

FLEC 内の化学物質放散性状に関する CFD 解析

正会員 ○村上周三 (東大生産技術研究所)
 学生会員 朱 清宇 (東京大学大学院)
 正会員 田辺新一 (早稲田大学)

正会員 加藤信介 (東大生産技術研究所)
 正会員 伊藤一秀 (東京工芸大学)

1 序

FLEC(Field and Laboratory Emission Cell) ^{文1)} におけるキャビティ内の流れ場、拡散場を解析し、建材表面からの化学物質の放散性状を調べた。別報^{文2)}では、主として蒸散支配型建材を対象にした解析について報告した。本報では、これに加えて、内部拡散支配型建材と複合型(蒸散+拡散)建材に関し、その放散性状を解析した結果を蒸散支配型の場合と比較して報告する。本解析により FLEC の化学物質放散速度測定の特徴が明らかにされた。

2 FLEC キャビティの構成(図 1)

図 1 にデンマークのボルコフ氏が考案した FLEC ^{文1)} の外形と断面を示す。FLEC 本体や付属部分は全てステンレス製である。清浄空気が FLEC キャビティ外周部の幅 1mm の入口より吹出され、建材表面に沿ってキャビティ中央に収束し、上部より排出される。FLEC は、通常表 1 に示されるよう極めて大きな換気回数で放散速度測定が行われるため、建材表面の物質伝達率が放散速度を支配する蒸散支配型建材の測定には不向きとされている。今回、それ以外の問題点についても明らかにした。

3 流れ場解析と解析条件(表 1,3)

換気量 $2.4 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{h}$ (換気回数 686 回/h) と $1.2 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{h}$ (換気回数 343 回/h) の 2 ケース。CFD 解析条件は表 3 に示す。流れ場解析は、Low-Re $k-\epsilon$ モデル(Abe-Nagano model)^{文3)} と層流の 2 ケースを行う。

4 拡散場解析と試料建材のモデル化(表 1~3, 図 1,2)

流れ場解析の後に、試料建材設置面(図 1-(2)) に建材モデルの物質放散の境界条件を与え、等温状態を仮定し物質放散と拡散場解析を行う。試料建材は、蒸散支配型放散、内部拡散支配型放散と複合建材(蒸散+内部拡散)の 3 種類。蒸散支配型建材の場合は建材表面に既知の気相濃度を境界条件として与える。内部拡散型の建材モデルとして、合成ゴム (SBR)^{文4)} を扱う。複合建材(蒸散+内部拡散)の建材モデルとして、(純液 Decane+壁紙材) を扱う。FLEC 流入空気の濃度はゼロとする。

