

建材からの化学物質放散と室内拡散のCFD 解析 床材からの TVOC 放散と材料温度・換気除去効果の検討

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 (東京大学生産技術研究所)
学生会員 伊藤一秀 (東京大学 大学院)

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^{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³⁾。ここでは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)。建材等から発生する揮発性有機化合物は燃焼器具から発生する窒素酸化物等と異なり化学的に比較的安定しているため、その化学変化は無視される。吸着・脱着の効果は、一般に無視できないが、ここでは主に建材からの放散と換気による排出に論点を絞って考察を行う。また建材中の分子拡散がその放散量に大きな影響を与える拡散支配型放散に関して検討を行う。

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⁴⁾であるが、チャンバー内の放散条件と実物での条件が必ずしも対応しない場合もあり、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^{5,6)}で、実験的手法に比べ精度及び汎用性に優れていると思われる。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)^{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する(表 1(1)式)。材料中における TVOC の有効拡散係数 D を定義

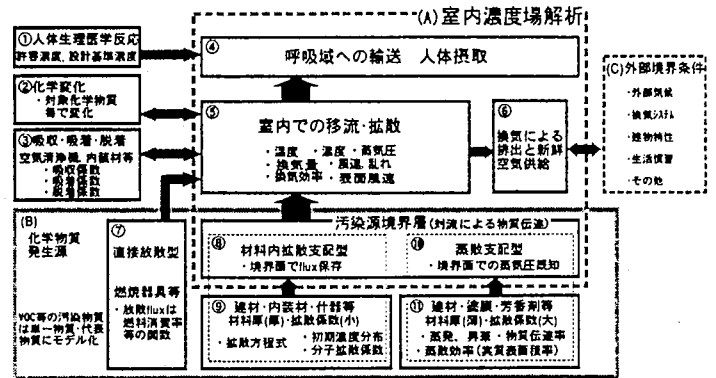


図 1 室内化学物質汚染影響因子

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た材料厚方向(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^{注2)}中の TVOC 有効拡散係数
(23°C : 1.1×10^{-14} , 30°C : 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

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

w.s. : wall surface, w.s.+は建材側

なお、ナフタリン等、材料自体が昇華する場合、塗膜など材料が薄い場合、或いは建材中の拡散係数が極めて大きい場合、(1)式を連立させず、(2)式右辺において建材表面での揮発物質蒸気圧及び蒸散効率(湿気放散における「ぬれ率」等)に対応により放散 flux が定義される。

3. 移流・拡散による輸送 (空気中)

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

Da : 空気中の TVOC 分子拡散係数

(23°C : 5.9×10^{-6} , 30°C : 6.2×10^{-6} m²/s) 文^{8,9)}注1)

σ : 1.0, ν_t : $= C_\mu \cdot f_\mu \cdot k^2 / \varepsilon$ 文⁷⁾

し、材料中の初期濃度 C_0 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する^{注1), 文^{9,10)}}。

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(温度の関数)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) 氣中に放散された TVOC は室内氣流により移流・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-ε model に基づく氣流解析を使用¹¹⁾。

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)、汚染質氣中濃度、換氣量、空氣温度等、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)、換氣量の 3 者は TVOC 放散・拡散現象を特徴づける主因となる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、ここでは換氣量の一時的増大による室内洗浄を、通常の換氣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¹²⁾。

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、 $(x) \times (z)=75L_0 \times 50L_0 (=4.5\text{m} \times 3.0\text{m})$ の 2 次元居室を対象とする。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¹³⁾。

5-2. TVOC 発生源(図 4) カーベットの一種である SBR (polypropene Styrene- Butadiene Rubber ¹³⁾)を対象とする。カーベット厚は $0.25L_0$ (0.015m)とし、カーベット中の TVOC については均一に初期濃度 $C_0=1.92 \times 10^8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を与える^{14)文 9)}。

6. 解析ケース

6-1. 流れ場 吹出風速 $1/10 \cdot U_0 (=0.1\text{m}/\text{s})$ 、換氣回数 1.6 回/h)、及び $U_0 (=1.0\text{m}/\text{s})$ 、換氣回数 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 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用いる。

