

床材からの化学物質放散と室内空気質汚染の数値解析

Numerical Analysis for TVDC Emission from Floor Material

加藤 信介*・村上 周三**・伊藤 一秀**

Shinsuke KATO, Shuzo MURAKAMI, Kazuhide ITO

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^{文1,2)}。本報ではこの問題に関連して建材からの室内化学物質の放散・拡散現象のモデル化、並びにCFD(数値流体力学)による解析法に関して検討する^{文3)}。特に総揮発性有機化合物(TVOC)に着目し、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放散及び室内拡散に関して、換気及び材料温度の観点から検討する。

2. 既往の研究

化学物質による室内空気汚染は建材、燃焼器具等の化学物質発生源からの室内への放散過程、室内空気中における化学変化、室内での吸着・脱着過程、室内からの換気による排出、人体吸気等の要素に関し、それぞれ検討する必要がある(図1)。ここでは主に建材からの拡散支配型放散と換気による排出に論点を絞って考察を行う。

建材からのTVOC放散・室内拡散のモデル化には大きく分けて実験的手法と物理的手法がある。実験的手法はチャンバー法等で得られるTVOC放散履歴に合う減衰関数を当てはめ室内放散量を推定する方法^{文4)}であり、実際の室内での放散量と対応させるには汎用性・拡張性に欠ける。一方、物理的手法は建材中及び建材表面での物質輸送をそれぞれ考慮して放散量を推定するもの^{文5,6)}で、実験的手法に比べ精度及び汎用性に優れている。本報では物理的手法により材料中の拡散支配型TVOC放散及び室内拡散をモデル化し、CFDの手法を用いて詳細な解析を行う。

3. TVOC放散・拡散モデル

一般にTVOCの放散・拡散過程は化学種毎に分離せず、単一物質の放散・拡散にモデル化して扱う(表1)^{文7,8)}。

3.1 分子拡散による輸送(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(表1(1)式)。材料中におけるTVOCの有効拡散係

数Dを定義し、材料中の初期濃度C₀分布と共にチャンバー法による放散実験結果よりこれを推定^{注1)}、^{文9,10)}する。

3.2 建材表面・空気境界面での輸送

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)。なお塗膜など薄い材料からの放散の場合、上記材料中の拡散は揮発性物質の放散量に大きな影響を与えない。材料表面における揮発物質の蒸気圧(温

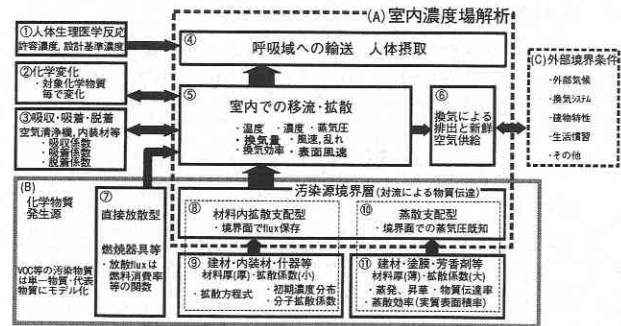


図1 室内化学物質汚染影響因子

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial C}{\partial z} \right) \tag{1}$$

D: SBR^{注2)}中のTVOC有効拡散係数
(23℃: 1.1×10⁻¹⁴, 30℃: 4.2×10⁻¹⁴ m²/s)^{文8,9)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

$$-D \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{w.s.+} = -Da \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{w.s.-} \tag{2}$$

w.s.: wall surface, w.s.+は建材側

3. 移流・拡散による輸送(空气中)

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

σ: 1.0, ν_i: C_μ · f_μ · k² / ε^{文7)}

D_a: 空气中のTVOC分子拡散係数
(23℃: 5.9×10⁻⁶, 30℃: 6.2×10⁻⁶ m²/s)^{文8,9)注1)}

*東京大学生産技術研究所 附属計測技術開発センター

**東京大学生産技術研究所 第5部

研 究 速 報 (関数) 及び蒸散効率が放散量に影響を与える。

3.3 移流・拡散による輸送 (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まで解析^{文11)} する。

4. 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), 汚染質空气中濃度, 換気量, 空気温度等, 様々な要因の影響を受ける^{文12)}。本報では特に換気に着目し, その除去効果を検討する。なお, ここ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°C 及び 30°C 両者の検討を行う^{注2)}。