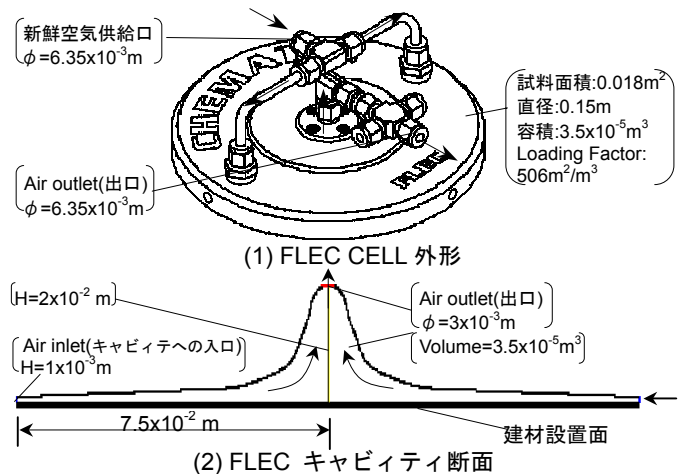


図 1 FLEC の外形と断面

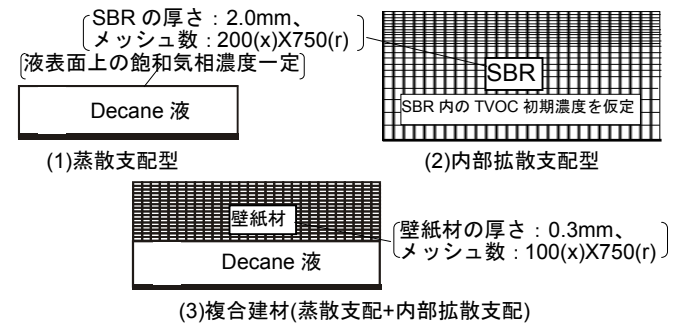


図 2 対象建材のモデル化とメッシュ分割

表 1 解析ケースと建材モデル

ケース	換気量 (g/m ³ × 10 ⁻²)	換気回数 (回/h)	温度 (°C)	建材モデル	乱流モデル
case1	2.4	686	21.8 22.7 22.7 30	蒸散支配型 (Water, Decane 液)	Low-Re
case2	1.2	343			層流
case3	2.4	686		拡散支配型 (TVOC)	層流
case4	1.2	343		複合建材 (壁紙材 + Decane 液)	層流

表 2 C₀(飽和気相濃度), C'₀(SBR 初期濃度), D_c (SBR と壁紙材中の有効拡散係数) と D_a (空気中の物質拡散係数)^{文5,6)}

ケース	温度 (°C)	C ₀ (g/m ³)	C' ₀ (g/m ³)	D _c (SBR, 壁紙) (m ² /s)	D _a (m ² /s)
case4 (Water)	21.8	19.9	192 160	1.10x10 ⁻¹⁴ 4.20x10 ⁻¹⁴	2.27x10 ⁻⁵
case5 (TVOC)	22.7 30				5.94x10 ⁻⁶ 6.15x10 ⁻⁶
case6 (Decane)	22.7	10.0	2.30x10 ⁻⁷ 8.78x10 ⁻⁷		4.75x10 ⁻⁶
	30	14.0			4.81x10 ⁻⁶

4.1 蒸散支配型建材モデル(図 2(1))

FLECはまだ乾いていないペイントなど濡れた面からの放散量の測定を意図したものではないが、蒸散支配型放散の特徴である建材表面で既知の気相濃度が与えられるという条件をモデル化するため、純水(Water)と純液デカン(Decane)の2ケースを解析する(表 1,2,3)。別報⁷⁾の Small Test Chamberでの解析条件に合わせ、純水面の温度は21.8°C、純液Decane面の温度は22.7°Cとする。建材表面に既知の気相濃度を境界条件として与え、拡散場の定常解析を行う。

4.2 内部拡散支配型建材モデル(図 2(2))

内部拡散型の建材モデルとして、合成ゴム(SBR)⁴⁾を扱う。SBRの厚さは2mmと仮定する。SBR内部のTVOC初期濃度 C_0 は文5を参考に、23°Cの場合192g/m³一様、30°Cの場合160g/m³一様とし、SBR内部の有効拡散係数 D_c は23°Cの場合 1.1×10^{-14} m²/s、30°Cの場合 4.2×10^{-14} m²/sと仮定した(表 2)。SBR内部にはメッシュ(200(x)X750(r)のメッシュ)(図 2(2))を設け、建材内とFLEC内の全領域を連成して非定常解析を行う。

4.3 複合建材(蒸散+内部拡散支配)モデル(図 2(3))

壁紙材と純液Decaneの境界面にDecane既知の気相濃度を与え、壁紙材の内部にもメッシュ(100(x)X75(r)のメッシュ)(図 2(3))を設け、建材内とFLEC内の全領域を連成して定常解析を行う。有効拡散係数 D_c はIZM規格の壁紙材を用いて、カップ法により我々が測定した値を用いた⁸⁾(表 2)。内部拡散支配型建材モデルと同じく建材温度23°Cの場合と30°Cの場合に関して検討する。

5 流れ場の解析結果(図 3,4)