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)とする。24 時間に 1 時間の割合で吹出風速 U_0 で Flushing を行うケースを case2-1、24 時間に 8 時間の割合で吹出風速 U_0 で Flushing を行うケースを case3-1 とする。また室温 30°C、吹出風速 $1/10 \cdot U_0$ の場合を 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 5) 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 メッシュ以上確保している¹⁵⁾。低 Re 型 k-ε model による解析結果

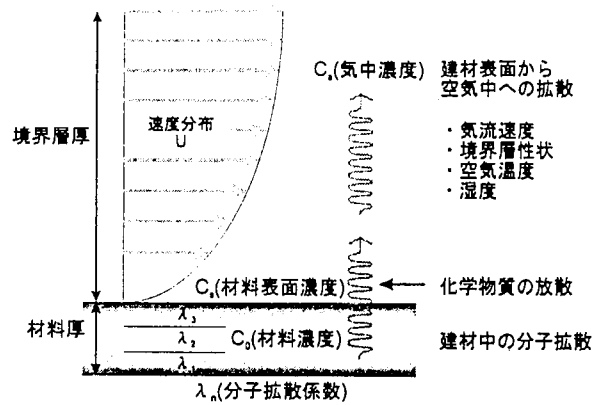


図 2 建材からの TVOC 放散・拡散現象

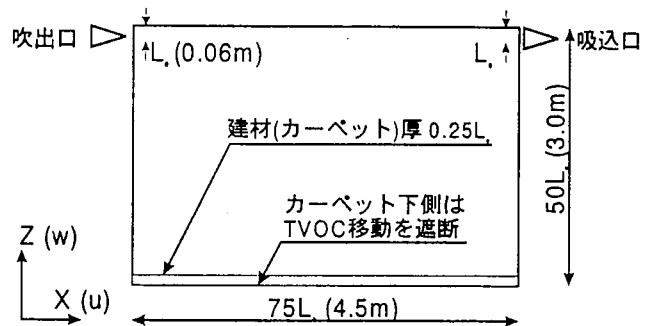
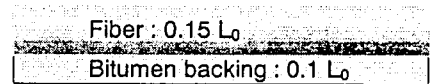


図 3 解析対象空間 (2 次元)



TVOC 初期濃度: $C_0=1.92 \times 10^8 \mu\text{g}/\text{m}^3$

図 4 解析対象カーベット SBR ¹³⁾

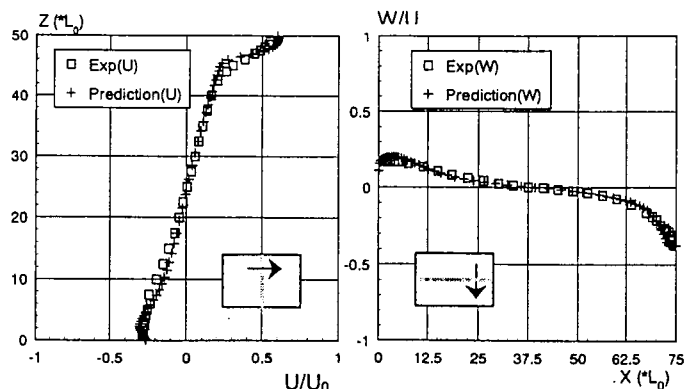
表 2 解析ケース

	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) × 64(z)
	建材側	: 68(x) × 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=37.5L₀ 位置) (2) W (z=25L₀ 位置)

図 5 平均風速分布 (吹出風速で基準化)

は精密模型実験結果¹³⁾と非常に良く一致し、十分な精度で流れ場を解析することを示す。

7-2. TVOC 濃度(図 6.7) 室温 23°C で Flushing を行わない case1-1 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) 後に最大 $C_{max}/C_0 = 1.1 \times 10^{-8}$ ($2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.7ppb に対応) となりその後、極めて緩やかに減衰する^{注6)}。室平均濃度は無次元時間 2.0×10^7 (14 日間) でほとんど変化しない。その間の減衰は $\Delta C/C_0 = 3.6 \times 10^{-11}$ ($0.007 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 程度である(図 6-1)。室温 23°C で 1 時間 Flushing を行った case2-1、及び 8 時間 Flushing を行った case3-1 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現れ、その後の平均濃度にほとんど影響を与えない。室温 30°C で Flushing を行わない case1-2 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。1 時間 Flushing を行った case2-2、及び 8 時間 Flushing を行った case3-2 では、case2-1、case3-1 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、case2-1 の 1/10 程度の濃度となる(図 6-2)。