5. 解析空間及び TVOC 発生源

5.1 解析空間 (図 3)

吹出スロット幅を代表長さ ($L_0 = 0.06 \text{ m}$) とし, (x) \times (z) = $75 L_0 \times 50 L_0$ (= $4.5 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$) の 2 次元居室を対象^{文13)}。

5.2 TVOC 発生源

SBR (polypropene Styrene- Butadiene Rubber^{注3)}) を対象とする。材厚は $0.25 L_0$ (0.015 m), SBR 中の TVOC は均一に初期濃度 $C_0 = 1.92 \times 10^8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を与える^{注4) 文9)}。

6. 解析 ケース

6.1 流れ場

吹出風速 $1/10 \cdot U_0$ (= 0.1 m/s , 換気回数 1.6 回/h), 及び U_0 (= 1.0 m/s , 換気回数 16 回/h), の 2 種の流れ場を用いる。流れ場は低 Re 型 k- ϵ model (MKC model^{文7)}) により解析する。なお, スカラ方程式移流項は 1 次風上, その他は中心差分を使用している。

6.2 解析ケース (表 2)

室温 23°C, 吹出風速 $1/10 \cdot U_0$ の場合を基本ケース (case1-1)。case2-1 は 24 時間に 1 時間の割合で吹出風速 U_0 で Flushing を, case3-1 は 24 時間に 8 時間の割合で吹出風速 U_0 で Flushing を行う。また室温 30°C, 吹出風速 $1/10 \cdot U_0$ を case1-2, 24 時間に 1 時間の割合で Flushing を行う場合を case2-2, 24 時間に 8 時間の割合で Flushing を行う場合を case3-2 とする。解析は $2.0 \times 10^7 \cdot T_0$ ($T_0 = L_0/U_0$, 14 日間に相当) 行う。計算・解析条件は表 3 に示す。

7. 解析 結果

7.1 平均風速分布 (図 4)

本解析では, 床面近傍では粘性低層まで解析するため $y^+ = 10$ 以内に 3 メッシュ以上確保。低 Re 型 k- ϵ model による解析結果は精密模型実験結果^{文13)} と非常に良く一致する。

7.2 TVOC 濃度 (図 5, 6)

case1-1 (23°C, Flushing 無し) では, 室平均 TVOC 濃度が計算開始より無次元時間 1.0×10^6 (実時間 17 時間) 後

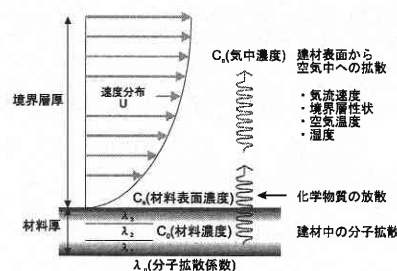


図 2 建材からの TVOC 放散・拡散現象

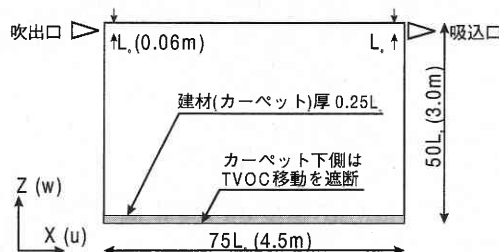


図 3 解析対象空間 (2次元)

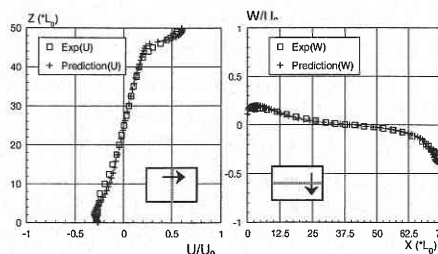
表 2 解析ケース

	case1-1	case2-1	case3-1
Flushing	無し	1h/24h	8h/24h
室温(材料温)	23°C	23°C	23°C

	case1-2	case2-2	case3-2
Flushing	無し	1h/24h	8h/24h
室温(材料温)	30°C	30°C	30°C

表 3 計算・解析条件

メッシュ分割	流体側 : $68(x) \times 64(z)$ 建材側 : $68(x) \times 7(z)$
Reynolds 数	材料中無次元有効拡散係数 ^{文9,10)} $U_0 L_0 / \nu = 4.2 \times 10^3$ 23°C : $D \cdot T_0 / L_0^2 = 1.8 \times 10^{-13}$ 30°C : $D \cdot T_0 / L_0^2 = 7.0 \times 10^{-13}$



