

# 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

## TEMPERATURE AND VENTILATION EFFECT ON EMISSION FROM FLOOR MATERIAL UNDER DIFFUSION CONTROL

CFD Analysis of indoor air pollution by chemical compound —Part 1—

村上周三\*, 加藤信介\*\*, 伊藤一秀\*\*\*

Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO and Kazuhide ITO

This paper presents an analysis of the emission of chemical compounds under internal diffusion control and their diffusion in a room by the technique of computational fluid dynamics. A polypropylene styrene-butadiene rubber (SBR) plate was chosen as the VOCs emission source. The emission rate and room concentration are analyzed under various conditions of air change rate and temperature. Furthermore, the concentration distribution within a room is also examined and evaluated from the viewpoint of ventilation efficiency. In this analysis, the room-averaged TVOC concentration does not decrease so much during the duration of simulation (11 days), and the concentration of TVOC near the SBR floor, from which the TVOC is emitted, is about six times larger than the room-averaged value.

**Keywords :** CFD, Chemical Compound, VOCs, Emission, Diffusion, Ventilation  
計算流体力学, 化学物質, 揮発性有機化合物, 放散, 拡散, 換気

### 1. 序

近年、住宅・オフィス等において化学物質による空気汚染が大きな問題となっている<sup>1,2)</sup>。本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する。第1報では、建材内の化学物質拡散速度が気中への放散速度を支配する内部拡散支配型の床建材を対象とし、化学物質の室内空気への放散、並びにその室内拡散を材料内拡散解析とCFD(計算流体力学)を連成して解析する方法に関して検討する<sup>3,4)</sup>。化学物質による室内空気汚染は図1に示すように建材、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、人体吸気等の多面的要素が関連しているので、それぞれについて検討する必要がある。本報では、汚染質発生源を含めた室内汚染質濃度場の解析(図1中点線で囲まれた(A)の領域)を研究の中心とし、材料内拡散支配型の汚染質発生源(図1中③)を対象とした場合の室内濃度場解析結果を報告する。次報以降では蒸散支配型の汚染質発生源(図1中⑩)、並びに吸収・吸着・脱着効果(図1中③)等を含めて総合的に室内濃度場解析を行う。建材等から発生する揮発性有機化合物(VOCs: volatile organic compounds)は室内空気中で化学的に比較的安定しているものが多く、その室内空気中の化学変化は第一次近似として無視し得る。吸着・脱着

の効果は、一般に無視できないが、本報では主に建材からの内部拡散支配型の放散と換気による排出を検討対象とし、吸・脱着の効果は無視した解析結果を示す。吸・脱着の効果に関しては次報以降で考察を行う。建材から発生する揮発性有機化合物には多くの種類があり、その組成も建材により異なるので、本来は個別に取り扱うべきであるが、ここではこの分野の研究でしばしば用いられるこれらを統合した総揮発性有機化合物(TVOC: total volatile organic compounds)の考え方にに基づき、便宜的にその物性が1つの値に代表出来るものとして扱う。このTVOCに関し、人体呼吸域汚染に大きな影響を与えられと思われる床材からの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. 化学物質放散モデル

2-1. 簡易モデルと物理モデル 建材等からの化学物質放散量の予測は、化学物質の室内空気汚染問題において最も重要な検討課題となる<sup>5)</sup>。建材、家具などからの化学物質放散量の推定に関しては、(1)放散量実験結果に合う減衰関数を当てはめる簡易モデルと、(2)放散に関する物理過程を数学モデルによりモデル化し、その定数を現象に合わせて最適化する物理モデルの2つに分類することが可能である<sup>6,7)</sup>。簡易評価モデルは小型チャンバー等で得られる化学物質の放散履歴(放散量の時間減衰)に工学経験式を当てはめ、室内放散量を推定す

\* 東京大学生産技術研究所 教授・工博  
\*\* 東京大学生産技術研究所 教授・工博  
\*\*\* 東京大学大学院

Prof., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.  
Prof., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.  
Graduate Student, Univ. of Tokyo

るものである。内部拡散支配型の長期放散に関しては、時間によらず異常放散として扱われることも多い。現在そのデータの蓄積がいくつかの研究機関により進められている<sup>9)</sup>。ただし化学物質放散は気流、温度、湿度など様々な条件の影響を受けることも多く、簡易モデルによる放散量評価を直ちに室内の化学物質放散量の推定に用いるには検討すべき点も多く残している。これに対し物理モデルは、材料中から気中に至る実際の物理的な放散過程をそれぞれモデル化するため、条件の違いに対しても比較的信頼度の高い放散量推定を与えるものと考えられる<sup>10)</sup>。図2に内部拡散支配型(材料内拡散支配型)の化学物質放散の物理過程を単純化して示す。ただし、ここでは材料中での化学変化による放散は考慮していない。

## 2-2. 内部拡散(材料内拡散)支配型放散と蒸散(表面蒸発)支配型放散

材料から気中への化学物質放散は、その輸送抵抗が最も大きい箇所(物質伝達係数が最も小さい箇所)がその輸送量に大きな影響を与える。材料中の化学物質の拡散係数が極めて小さい(輸送抵抗が大きい)場合、材料中から気中への放散速度は、ほぼ材料中の化学物質の拡散速度で決まってしまう。これを内部拡散(材料内拡散)支配型放散と呼ぶ。一方で、材料中の輸送抵抗が小さい場合、例えば濡れたペイントからの溶剤の気中放散などは、ペイント中での溶剤の輸送抵抗はほとんど無視でき、材料表面から気中に至る表面物質伝達率により、化学物質の気中への放散速度がほぼ決まる。これを蒸散(表面蒸発)支配型放散と呼ぶ。