図は割愛するが、居住域^{注7)}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。室温 23°C で Flushing を行わない case1-1 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^{注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 7-1)。室温 30°C で Flushing を行わない case1-2 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 7.8) 通常換気時(吹出風速 $1/10 \cdot U_0$) と Flushing 時($10 \cdot U_0$) 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、その箇所では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 $\{(\text{長さ})^2/\text{時間}\}$ 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

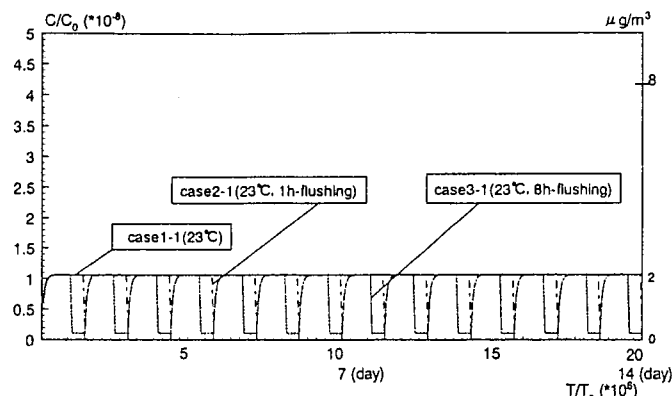


図 6-1 室平均 TVOC 濃度の時系列データ (23°C)

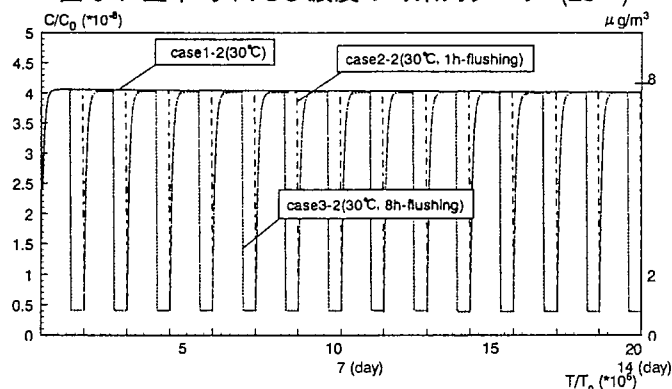


図 6-2 室平均 TVOC 濃度の時系列データ (30°C)

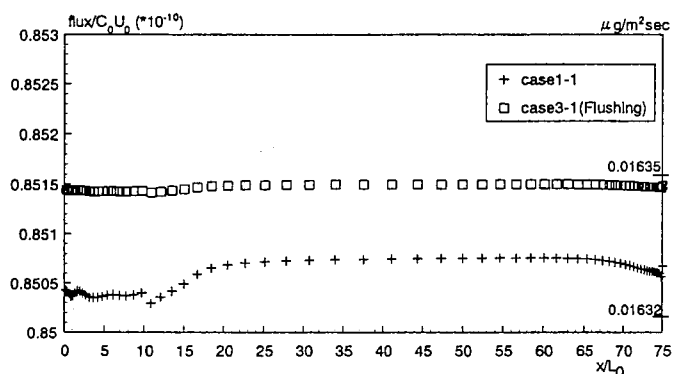


図 7-1 床面からの TVOC 放散量 (23°C, $T/T_0 = 7.2 \times 10^6$)

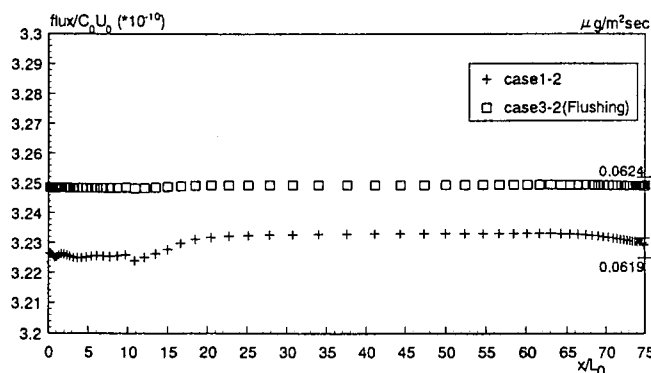


図 7-2 床面からの TVOC 放散量 (30°C, $T/T_0 = 7.2 \times 10^6$)