図3に層流解析(case3)のFLECキャビティ内の風速分布を示す。建材設置面近傍のスカラー風速は 8×10^{-3} m/s程度である。FLECの入口の吹出速度 V_{in} (1.4×10^{-2} m/s(case1,3,5)、 7.0×10^{-3} m/s(case2,4))で無次元化した各ケースの建材設置面近傍の風速分布を図4に示す。Low-Re k-εモデルによる解析と層流解析は全く同一の流れ場を示した(図 4)。FLEC入口風速・入口幅により定義した Reynolds 数は case1,3 で0.93、case2,4 で0.46である。FLECキャビティ内の流れ場はほぼ完全な層流であり、CFD解析には乱流モデルに係る誤差が発生する余地がなく、結果に十分な信頼性を置くことができる。

6 濃度場の解析結果(図 5,6,表 4)

k-ε解析と層流解析が同一のため、拡散場解析は層流解析結果に関してのみ示す。表4に別報⁷⁾で示した Small Test Chamberの実験結果と共にその蒸

表 3 CFDの解析条件

座標系	円筒座標系	メッシュ(2D)	27,300
乱流モデル	Low-Re k-ε (Abe-Nagano model) ^{文4)} 、層流		
移流項	QUICK		
流入境界条件	Low-Re	$V_{r,in} = 1.4 \times 10^{-2}$ m/s(case1,3) $V_{r,in} = 7.0 \times 10^{-3}$ m/s(case2,4,5,6) $V_{x,in} = 0$ (case1~6) $k_{in} = 3/2 \cdot (U_{in} \times 0.05)^2$, $\epsilon_{in} = C_{\mu} \cdot k_{in}^{3/2} / L_{in}$, $L_{in} = 1/7 L_0 = 1.43 \times 10^{-4}$ m	
	層流	$V_{r,in} = 1.4 \times 10^{-2}$ m/s(case1,3) $V_{x,in} = 0$ $V_{r,in} = 7.0 \times 10^{-3}$ m/s(case2,4) $V_{x,in} = 0$	
流出境界条件	質量保存	K_{out} , $\epsilon_{out} = \text{free slip}$	
壁面境界条件	no-slip条件	対称面	$\partial V_r / \partial r = 0$

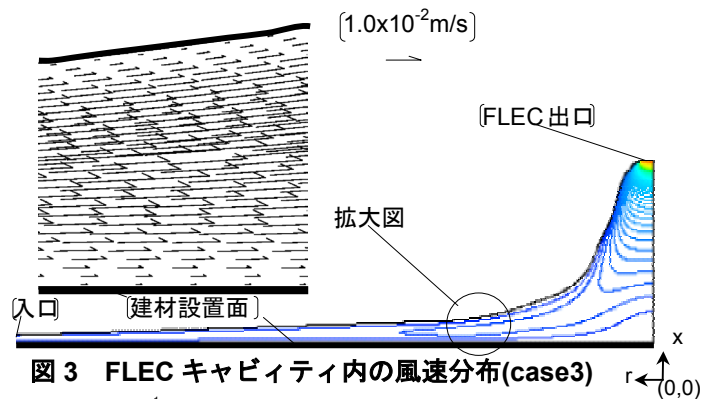


図 3 FLECキャビティ内の風速分布(case3)