## 2-3. 建材中の気相換算濃度

材料内の化学物質は、材料中の空隙を蒸気相拡散する場合を除き、蒸気相とは異なる状態(固相・液相もしくは吸着相)にあると考えられる。しかし化学物質の材料中の拡散に関しても最終的には材料内拡散より気中への放散が重要であるため、材料中での気相換算濃度、及び気相換算濃度で定義される有効拡散係数を定義し、気中拡散と一貫した解析モデルを用いることが便利である<sup>11)</sup>。図2で示す材料中の拡散も気相換算濃度及び有効拡散係数でモデル化されている。材料中の気相換算濃度は、図2の建材表面・空気境界層での拡散において平衡状態での材料表面における材料中濃度を表面気中濃度で表現し、更に材料中の濃度についても同様の表現を仮定するものである<sup>11)</sup>。化学物質の材料から気中への放散では(逆の気中から材料への吸着・吸収においても)相変化による熱エネルギーの授受があるが、一般には微小であり本研究では無視する。また、材料中の化学物質移動(拡散)は化学物質の濃度勾配の他、温度勾配、圧力勾配等によっても生じる。それらの寄与は一般には小さいと仮定し、本研究では無視する。

## 3. Flushing と Bake-out

建材から室内への化学物質の放散・拡散現象は、建材等の化学物質汚染源強度(材齢の関数)、拡散係数(材料温度の関数)、汚染質気中濃度、換気量、空気温度等、様々な要因の影響を受ける。経時に伴う材料中の化学変化による化学物質の生成とそれに伴う放散が小さい場合、空気中に放散される化学物質の総量は材料製造時に定まってしまうと一般に考えられる。そのため、人為的に一時期、放散量を増大させて、その後の材料からの放散量を減少させることが試みられる。ここでは Flushing 及び Bake-out に関して検討を行う。なお、放散速度の計測実験から材料中の化学物質初期濃度を気相換算濃度を用い

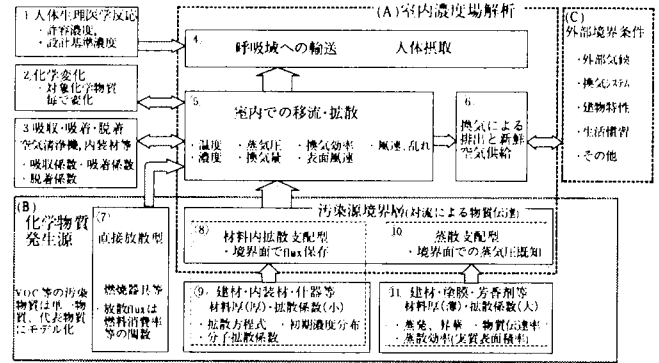


図1 室内化学物質汚染に対する影響因子

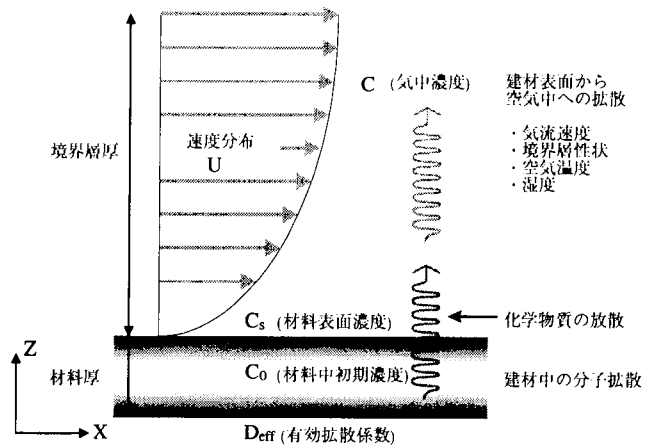


図2 建材からの内部拡散支配型化学物質放散と室内拡散現象

て推定した場合、その初期濃度は材料温度により増減する材料があることが報告されている<sup>12,13)</sup>。これは材料温度の違いによる化学変化等により最終的に気中に放散される化学物質の総量が異なる場合がある事を意味している。

### 3-1. Flushing

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 と区別して Flushing と定義する。内部拡散支配型の放散過程では放散速度が材料内部の拡散に支配されるため Flushing がどの程度効果的であるか未知の部分が多い。蒸散支配型の放散現象では、気流速度などの増大による物質伝達係数の増大が放散速度の増大に有効に寄与するので、Flushing によるその後の放散量減少が期待できる。

### 3-2. Bake-out

材料中の化学物質有効拡散係数や材料表面における化学物質の蒸気圧は温度依存性が高い。両者はともに高温にすることにより飛躍的にその値を増加させることが可能である。Bake-out は、材料や空気温度の上昇により、拡散係数、蒸気圧を増加させて短期的に化学物質を気中放散させる。内部拡散支配型の化学物質放散では材料内拡散係数の増加により放散量が増加する。蒸散支配型化学物質放散では材料表面での蒸気圧の増加が放散量の増加に寄与する。

## 4. 内部(材料内)拡散と室内拡散のCFD連成解析

本報では内部拡散(材料内拡散)支配型放散、及び室内拡散に関し、表1に示す数学モデルを仮定して解析を行う<sup>12,13)</sup>。

### 4-1. 分子拡散による輸送(建材中)

表1(1)式に示すように建材中の

TVOCは1次元拡散方程式で表現されるものと仮定する。

4-2. 建材表面・空気境界面での輸送 表1(2)式に示すように建材中から建材表面への輸送量と建材表面での空気中への放散量は保存される。

4-3. 移流・拡散による輸送(空気中) 表1(3)式に示すように気中に放散された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。粘性底層の拡散現象を詳細に解析するため、低 Reynolds 数型  $k-\epsilon$  model に基づく気流解析を使用する<sup>16)</sup>。本報では吸着・脱着現象は無視して解析を行う<sup>11)</sup>。吸着・脱着の効果は次報以降で検討する予定である。

## 5. 解析空間及び TVOC 発生源

5-1. 解析空間 解析対象空間を図3に示す。吹出スロット幅を代表長さ( $L_0=0.06m$ )とし、 $(x) \times (z)=75L_0 \times 50L_0$  ( $\Rightarrow 4.5m \times 3.0m$ )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<sup>17)</sup>。

5-2. TVOC発生源 合成ゴム SBR (polypropylene Styrene- Butadiene Rubber)を対象とする。材厚は  $0.025L_0$  ( $0.0015m$ )<sup>12)</sup>とする。本解析では合成ゴム中の TVOC 初期濃度は Q. Chen らの結果<sup>13)</sup>に従い、均一に  $C_0=1.92 \times 10^8 \mu g/m^3$  を与える<sup>13)</sup>。また合成ゴム SBR 中の有効拡散係数に関しても Q. Chen らの結果<sup>13)</sup>に従い、 $1.1 \times 10^{-14} m^2/s$  ( $23^\circ C$ )、 $4.2 \times 10^{-14} m^2/s$  ( $30^\circ C$ ) を与える<sup>12), 14), 15)</sup>。