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 6)。Flushing 中に室内濃度は大きく変化するため、室内に多量の吸着物質がある場合には吸着物質による吸着・脱着効果も考慮する必要があると思われる。吸着・脱着の影響に関しては今後検討したい。室温

23℃及び30℃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8)。成人・立位の呼吸域平均濃度($z=25L_0$ 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。またTVOC発生量は温度に強く依存する。

表4にcase1-1にの居住域、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8)}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入流量を示す^{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。

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) 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。

[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), $T_0 = L_0/U_0$, C_0 : 建材中初期TVOC濃度 $1.92 \times 10^6 \mu\text{g}/\text{m}^3$

[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乗法により求めたものである^{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。なお繊維部は一般に多孔質体であり、その構造(疎密等)により有効拡散係数は大きく変化すると考えられる。[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する。[3] 繊維部と石膏によるその支持部よりなるカーペットの一種 [4] 製造後の材令により材料内に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。[5] 壁間数を用いた標準 $k-\epsilon$ model 等による解析では、床面からの物質拡散の解析を行う際に、乱流拡散の影響を考慮した物質拡散係数を定義する必要がある。本解析では低 Re 型 $k-\epsilon$ model により粘性低層まで解析しているため、床面からの物質拡散は分子拡散の影響のみ受ける。[6] 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+果はその1/100のオーダーである。[7] 居住域は床面から高さ $30L_0$ (1.8m)まで、座位呼吸域は $8.3L_0$ (0.5m) $< z < 25L_0$ (1.5m)、就寝者呼吸域(横臥位)は $8.3L_0$ (0.5m)までの領域と仮定する。[8] VF: Visitation Frequency, L-PFR: Local Purging Flow Rateの略。

[参考文献] [1] 池田他: 新築及び改築集合住宅の室内空気質測定その2,3,4, 日本建築学会年次大会 学術講演梗概集 pp755-760, 1997 [2] 田辺: ホルムアルデヒド, VOCによる室内空気汚染につい

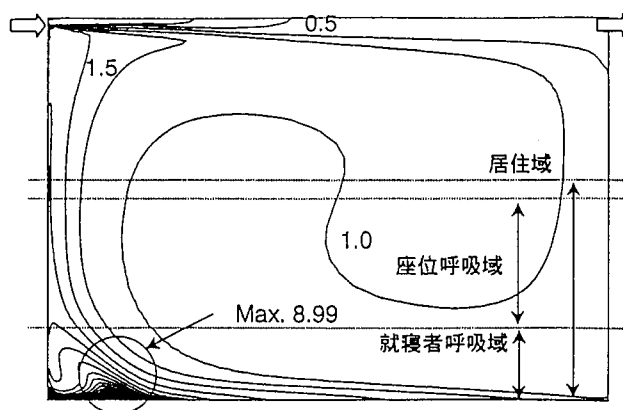
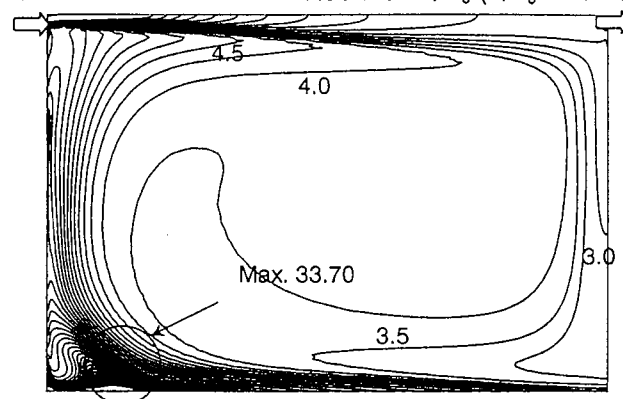


図8-1 case1-1 TVOC濃度分布 C/C_0 ($T/T_0=7.2 \times 10^6$)



図中値は全て $\times 10^{-8}$

図8-2 case1-2 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) ~ $25L_0$ (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)

て、日本建築学会年次大会 学術講演梗概集 pp767-768, 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 [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] Qingyan Chen 私信 [10] 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. [11] Chikamoto, T., et al, : Numerical Simulation of Velocity and Temperature Fields within Atrium based on Modified $k-\epsilon$ model Incorporating Damping Effect due to Thermal Stratification, Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, ASHRAE, pp.501-509 [12] BSR/ASHRAE Standard 62- 1989R, 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