拡散を仮定

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad t > 0, 0 < z < 0.25L_0 \quad (1)$$

$D$ : カーペット(SBR <sup>10)</sup>)中の TVOC 拡散係数  
(23℃ :  $1.1 \times 10^{-14}$ , 30℃ :  $4.2 \times 10^{-14} m^2/s$ ) <sup>5,6)</sup> 注 1)

2. 建材表面・空気境界面での輸送  
建材表面から空気中への TVOC 移動量は、flux 量が保存

$$-D \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{w.s.+} = -Da \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{w.s.-} \quad w.s.: \text{wall surface} \quad (2)$$

w.s.+は建材側

3. 移流・拡散による輸送 (空气中)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (u_i C)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( Da + \frac{\nu_i}{\sigma} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

$D_a$ : 空气中の TVOC 拡散係数  
(23℃ :  $5.9 \times 10^{-6}$ , 30℃ :  $6.2 \times 10^{-6} m^2/s$ ) <sup>5,6)</sup> 注 1)  
 $\sigma$ : 1.0,  $\nu_i = C_\mu \cdot f_\mu \cdot k^2 / \epsilon$  <sup>7)</sup>

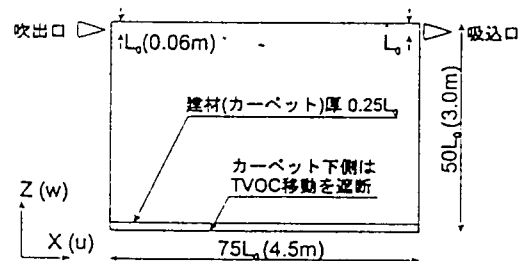


図 2 解析対象空間 (2次元)

風速  $U_0$  の流れ場で Flushing を行うケースを case2。また室温 30℃、吹出風速  $1/10 \cdot U_0$  の場合を case3、24 時間に 1 時間の割合で Flushing を行う場合を case4。解析は  $2.0 \times 10^7 \cdot T_0$  ( $T_0=L_0/U_0$ , 14 日間) 行う。計算・解析条件は表 3。

6. 解析結果 6-1. 平均風速分布(図 4) 流れ場の解析結果は

精密模型実験結果<sup>2)</sup>と非常に良く一致する。6-2. TVOC 濃度(図 5,6) 室温 23℃で Flushing を行わない case1 では、室平均 TVOC 濃度が計算開始より無次元時間  $1.0 \times 10^8$  (実時間 17 時間) 後に最大  $C_{max}/C_0=1.1 \times 10^8$  ( $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) となりその後、極めて緩やかに減衰する<sup>3)</sup>。室平均濃度は無次元時間  $2.0 \times 10^7$  (14 日間)でほとんど変化しない。その間の減衰は  $\Delta C/C_0=3.6 \times 10^{-11}$  ( $0.007 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )程度(図 5)。室温 23℃で Flushing を行った case2 では、Flushing を行っている時間のみ室平均濃度が低下し、case1 の 1/10 程度の濃度となるが、それ以外の時間は case1 と同様の値となる。無次元時間  $2.0 \times 10^7$  (14 日間)の計算時間では Flushing の効果は Flushing を行っている時間にのみ現れ、その後の平均濃度にはほとんど影響を与えない。室温 30℃で Flushing を行わない case3 では室平均濃度は最大  $C_{max}/C_0=4.1 \times 10^8$  ( $7.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )に達し、case1 の 4 倍程度の値となる。Flushing を行った case4 は、case2 の場合と同様に Flushing を行っている時間のみ室平均濃度が低下し、case3 の 1/10 程度の濃度となる。6-3. 考察 建材中の拡散特性時間(ここでは  $(0.25)L_0^2/D \cdot T_0$ , 0.25:無次元材料厚、で評価)である  $3.5 \times 10^{11}$  ( $2.5 \times 10^5$  日)に比べ極めて短い  $2.0 \times 10^7$  (14 日間)の TVOC 放散に関しては、 $6.0 \times 10^4$  (1 時間)の Flushing の効果は Flushing を行っている時間のみ有効であり、その後の平均濃度に大きな影響を与えない(図 5)。床面では平均濃度の 8 倍以上の濃度域が存在し、乳児や就寝者等の床面に近い位置で生活する者が高濃度に曝露されやすい(図 6)。成人・立位の呼吸域平均濃度( $z=25L_0$  ライン)は case1 で  $C_{av}/C_0=1.1 \times 10^8$  ( $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )程度の値となり、Flushing 時にはその 1/10 程度まで濃度が低下する。また TVOC 発生量は温度に強く依存する。

7. 結論 (1)建材中の無次元拡散特性時間  $3.5 \times 10^{11}$  ( $2.5 \times 10^5$  日)に比べ極めて短い  $2.0 \times 10^7$  (14 日間)という短期的な解析では室平均濃度はほとんど変化しない。(2)解析時間  $2.0 \times 10^7$  (14 日間)に対し、更に継続時間の短い  $6.0 \times 10^4$  (1 時間)の Flushing の効果は Flushing を行っている時間のみ有効であり、Flushing 後の平均濃度に大きな影響を与えない。(3)カーペット温度、室温が 23℃から 30℃に上昇することで、室平均 TVOC 濃度は 4 倍程度の値となる。(4)床付近では室平均濃度の 8 倍以上の濃度域が存在する。