## 6. 解析ケース

6-1. 流れ場 吹出風速  $0.1U_0$  ( $\Rightarrow 0.1m/s$ 、換気回数 1.6回/h)、及び  $U_0$  ( $\Rightarrow 1.0m/s$ 、換気回数 16回/h)、の2種の流れ場を用いる。流れ場は低 Reynolds 数型  $k-\epsilon$  model (MKC model<sup>16)</sup>)により解析する。なお、スカラー方程式移流項及び拡散項は共に中心差分を用いる。

6-2. 解析ケース 表2に解析ケースを示す。室温  $23^\circ C$ 、吹出風速  $0.1U_0$  の場合(換気回数 1.6回/h)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 (一時的に換気回数を16回/hに増大)を行うケースを case1-2、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 case1-3 とする。また室温  $30^\circ C$ 、吹出風速  $0.1U_0$  の場合を case2-1、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 case2-3 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)の間行う。計算・解析条件は表3に示す。

## 7. 解析結果<sup>15)</sup>

7-1. 平均風速分布 本解析では、床面近傍では粘性底層まで解析するため壁座標  $y^+ = 10$  以内に3メッシュ以上確保している<sup>16)</sup>。図4に流れ線図を示す。室内では壁面に沿った大循環流が形成され、床面隅角部において大循環流とは逆向きに2次渦が観察される。図5に  $x=37.5L_0$  位置における風速  $U$  成分の鉛直分布、及び  $z=25L_0$  位置における  $W$  成分の水平分布に関する解析結果と精密模型実験結果<sup>17)</sup>の比較を示す。低 Reynolds 数型  $k-\epsilon$  model による解析結果は精密模型実験結果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濃度の時系列変化 図6に無次元時間  $2.0 \times 10^7$  (14日間)における室平均 TVOC 濃度履歴を示す。横軸は無次元時間( $T/T_0$ )、縦

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{\text{eff}} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$D_{\text{eff}}$ : 合成ゴム(SBR)中の TVOC 有効拡散係数

( $23^\circ C$ :  $1.1 \times 10^{-14}$ ,  $30^\circ C$ :  $4.2 \times 10^{-14} m^2/s$ )<sup>12), 13)</sup>

$C$ : 気相換算濃度 ( $\mu g/m^3$ )

### 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

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

$w.s.$ : wall surface,  $w.s.+$ は建材側

$Da$ : 空気中の TVOC 分子拡散係数

( $23^\circ C$ :  $5.9 \times 10^{-6}$ ,  $30^\circ C$ :  $6.2 \times 10^{-6} m^2/s$ )<sup>12), 13)</sup>

### 3. 移流・拡散による輸送(空気中)

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

$v_t := C\mu \cdot f\mu \cdot k^2 / \epsilon$ <sup>14)</sup>,  $\sigma: 1.0$

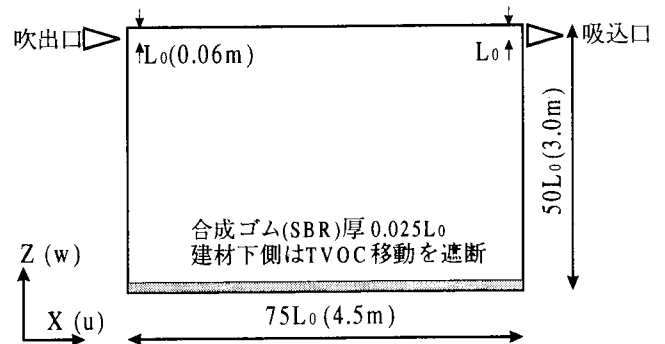


図3 解析対象空間(2次元)  
( $L_0$ :代表長さ(吹出口幅, 0.06m))

表2 化学物質の室内空気への放散・拡散解析ケース

解析ケース	室温(材料温)	Flushing 時間	有効拡散係数等
case1-1	23°C	無し	$D_{\text{eff}}: 1.1 \times 10^{-14} m^2/s$ , $Da: 5.9 \times 10^{-6} m^2/s$ , $C_0: 1.92 \times 10^8 \mu g/m^3$
case1-2		1h/24h	
case1-3		8h/24h	
case2-1	30°C	無し	$D_{\text{eff}}: 4.2 \times 10^{-14} m^2/s$ , $Da: 6.2 \times 10^{-6} m^2/s$ , $C_0: 1.92 \times 10^8 \mu g/m^3$
case2-2		1h/24h	
case2-3		8h/24h	

通常換気時の吹出風速:  $0.1U_0$  (0.1 m/s, 換気回数 1.6回/h)

Flushing 時の吹出風速:  $U_0$  (1.0 m/s, 換気回数 16回/h)

軸は室平均無次元 TVOC 濃度( $C/C_0$ )を示す。ここでは単純なモデルとして、横軸の0時点では建材(合成ゴム)の製造直後の状態が保存されており、建材内の濃度を均一であると仮定している。この状態から室内放散を開始すると室内平均濃度は直後に大きなピークを迎えた後、急激に減衰するが、数日後にその変化はかなり安定する。放散開始直後のピークは建材の極めて表層部分からの放散によるものである。建材(合成ゴム)が製造直後の状態で室内に設置され室が利用さ

れることは稀であり、室内利用時には一般に製造直後の状態に比べ、少なくとも数日以上材齢となることが予想される。そのため本解析では計算開始より無次元時間  $4.3 \times 10^6$  (3日間)経過した後からのTVOC濃度の時間変化を検討対象とする。図6では計算開始後3日間の部分をグレーに塗り分けて区別しており、この部分は今回の検討の主たる対象としない。