(1) U ($x=37.5L_0$ 位置) (2) W ($z=25L_0$ 位置)

図 4 平均風速分布 (吹出風速で基準化)

に最大 $C_{\text{max}}/C_0 = 1.1 \times 10^{-8}$ ($2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) となり, その後極めて緩やかに減衰する^{注5)}。無次元時間 2.0×10^7 (14 日間) の減衰は $\Delta C/C_0 = 3.6 \times 10^{-11}$ ($0.007 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 程度である (図 5-1)。case2-1 (23°C, 1/24 h-Flushing), 及び case3-1 (23°C, 8/24 h-Flushing) では, Flushing を行っている時間のみ室平均濃度が低下し, case1-1 の 1/10 程度の濃度となるが, それ以外の時間は case1-1 と同様の値とな

る。無次元時間 2.0×10^7 (14 日間) の計算時間では Flushing の効果は Flushing を行っている時間のみに現れ、その後の平均濃度にほとんど影響を与えない。case1-2 (23°C, Flushing 無し) 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、case1-1 の 4 倍程度の値となる。case2-2 (30°C, 1/24 h-Flushing), 及び case3-2 (30°C, 8/24 h-Flushing) では、case2-1, case3-1 の場合と同様に Flushing を行っている時間のみに室平均濃度が低下し、case2-1 の 1/10 程度の濃度となる (図 5-2)。図は割愛するが、居住域^{注6)} 平均濃度は室全体の濃度変動の場合と同様の傾向を示す。

case1-1 (23°C, Flushing 無し) では排気口での平均濃度は $C_{ext}/C_0 = 0.70 \times 10^{-8}$ ($1.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$) である。排気口での平均濃度で無次元化した室平均濃度 (SVE1^{文14)} は、床面を汚染質発生源とした場合 1.5 となる。Flushing 時、排出口平均濃度は 1/10 まで減少する。即ち TVOC 発生量のオーダーは吹出風速 $1/10 \cdot U_0$ と U_0 ではほとんど変化しない (図 6-1)。case1-2 (30°C, Flushing 無し) では case1-1 と比較し、排気口での平均濃度は約 4 倍となる。

7.3 TVOC 放散量 (図 6, 7)

通常換気時 (吹出風速 $1/10 \cdot U_0$) と Flushing 時 (U_0) における両者の床面からの TVOC 放散量分布を示す。床面左隅角部では主流に対して 2 次渦が生じており、その箇所放散量が減少している。通常換気時と Flushing 時における放散量の差は最大でも 1% 程度である。吹出風速の変化に対し TVOC 放散量が大きく変化しないため Flushing 時には換気量の増加分だけ平均濃度が減少する。室温が 23°C から 30°C に上昇することで放散量は約 4 倍となる。

7.4 考察

建材中の拡散特性時間 (拡散係数 D の次元が {長さ²/時間} であるので、ここでは $\{(0.25)^2 L_0^2/D\}/T_0$ で評価、0.25: 無次元材料厚) である 3.5×10^{11} (2.5×10^5 日) に比べ、極めて短い 2.0×10^7 (14 日間) の TVOC 放散に関しては、 6.0×10^4 (1 時間), 及び 4.8×10^5 (8 時間) の Flushing の効果は Flushing を行っている時間のみに有効であり、その後の平均濃度に大きな影響を与えない (図 5)。拡散特性時間は拡散係数 D のオーダーに大きく依存する。本報で用いた D は既存の報告例^{文9)} をそのまま用いているが、この値はかなり小さく、やや過小にすぎた恐れがあり、その妥当性に関しては今後更に検討を加える予定である。室温 23°C 及び 30°C の両ケースにおいて、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 7)。成人・立位の呼吸域平均濃度 ($z = 25 L_0$ ライン) は case1-1 で $C_{ave}/C_0 = 1.1 \times 10^{-8}$ ($2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 程度、case1-2 で $C_{ave}/C_0 = 4.0 \times 10^{-8}$ ($7.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) の値となり、Flushing 時にはその 1/10 程度まで濃度が低下する。