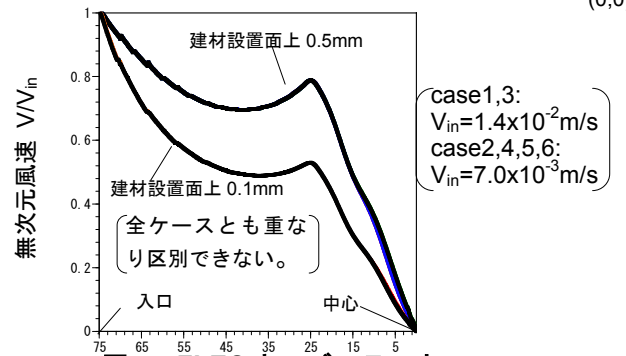


図 4 FLECキャビティ内建材設置面近傍のスカラー風速分布

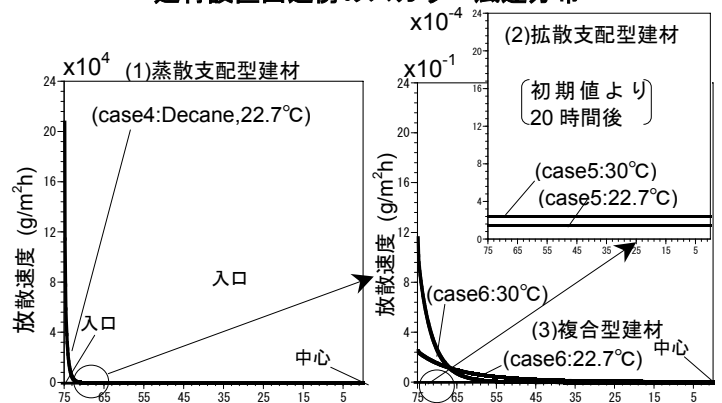


図 5 建材面からの放散速度の分布 (縦軸の単位が異なるので注意されたい)

散特性をまとめる。

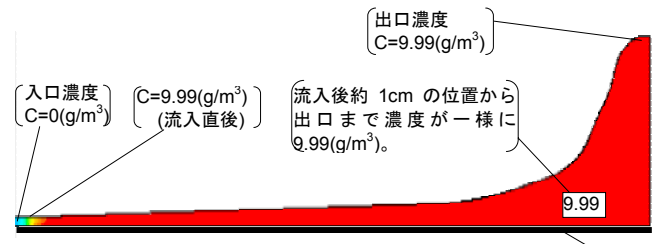
6.1 蒸散支配型建材(図 5, 図 6(1))

case3,4とも、水の場合もDecaneの場合も出口濃

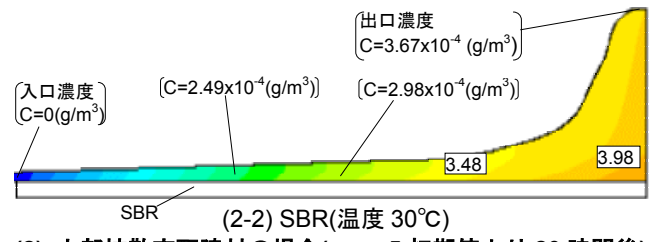
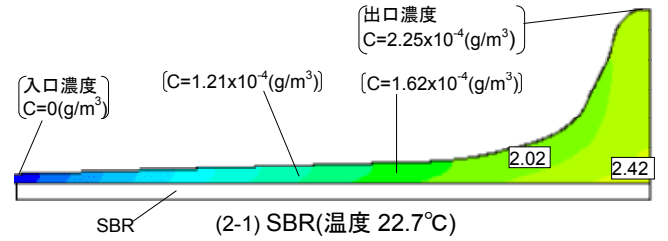
度と建材モデル表面気相濃度は等しい(表4)。純水の放散速度(放散フラックス、case3)は $26.95(\text{g}/\text{m}^2\text{h})$ 注¹⁾、Decane の放散速度(case3)は $13.55(\text{g}/\text{m}^2\text{h})$ 。この種の化学物質濃度の測定においては一般に気中濃度が、建材表面濃度より低いことが基本的前提となるが、FLEC での蒸散支配型建材ではこれが成立しない。気中での拡散係数 D_a は化学物質によって大きく変わるものではないので、この結果は等温条件が満たされる限り、材料表面の気相濃度が気流性状に依存せず定められる蒸散支配型建材すべてについて、また表面気相濃度の大小にかかわらずあてはまるものと考えられる。キャビティ内の濃度分布を図6(1)に示す。入口からわずかの距離ですぐ出口濃度と等しくなっている。これに対応して図5に示すように試料建材からの放散速度は入口近傍では極端に大きいが入口からほんの数 cm 位の距離で放散速度はすぐゼロに近くなり中央付近まで殆どゼロとなっている。これに対し Small Test Chamber の場合、出口濃度は飽和気相濃度よりやや低く、試料建材表面境界層の拡散速度が放散量を支配することをある程度再現する結果となっている。換気量が case3 の 2 分の 1 となる case4 の場合、純水と Decane の放散速度は換気量に比例してそれぞれ case3 の解析結果の 2 分の 1 となる。