室温23℃で通常換気(Flushing無し)のcase1-1では、室平均TVOC濃度は無次元時間  $4.3 \times 10^6$  (3日)時点で  $C/C_0=1.3 \times 10^7$  ( $24.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )であり、その後緩やかに減衰する<sup>注7)</sup>。無次元時間  $4.3 \times 10^6$  (3日後)から無次元時間  $2.0 \times 10^7$  (14日後)の期間における室平均濃度の減衰は  $\Delta C/C_0=6.6 \times 10^{-8}$  ( $12.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )程度であり、約50%の減衰である(図6(1))。室温23℃で24時間に1時間の割合でFlushingを行ったcase1-2、及び24時間に8時間の割合でFlushingを行ったcase1-3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  $2.0 \times 10^7$  (14日間)の計算時間の範囲内ではFlushingによる室内濃度低減の効果はFlushingを行っている時間だけに現れ、その後の平均濃度にはほとんど影響を与えない。建材中の有効拡散係数  $D_{\text{eff}}$  が23℃に比べ約4倍となる室温30℃で通常換気のcase2-1では検討対象である無次元時間  $4.3 \times 10^6$  (3日後)時点における室平均濃度は  $C/C_0=2.5 \times 10^7$  ( $40.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )であり、case1-1の2倍程度の値となる<sup>注8)</sup>。無次元時間  $4.3 \times 10^6$  (3日後)から無次元時間  $2.0 \times 10^7$  (14日後)の間における室平均濃度の減衰は  $\Delta C/C_0=1.4 \times 10^7$  ( $22.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )程度であり、約50%の減衰である。1時間Flushingを行ったcase2-2、及び8時間Flushingを行ったcase2-3では、case1-2、case1-3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<sup>注9)</sup>平均濃度は室全体の濃度変動と同様の傾向を示す。

図7に無次元時間  $2.0 \times 10^7$  (14日間)における排気口平均TVOC濃度履歴を示す。横軸は無次元時間( $T/T_0$ )、縦軸は排気口平均無次元TVOC濃度( $C/C_0$ )を示す。室平均濃度の時間変化と同様に、計算開始より無次元時間  $4.3 \times 10^6$  (3日間)経過した後からの時間変化を検討対象とする。室温23℃で通常換気(Flushing無し)のcase1-1では排気口での平均濃度は無次元時間  $4.3 \times 10^6$  (3日間)時点において  $C_{\text{ex}}/C_0=0.84 \times 10^7$  ( $16.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )であり、その後緩やかに減衰する(図7(1))。無次元時間  $4.3 \times 10^6$  (3日間)から無次元時間  $2.0 \times 10^7$  (14日間)の間における排気口濃度の減衰は  $\Delta C/C_0=4.5 \times 10^{-8}$  ( $8.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )程度である。排気口での平均濃度で無次元化した室平均濃度(SVE1<sup>注10), 注18)</sup>は、床面に汚染質発生源とした場合1.5となる。即ちこの室内の換気効率は室内完全混合を仮定した場合と比較し、1.5倍効率が悪いことを示す。Flushing時、排気口平均濃度は1/10まで減少する。これはTVOC発生量のオーダーが吹出風速  $0.1U_0$  と  $U_0$  ではほとんど変化しないことを意味する。室温30℃でFlushingを行わないcase2-1ではcase1-1と比較し、排気口での平均濃度は約2倍となる(図7(2))。

**7-3. TVOC放散量** 図8に通常換気時(吹出風速  $0.1U_0$ )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。横軸は床面位置( $x/L_0$ )、縦軸は無次元時間( $T/T_0=7.2 \times 10^6$ )における床面からの無次元TVOC放散量(放散  $\text{flux}/C_0U_0$ )を示す。床面からの放散量はほぼ一

表3 連成解析の計算条件

メッシュ 分割	室内側	: $68(x) \times 64(z)$
	建材側	: $68(x) \times 41(z)$
(1) Reynolds数	: $U_0 L_0 / \nu$	= $4.2 \times 10^3$
(2) 空気中 無次元有効拡散係数	: $D_a / U_0 L_0$	= $9.8 \times 10^{-5}$ (23℃)
		$1.0 \times 10^{-4}$ (30℃)
(3) 建材中 無次元有効拡散係数	: $D_{\text{eff}} \cdot T_0 / L_0^2$	= $1.8 \times 10^{-13}$ (23℃)
		$7.0 \times 10^{-13}$ (30℃)

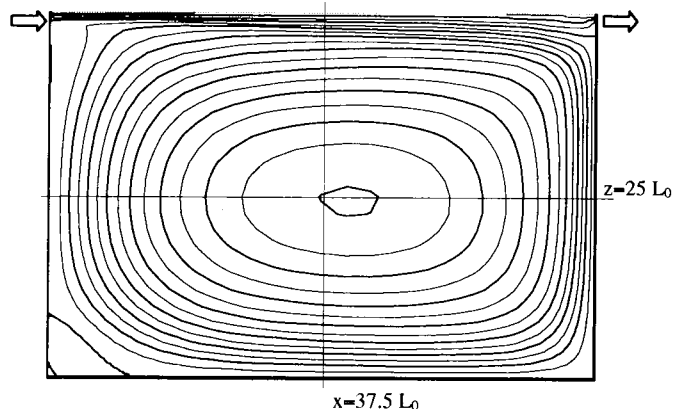


図4 流線図

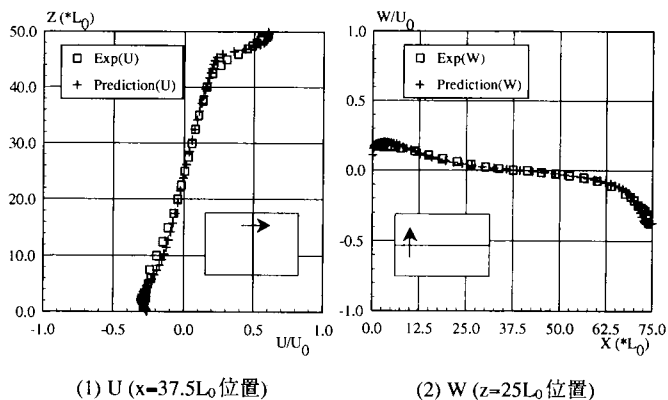


図5 平均風速分布 ( $U_0$ で基準化)

様に分布しており室内気流分布の影響は小さい。通常換気時に比べFlushing時には放散量が增大しているが、その差は最大でも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室平均濃度が減少する。室温が23℃から30℃に上昇することで建材中のTVOC拡散係数は約4倍に増大するが、気中への放散量の増加は約2倍である<sup>注8)</sup>。また、吸着・脱着の影響を考慮した場合、初期放散量が減少し、放散量の時間減衰がやや緩やかになることが予想される<sup>注9)</sup>。これらの効果に関しては今後検討を行う予定である。