表 4 に case1-1 の居住域、座位呼吸域及び就寝者呼吸域 (横臥位)^{注7)} における平均濃度、VF 及び L-PFR^{注7)} の値を示す。VF は対象領域内で発生した TVOC が再帰する平均的回数、L-PFR は対象領域に対する実質的な換気空気の流れ

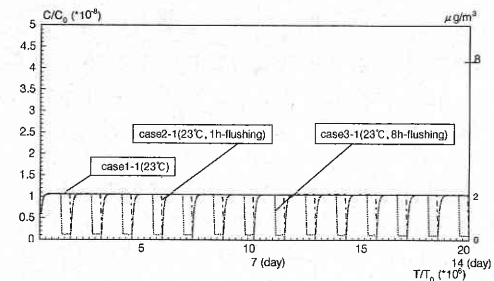


図 5-1 室平均 TVOC 濃度の時系列データ (23°C)

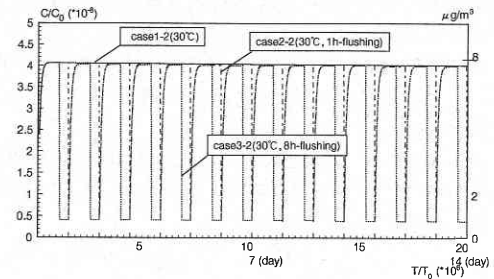


図 5-2 室平均 TVOC 濃度の時系列データ (30°C)

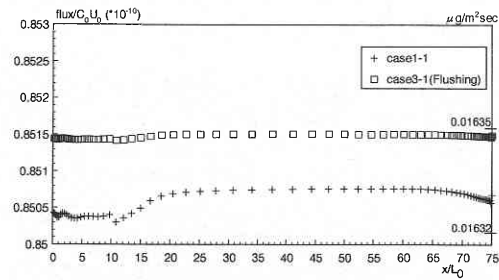


図 6-1 床面からの TVOC 放散量 (23°C, $T/T_0 = 7.2 \times 10^6$)

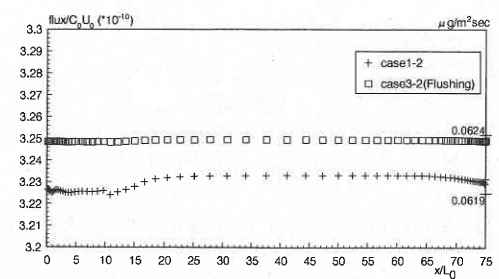


図 6-2 床面からの TVOC 放散量 (30°C, $T/T_0 = 7.2 \times 10^6$)

入量を示す^{文15)}。case1-1 では床面から発生した TVOC は居住域に対し平均的に 5.4 回、座位呼吸域に対し、8.1 回、就寝者呼吸域に対し 3.6 回再帰し、吸込口より室外に排出される。座位呼吸域に対する TVOC の再帰が多い。また発生した TVOC の排出に有効な換気量は居住域で吹出口換気量の 67%、座位呼吸域で 63%、就寝者呼吸域で 56% である。

研 究 速 報

8. 結 論

- (1) 建材中の無次元拡散特性時間 3.5×10^{11} (2.5×10^5 日) に比べ極めて短い 2.0×10^7 (14 日間) の短期的な解析では室平均 TVOC 濃度はほとんど変化しない。
- (2) 解析時間 2.0×10^7 (14 日間) に対し, 更に継続時間の短い 6.0×10^4 (1 時間) 及び 4.8×10^5 (8 時間) の Flushing 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) 材料温度・室温が 23°C から 30°C に上昇することで, 室平均 TVOC 濃度は約 4 倍となる。
- (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。
- (5) 今回対象とした流れ場では, 床面から発生した TVOC は座位呼吸域に対し平均的に 8.1 回再帰し, 吸込口より室外に排出される。

(1998 年 7 月 1 日受理)

[記号]

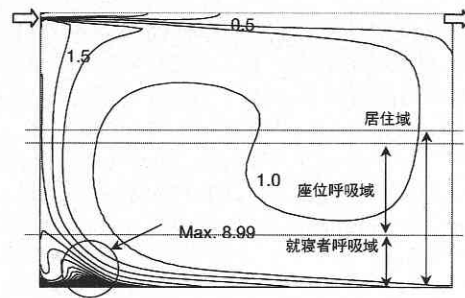
U_0 : 代表風速 (1 m/s), L_0 : 代表長さ (0.06 m, 吹出スロット幅), $T_0 = L_0/U_0$, C_0 : 建材中初期 TVOC 濃度 $1.92 \times 10^8 \mu\text{g}/\text{m}^3$