6.2 内部拡散支配型建材(図5,図6(2),表4)
初期値より 20 時間後の結果を示す。case5 の場合、建材表面平均濃度は 23°C の場合: $1.21 \times 10^{-4}(\text{g}/\text{m}^3)$ 、 30°C の場合: $1.96 \times 10^{-4}(\text{g}/\text{m}^3)$ (表4)となる。キャビティ内は、鉛直方向、水平方向に濃度分布が形成されている(図6(2))。建材面からの TVOC 放散速度は蒸散支配型建材のような大きな分布が存在せず、 23°C の場合: $1.52 \times 10^{-4}(\text{g}/\text{m}^2\text{h})$ 、 30°C の場合: $2.47 \times 10^{-4}(\text{g}/\text{m}^2\text{h})$ とほぼ一定となる(図5)。

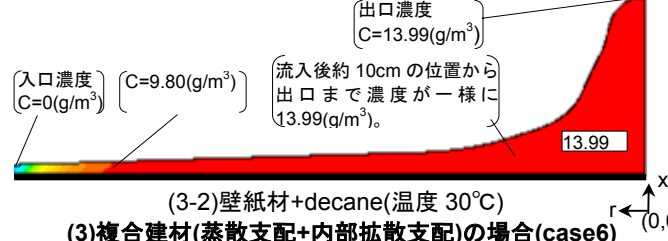
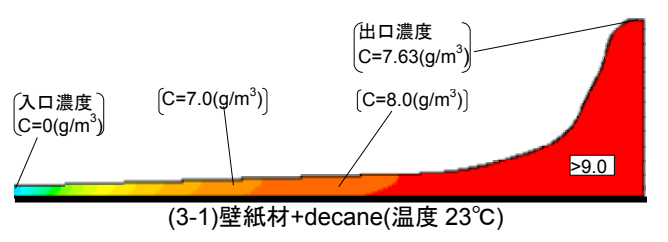
6.3 複合建材(蒸散+内部拡散支配)(図5,図6(3))
複合建材 case6 の場合、壁紙材表面の平均濃度は 23°C の場合: $7.63(\text{g}/\text{m}^3)$ 、 30°C の場合: $13.07(\text{g}/\text{m}^3)$ (表4)。建材からの Decane 放散速度は 23°C の場合: $6.58(\text{g}/\text{m}^2\text{h})$ 、 30°C の場合: $9.50(\text{g}/\text{m}^2\text{h})$ となる。純然たる蒸散支配の case4 の場合より多少小さい。キャビティ内の濃度分布を図6(3)に示す。 23°C の場合、入口から約 30mm の距離で出口濃度と等しく、建材表面濃度より大きくなる; 30°C の場合、入口から約 10mm の距離で出口濃度とほぼ等しくなる。これに対応して図5に示すように複合建材からの放散速度は、① 23°C の場合入口から約 30mm 位の距離で放散速度はゼロに近くなり中央付近まで殆どゼロ、② 30°C の場合入口から約 10mm 位の距離で放



(1) 蒸散支配建材の場合(:case4,Decane)



(2) 内部拡散支配建材の場合(case5,初期値より 20 時間後)



(3)複合建材(蒸散支配+内部拡散支配)の場合(case6)

図6 FLEC キャビティ内濃度分布(g/m^3)

散速度はゼロに近くなり中央付近まで殆どゼロとなる。

7 物質伝達率(図5,6,表4)

7.1 蒸散支配型建材(図5,6,表4)