**7-4. 室内TVOC濃度分布** 図9に無次元時間  $T/T_0=7.2 \times 10^6$  におけるTVOC濃度分布を示す。室温23℃及び30℃の両ケースにおいて、床面では平均濃度の6~8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ことを示す。成人・立位の呼吸域平均濃度( $z=25L_0$ ライン)はcase1-1で  $C_{\text{ave}}/C_0=1.0 \times 10^7$  ( $20.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )程度、case2-1で  $C_{\text{ave}}/C_0=1.7 \times 10^7$  ( $34.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )の値と

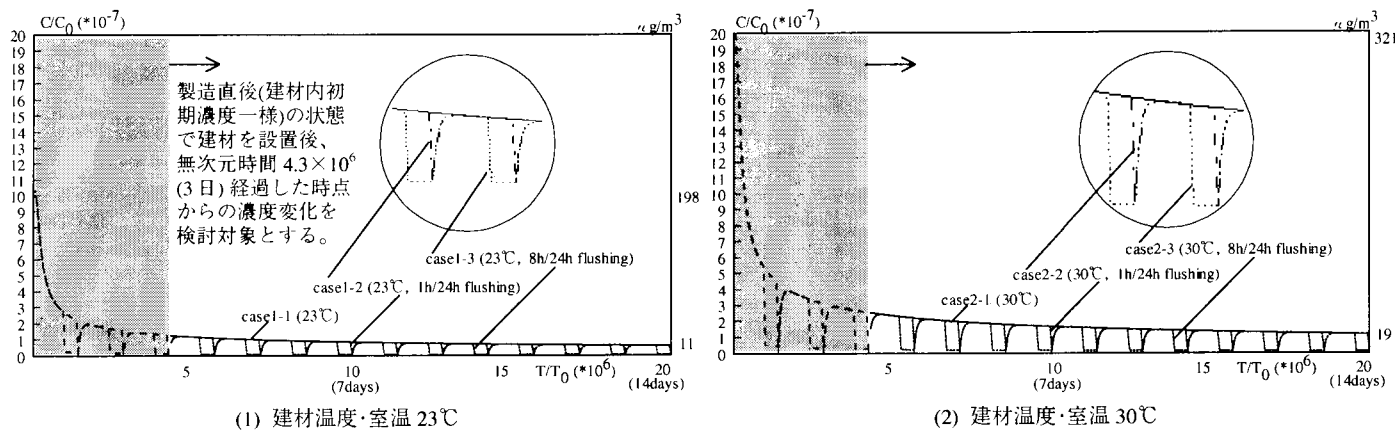


図6 室平均TVOC濃度履歴

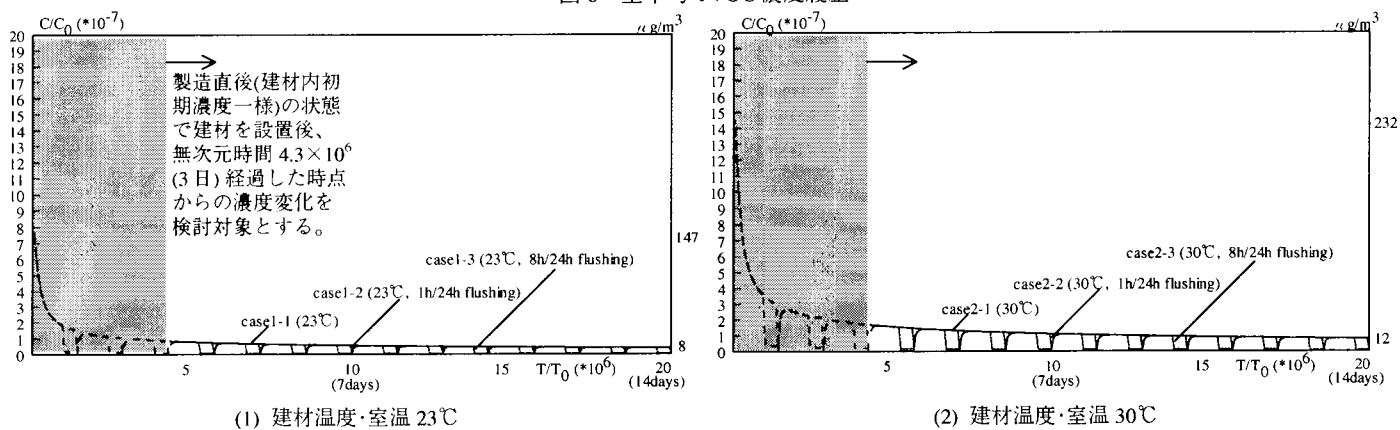


図7 排気口平均TVOC濃度履歴

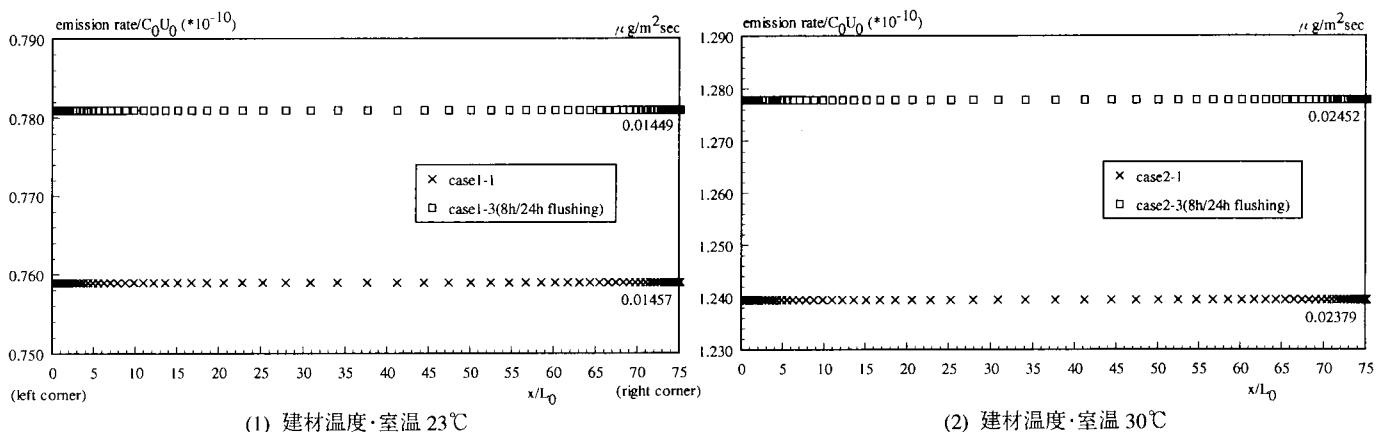


図8 床面からのTVOC放散量 ( $T/T_0=7.2 \times 10^6$ )