[記号]  $U_0$ : 代表風速(1m/s),  $L_0$ : 代表長さ(0.06m, 吹出スロット幅),  $T_0 = L_0^2/U_0$   
 [注] [1] ここで示した  $C_0$ ,  $D$  はチャンバー法による SBR の TVOC 放散履歴を(1)~(3)式に基づく気流シミュレーションに当てはめ、最小 2 乗法により求めたものである<sup>2)</sup>。TVOC を構成する個別の化学物質の  $C_0$ ,  $D$  の測定値を統合したものではない。[2] 繊維部と接着剤によるその支持部よりなるカーペットの一種 [3] 製造後の材料により材料内に TVOC 分布が生じるので正確には分布性状を仮定する必要がある。[4] HASS102 換気基準では TVOC 設計基準濃度は  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。今回選んだ材料の解析結果はその 1/100 のレベル。  
 [参考文献] [1] 池田耕一他: 新築及び改築集合住宅の室内空気質測定その 2,3,4, 日本建築学会概論集 pp755-760, 1997 [2] 田辺新一: ホルムアルデヒド, VOC による室内空気汚染について, 日本建築学会概論集 pp767-768, 1997 [3] J.W. Axley, New mass transport elements and compounds for the NIST IAQ model, NIST GCR 95-676, 1995 [4] 村後鉄他: 拡散モデルを用いた建材からの脱ガス評価に関する研究, 日本建築学会概論集 1997 [5] Qingyan Chen 私信 [6] Bluyssen, P. M., et al, P. 1995. European database of indoor air pollution sources: the effect of temperature on the chemical and sensory emissions of indoor materials. TNO-Report 95- BBI- R0826. [7] Chikamoto, T., et al, Numerical Simulation of Velocity and Temperature Fields within Atrium based on Modified k-ε model Incorporating Damping Effect due to Thermal Stratification, Room Air

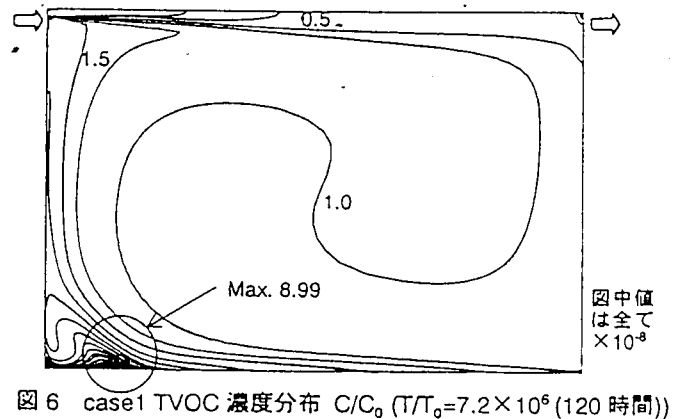
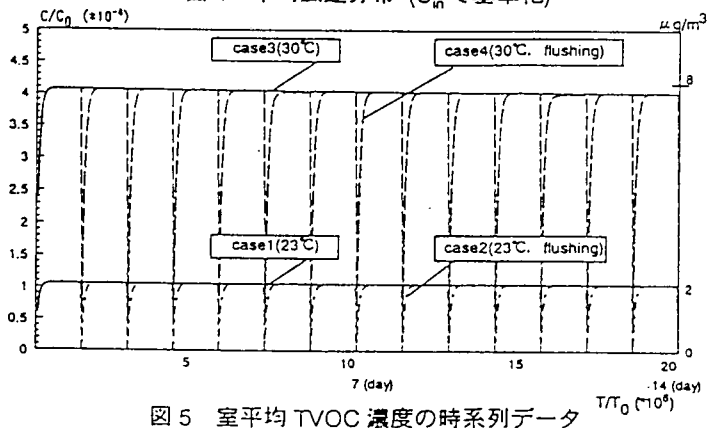
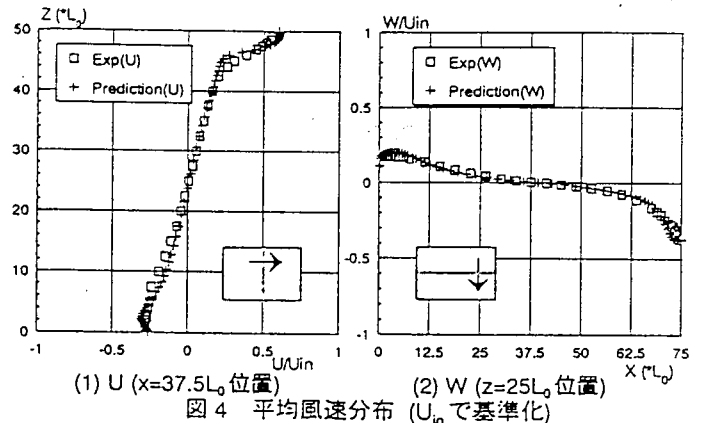
Fiber: 0.15  $L_0$   
 Bitumen backing: 0.1  $L_0$   
 TVOC 初期濃度:  $C_0=1.92 \times 10^8 \mu\text{g}/\text{m}^3$   
 図 3 解析対象カーペット SBR<sup>2)</sup>

表 2 解析ケース

	Case1	Case2	Case3	Case4
Flushing	無し	1h/24h	無し	1h/24h
室温	23℃	23℃	30℃	30℃

表 3 計算・解析条件

メッシュ分割	流体側 建材側	: 68(x) × 64(z) : 68(x) × 7(z)
Reynolds 数	材料中無次元拡散係数 <sup>2),6)</sup>	
$U_0 L_0 / \nu = 4.2 \times 10^3$	23℃: $D \cdot T_0 / L_0^2 = 1.8 \times 10^{-13}$ 30℃: $D \cdot T_0 / L_0^2 = 7.0 \times 10^{-13}$	



Convection and Ventilation Effectiveness, ASHRAE, pp.501-509 [8] BSR/ASHRAE Standard 62- 1989R, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, Public Review Draft, Appendix D [9] 鈴木,伊藤,加藤,村上: 不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究(その 3) 空調調和衛生工学会講演論文集, 1996.9