[注]

- 1) ここで示した初期濃度 C_0 , 有効拡散係数 D はチャンパー法による 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 乗法により算出^{文 5)}。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。本報で用いる拡散係数 D の妥当性に関しては今後更に検討を加える予定。
- 2) 室内空気中の汚染質濃度が大きく変化する Flushing では, 特に吸着・脱着の影響を考慮する必要がある。しかし, ここではモデルの単純化のため吸着・脱着の効果は無視して考察。
- 3) 繊維部と滲青によるその支持部より構成
- 4) 製造後の材令により材料内に TVOC 分布が生じるため正確には分布性状を仮定する必要がある。
- 5) 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 のオーダーである。
- 6) 居住域は床面から高さ $30L_0$ (1.8 m) まで, 座位呼吸域は $8.3L_0$ (0.5 m) $< z < 25L_0$ (1.5 m), 就寝者呼吸域 (横臥位) は $8.3L_0$ (0.5 m) までの領域と仮定。
- 7) VF: Visitation Frequency, L-PFR: Local Purging Flow Rate.

参 考 文 献

- 1) 池田他: 日本建築学会年次大会 学術講演梗概集, pp. 755-760, 1997.
- 2) 田辺: 日本建築学会年次大会, 学術講演梗概集, pp. 767-768, 1997.
- 3) 加藤他: 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), 日本建築学会年次大会学術講演梗概集, 1998, 投稿中。



図中値は全て $\times 10^{-8}$

図 7 case1-1 TVOC 濃度分布 C/C_0 ($T/T_0 = 7.2 \times 10^6$)

表 4 換気効率指標の解析^{文 13)} ($T/T_0 = 7.2 \times 10^6$)

case1-1	平均濃度	VF	L-PFR
居住域 ($z < 30L_0$ (1.8m))	1.1×10^{-8}	5.4	0.67
座位呼吸域 ($8.3L_0$ (0.5m) $< z < 25L_0$ (1.5m))	1.1×10^{-8}	8.1	0.63
就寝者呼吸域 ($z < 8.3L_0$ (0.5m))	1.2×10^{-8}	3.6	0.56

(居住域平均濃度は建材中初期濃度 C_0 , L-PFR は吹出換気量で基準化)

- 4) Chang, J.C.S., et al, 1992: Characterization of organic emissions from a wood finishing product-wood stain, Indoor Air, 2, 146-153.
- 5) Christianson, J., Yu, J.W et al, 1993: Emission of VOC's from PVC-flooring-models for predicting the time dependent emission rate and resulting concentration in the indoor air, proceedings of Indoor Air'93, 2, 389-394.
- 6) 松本博: 建材からの汚染質発生モデリングに関する研究, 空気調和衛生工学会講演論文集, 1997, 8.
- 7) J. W. Axley, New mass transport elements and compounds for the NIST IAQ model, NIST GCR 95-676, 1995.
- 8) 朴他: 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, 日本建築学会年次大会, 学術講演梗概集, 1997.
- 9) Xudong Yang, Qingyan Chen, Bluysen, P. M, 1998. Prediction of Short- term and Log-term Volatile Organic Compound Emissions from SBR Bitumen-backed Carpet under Different Temperature, ASHRAE.
- 10) Bluysen, 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.
- 11) S. Murakami, et al, 1996 New low Reynolds-number k-ε model including damping effect due to buoyancy in a stratified flow field, Int. J Heat Mass Transfer. Vol. 39, No. 16, pp3483-3496.
- 12) BSR/ASHRAE Standard 62- 1989 R, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, Public Review Draft, Appendix D.
- 13) 鈴木他: 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), 空気調和衛生工学会講演論文集, 1996, 9.
- 14) Kato, S., et al. (1988) New ventilation efficiency scales based on spatial distribution of contaminant concentration aided by numerical simulation. ASHRAE Transactions 94 (2): 309-330.
- 15) 伊藤他: 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 9), 空気調和衛生工学会講演論文集, 1997, 8.