なり<sup>注6)</sup>、Flushing時にはその1/10程度まで濃度が低下する。また今回の解析条件ではTVOC発生量は温度に強く依存する。

7-5. 換気効率の解析 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)<sup>注7)</sup>における平均濃度、VF及びL-PFR<sup>注11)</sup>の値を示す。VFは対象領域内で発生したTVOCが排気口から排出されるまでに対象領域内に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<sup>20)</sup>。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。

7-6. 考察 建材中の拡散特性時間は拡散係数 $D_{eff}$ の次元が{長さ<sup>2</sup>/時間}であるので、ここでは $\{(0.025)^2 L_0^2 / D_{eff}\} / T_0$ で評価する。0.025は無次元材料厚である。このようにして定義された建材中の拡散特性時間は $3.5 \times 10^9$  ( $2.5 \times 10^3$ 日、約7年)とかなり長い。これに対して極めて短い期間 $2.0 \times 10^7$  (14日間)のTVOC放散に関しては、 $6.0 \times 10^4$  (1時間)、及び $4.8 \times 10^5$  (8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6, 7)。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

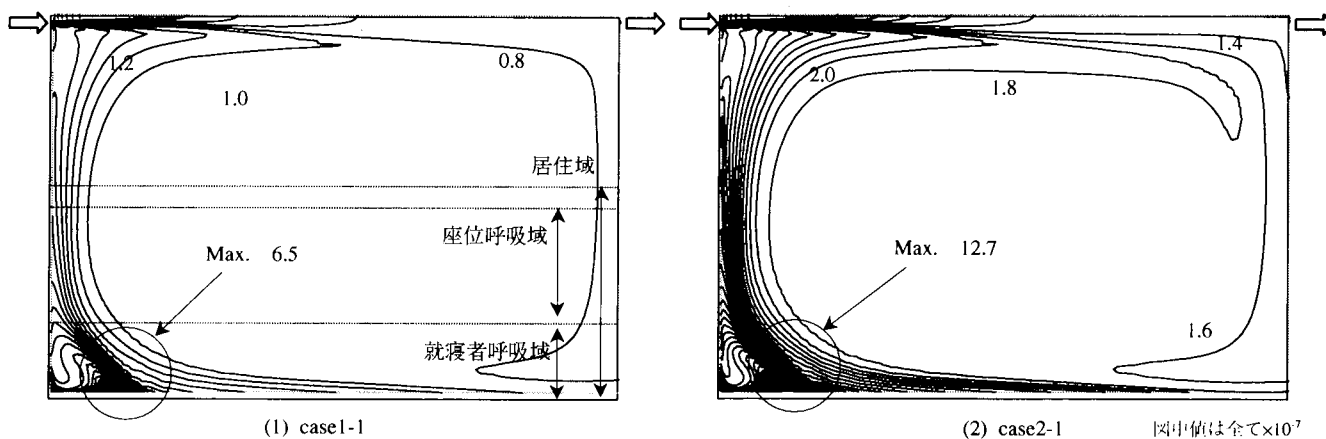


図9 TVOC濃度分布  $C/C_0$ , ( $T/T_0=7.2 \times 10^6$ )

表4 換気効率指標の解析<sup>\*)17)</sup> ( $T/T_0=7.2 \times 10^6$ )

case1-1	平均濃度	VF	L-PFR
居住域 ( $z < 30L_0$ (1.8m))	$1.0 \times 10^{-7}$	5.4	0.67
座位呼吸域 (8.3 $L_0$ (0.5m) ~ 25 $L_0$ (1.5m))	$1.0 \times 10^{-7}$	8.1	0.63
就寝者呼吸域 ( $z < 8.3 L_0$ (0.5m))	$1.2 \times 10^{-7}$	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)

たい。室内温度を 23℃から 30℃に上昇させる短期的(無次元時間  $2.0 \times 10^7$ , 14日間)な Bake-out 効果は大きくない。なぜなら 23℃から 30℃の温度上昇による放散量増大が 2 倍程度であり、30℃における 2 週間分の放散量は、23℃の場合の約 2 倍、即ち 4 週間分  $4.0 \times 10^7$  (28日間)でしかない。このように Bake-out による加齢加速期間は建材中の拡散特性時間  $3.5 \times 10^9$  ( $2.5 \times 10^3$ 日、約 7年)に比べ極めて小さく、やはりその後の放散量にそれほど大きな影響を与えないと考えられる。

## 8. 結論

(1) 建材からの化学物質放散は内部拡散支配型と蒸散支配型放散に分類される。Bake-out、Flushing は、材料内拡散係数の温度依存性、蒸気圧の温度依存性、材料表面における物質伝達率の風速依存性を利用して、短期間に放散量を増大させその後の放散量低下を期待するものとなる。その効果は建材の拡散特性時間スケール(SBR 0.0015m厚の場合約 7年のオーダー)に対して Bake-out、Flushing 期間中の放散が、どの程度気中放散終結までに要する時間の短縮に寄与するかを検討することにより評価される。

(2) 内部拡散支配型の化学物質放散では、材料内の化学物質濃度分布、有効拡散係数の推定が重要となる。有効拡散係数の値は一般の熱拡散などに比べ極めて小さいオーダーとなる。

(3) 建材中の無次元拡散特性時間  $3.5 \times 10^9$  ( $2.5 \times 10^3$ 日)に比べ、極めて短い  $2.0 \times 10^7$  (14日間)の短期的な解析を行った。数日経過後の室平均 TVOC 濃度の変化は緩やかで、無次元時間  $4.3 \times 10^6$  (3日後)から無次元時間  $2.0 \times 10^7$  (14日後)の間で室平均濃度は約 1/2 となる。

(4) 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)及び  $4.8 \times 10^5$  (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 後の平均濃度に殆ど影響を与えない。

(5) 建材温度・室温が 23℃から 30℃に上昇することで、室平均 TVOC 濃度は約 2 倍となる。しかし、解析時間  $2.0 \times 10^7$  (14日間)の 30℃へ

の昇温期間中の TVOC 放散量は 23℃の場合の 2 倍、即ち 23℃の条件における無次元時間  $4.0 \times 10^7$  (28日間)分の放散量に相当し、材料の拡散特性時間に比べ、はるかに小さいので、Bake-out はその後の室平均濃度に大きな影響を与えない。

(6) 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。

(7) 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。

## 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 東京大学生産技術研究所教授)の活動の一環として実施したものである。関係各位に深甚なる謝意を表する次第である。

## 記号

$L_0$	: 代表長さ(0.06m, 吹出スロット幅)
$U_0$	: 代表風速(1m/s)
$T_0$	: 代表時間 ( $= L_0/U_0$ )
$D_{eff}$	: 建材中 TVOC 有効拡散係数 [ $m^2/s$ ]
$D_a$	: 空気中 TVOC 拡散係数 [ $m^2/s$ ]
$C$	: TVOC 気相換算濃度 [ $\mu g/m^3$ ]
$C_0$	: 建材中初期 TVOC 濃度 ( $1.92 \times 10^8 \mu g/m^3$ , 気相換算濃度)
$C_s$	: 材料表面濃度 [ $\mu g/m^3$ ]
$C_{max}$	: 最大室平均 TVOC 濃度 [ $\mu g/m^3$ ]
$C_{ext}$	: 排出口平均 TVOC 濃度 [ $\mu g/m^3$ ] ( $= q_p/Q$ )
$C_{ave}$	: 局所領域平均 TVOC 濃度 [ $\mu g/m^3$ ]
$C_{room}$	: p を汚染源とし、汚染質発生量を $q_p$ 、換気量を Q とした場合の位置 p の濃度 [ $\mu g/m^3$ ]
$q_p$	: 汚染源の汚染質発生量 [ $\mu g/s$ ]
$Q$	: 換気量 [ $m^3/s$ ]
$V_{room}$	: 室容積 [ $m^3$ ]
VF	: 汚染質塊の平均 Visitation Frequency [-]
$J_p$	: 単位時間当たり対象領域 P に流入(再帰)する汚染質塊 [個/s]
$M_p$	: 単位時間当たり対象領域 P に初めて入る、もしくは発生する汚染質塊 [個/s]
$\Delta q_p$	: 単位時間当たり対象領域 P に流入(再帰)する汚染質量 [流入 flux, $\mu g/s$ ]
$q_p$	: 単位時間当たり対象領域 P 内で発生する汚染質量 [ $\mu g/s$ ]
L-PFR	: Local Purging Flow Rate [ $m^3/s$ ]

$V_p$  : 対象領域 P の体積 [m<sup>3</sup>]  
 $T_p$  : 対象領域 P の平均滞在時間 [sec/1 回の滞在]  
 $q_p$  : 単位時間当たり対象領域 P 内で発生する汚染質量 [ $\mu$  g/s]  
 $C_p$  : 対象領域 P の平均濃度 [ $\mu$  g/m<sup>3</sup>]

$L-PFR = V_p / (VF \times T_p) = q_p / C_p$  (8)  
 換気設計では、換気量・換気効率を制御する事により必要部位の空気質を制御している。局所領域の汚染質濃度を定める実質的な換気量を示す L-PFR は、まさにこの制御変数に対応する。

**注**

- [1] 換気量が大きく変化し、その結果、室内空気中の汚染質濃度が大きく変化する場合、特に吸着・脱着の影響を考慮する必要がある。本報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。
- [2] 今回の解析では検討時間が比較的短く、合成ゴム(SBR)からの TVOC 放散は、合成ゴム表面から  $1.0 \times 10^{-4}$  m 程度の領域内における拡散現象に支配されている。即ち建材厚が  $1.0 \times 10^{-4}$  m 以上である場合、短期的な TVOC 放散性は材料厚さに関わらず、同様の結果となる。本報では建材厚を 0.0015m としたが、建材厚が 10 倍(0.015m)のケースでも同様の解析を行っており、短期的な放散量に関しては上記考察が正しいことを確認している。
- [3] 製造後の材令により材料内 TVOC 濃度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] 建材中の有効拡散係数は、同種の建材においても含有される可塑剤の量等によりその値は大きく変化すると考えられる。例えば、SBR に関しても Q.Chen らの結果( $10^{-14}$  m<sup>2</sup>/s のオーダー)<sup>2,13)</sup>、J.C. Little らの結果( $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s のオーダー)<sup>2,14)</sup>、H.N. Knudsen らの結果( $10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s のオーダー)<sup>2,15)</sup>等、広範囲に渡る様々なデータが提供されている。本研究では Bluyssen, P. M. らの実験結果を基に Q.Chen らが同定した有効拡散係数を使用している。また、各データの妥当性に関しては今後十分な検討が必要であると考える。
- [5] 日本建築学会年次大会<sup>2,3)</sup>及び空気調和衛生工学会講演論文集<sup>2,4)</sup>で報告した予備解析結果<sup>2,4)</sup>は建材中の差分分割が充分密でないため、解析結果に格子依存性が見られた。本報で示す解析結果は建材中の最小格子スケールが  $1.0 \times 10^{-3}$  mm と充分細かく、解析格子粗密による解の依存性はほとんどない。材料中の有効拡散係数が小さく、材料中で大きな濃度勾配が生じやすい為、材料中の解析格子の設定には十分な注意が必要となる。
- [6] 壁関数を用いた標準 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、乱流拡散に基づく物質拡散係数を定義する必要がある。本解析では低 Reynolds 数型 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に基づくことになる。
- [7] HASS102 換気基準では TVOC 設計基準濃度は  $300 \mu$ g/m<sup>3</sup>。今回選んだ材料の解析結果はその 1/10 のオーダーである。
- [8] 拡散係数が 4 倍となった場合に、材料表面濃度勾配 ( $\partial c / \partial z$ ) が変化しないと仮定すると、単位時間あたりの放散量(放散 flux は  $D_{eff} \times (\partial c / \partial z)$  で定義)は 4 倍となる。実際には拡散係数が変化した場合、材料表面濃度勾配も変化するため、その変化は数値解析、もしくはフーリエ級数展開を用いた理論解析により評価する必要がある。本報では数値解析により拡散係数が 4 倍となった場合の材料表面濃度勾配の変化を解析した結果、無次元時間  $2.0 \times 10^7$  (14 日間)の期間では材料表面濃度勾配 ( $\partial c / \partial z$ ) が約 1/2、即ち放散量は約 2 倍であった。これは拡散係数が 4 倍となることで材料中の濃度勾配の分布性状(時間<sup>1</sup>の関数)がもとの拡散係数に比べ 4 倍進み、その分材料表面での分布性状がなめらかになる為である。
- [9] 居住域は床面から高さ 30L<sub>0</sub> (1.8m)まで、座位呼吸域は 8.3 L<sub>0</sub> (0.5m) < z < 25L<sub>0</sub> (1.5m)、就寝者呼吸域(横臥位)は 8.3 L<sub>0</sub> (0.5m)までの領域と仮定する。
- [10] SVEI は閉鎖空間内のある点の空気が排出されるまでに要する時間、即ちその点で発生した汚染質の室内滞在時間を評価する。

$$SVEI(p) = \frac{C_{room}(p)}{C_{ext}} \quad (4)$$

ここで、

$$C_{room}(p) = \frac{\int_{room} C_x(p, x) dx}{V_{room}} \quad (5)$$

$$C_{ext} = \frac{q_p}{Q} \quad (6)$$

- [11] VF (Visitation Frequency) とは、解析対象として局所的に設定された領域内(局所領域)で発生した汚染質が、一度領域から排出された後、再び領域内に移流される回数を示し、(4)式で定義される。

$$VF = 1 + (J_p / M_p) = 1 + (\Delta q_p / q_p) \quad (7)$$

VF=1 とは 1 回だけその領域に滞在し、そのまま排出され、再び帰還する事が無いことを意味する。同じく VF=2 は一度滞在して領域外に出た後、再び帰還し、その後排出されることを意味する。

局所領域の VF は室内の換気設計上、汚染質の排出のスムーズさを示す重要なパラメータとなる。VF が高い場合、局所領域から排出された汚染質が室内から円滑に排出されず、再度還流する頻度の高いことを意味し、局所領域の下流側の換気設計に問題があることを示す。

L-PFR (Local Purging Flow Rate) とは、局所領域に対する実質的な換気空気の入流量(又は排出量)を示すもので、局所領域に対する汚染質の平均 VF と平均滞在時間により(5)式のように定義される。

**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, 日本建築学会年次大会 学術講演梗概集 755-760, 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、日本建築学会年次大会 学術講演梗概集 767-768, 1997
- [3] 加藤信介、村上周三、伊藤一秀、近藤靖史：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：日本建築学会年次大会、1998.9、D-2、845-846
- [4] 加藤信介、村上周三、伊藤一秀：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：空気調和衛生工学会講演論文集、1998.8、II、625-628
- [5] Chang, J.C.S., et al. (1992): Characterization of organic emissions from a wood finishing product - wood stain., *Indoor Air*, 2, 146-153
- [6] Christianson, J., et al., (1993): Emission of VOCs from PVC-flooring-models for predicting the time-dependent emission rate and resulting concentration in indoor air. *Proceedings of Indoor Air '93*, 2, 389-394
- [7] Haghight, F. and de Bellis, L. (1998): Material Emission Rates: Literature Review, and the Impact of Indoor Air Temperature and Relative Humidity. *Building and Environment*, 33, 261-277
- [8] 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
- [9] BSR/ASHRAE Standard 62-1989R, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, Public Review Draft, Appendix D
- [10] Axley, J.W. (1995): New mass transport elements and compounds for the NIST IAQ model. *NIST GCR 95-676*,
- [11] Sparks, L.E., Tichenor, B.A., Chang, J. and Guo, Z. (1996): Gas-phase mass transfer model for predicting volatile organic compound (VOC) emission rates from indoor pollutant sources., *Indoor Air* 6, 31-40
- [12] Bluyssen, P. M., et al., (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.
- [13] Yang, X., Chen, Q., and Bluyssen, P. M. (1998): Prediction of short-term and long-term volatile organic compound emissions from SBR bitumen-backed carpet at different temperatures. *ASHRAE*
- [14] J.C. Little, A.T. Hodgson and A.J. Gadgil, (1994): Modeling emissions of volatile organic compounds from new carpets. *Atmospheric Environment*, Vol. 28, No.2, 227-234
- [15] R. Meininghaus, H.N. Knudsen and L. Gunnarsen (1998): Diffusion and sorption of volatile organic compounds in indoor surface materials, *EPIC'98*, Lyon, France, 19-21 November, vol. 1, 33-38
- [16] Murakami, S., Kato, S., et al., (1996): New low Reynolds-number k- $\epsilon$  model including damping effect due to buoyancy in a stratified flow field. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 39, 3483-3496
- [17] 鈴木信夫、伊藤一秀、加藤信介、村上周三、小林 光：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) Purging Flow Rate 検討用精密模型を用いた室内気流測定：空気調和衛生工学会講演論文集 1996.9、I 45-48
- [18] Kato, S., Murakami, S., (1988): New ventilation efficiency scales based on spatial distribution of contaminant concentration aided by numerical simulation. *ASHRAE Transactions*, 94, 309-330
- [19] 松本博、林茂広、建材からの汚染質発生を考慮した室内空気質の予測法に関する研究 その 3 source/sink モデルを用いた IAQ 予測法、日本建築学会年次大会 学術講演梗概集、1998 851-852
- [20] 伊藤一秀、村上周三、加藤信介：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) Visitation Frequency, Purging Flow Rate による局所領域換気効率の評価：空気調和衛生工学会講演論文集、1997.9、II 421-424

(1999年1月10日原稿受理、1999年4月22日採用決定)