純水、純 Decane において建材表面から気中への物質伝達は入口のごく近くの極めて限られた領域のみで行われており(図5)、その建材表面平均物質伝達率を求めることに物理的意味はあまりない注⁴⁾。強いて参照濃度を FLEC 入口の濃度とすると表4に示すように、純水、純 Decane の物質伝達率はほぼ一致し(case3 で $1.35(\text{g}/\text{m}^2\text{h}/\text{g}/\text{m}^3)$)、参照濃度を

表 4 物質の放散速度、物質伝達率の予測結果

測定方法	蒸散支配型						拡散支配型 (TOVC)		複合建材 (Decane+壁紙材)		
	(Water)			(Decane)			(TOVC)		(Decane+壁紙材)		
	FLEC (case3)	FLEC (case4)	Small Test chamber	FLEC (case3)	FLEC (case4)	Small Test chamber	FLEC (case5,20hours)		FLEC (case6)		
温度(°C)	21.8			22.7			22.7	30.0	22.7	30.0	
放散速度(g/m ² h)	26.95	13.51	29.9	13.55	6.74	46.4	1.52x10 ⁻⁴	2.47x10 ⁻⁴	6.58	9.50	
建材表面濃度(g/m ³)	19.90			10.00			1.21x10 ⁻⁴	1.96x10 ⁻⁴	7.63	13.07	
出口濃度(g/m ³)	19.89		18.0	9.99		0.6	2.25x10 ⁻⁴	3.67x10 ⁻⁴	9.70	13.99	
飽和気相濃(g/m ³)	19.90			10.00					10.00	14.00	
物質伝達率 (g/m ² h·(g/m ³))	注 2)	1.35	0.68	1.50	1.36	0.67	4.64	1.25	1.26	0.87	0.73
	注 3)	∞	∞	15.7	∞	∞	4.9	-1.46	-1.44	-3.12	-10.33

FLEC 出口濃度とすると、出口濃度は建材表面濃度に一致しているため濃度差ゼロとなり、物質伝達率は無限大に近い値になる。

7.2 内部拡散支配型建材(図 5,6,表 4)

合成ゴム(SBR,2mm)の平均伝達率は、FLEC 入口濃度を参照濃度とすると、23°C の場合 : 1.25(g/m²h(g/m³))、30°C の場合 : 1.26(g/m²h(g/m³)) となりほぼ等しい。参照濃度を FLEC 出口とすると FLEC 出口濃度が建材表面の平均濃度より高くなるため、伝達率は見掛け上負値 (23°C : -1.46(g/m²h(g/m³)), 30°C : -1.49(g/m²h(g/m³))) となる。

7.3 複合建材(蒸散+内部拡散支配) (図 5,6,表 4)

(Decane+壁紙材)の平均伝達率は FLEC 入口濃度を参照濃度とし、23°C の場合 0.87(g/m²h(g/m³)) となり Decane 液からの 0.68(g/m²h(g/m³)) に比べ多少大きくなる。これは Decane 液のみの場合に比べ放散速度がゼロとなる領域が減少したことに対応している。参照濃度を FLEC 出口とすると FLEC 出口濃度が建材表面の平均濃度より高くなるため、伝達率は見掛け上負値となる。

7.4 内部拡散支配及び複合型建材いずれもキャビティ内に入口から出口にわたって大きな濃度分布が存在すること、出口濃度が建材表面平均濃度より大きくなることから、通常物質伝達率を定義することは困難である。

8 結論

(1) FLEC キャビティ内の流れ場は層流。2種類の換気量に関し、無次元化した流れ性状はほぼ同一。
 (2) 蒸散支配型建材モデルの場合、①FLEC 出口濃度は、建材表面濃度にほぼ等しく、②物質放散速度は換気量に比例し、③放散速度は過小評価されるおそれがある。
 (3) 内部拡散支配型建材の場合、建材からの TVOC 放散速度は極端に小さく、キャビティ内濃度分布と関わりなく建材面で一様な放散となる。SBR ような内部拡散支配型建材に対して、FLEC

を用いて建材からの TVOC 放散速度は正確に計測できると考えられる。(4) 複合建材(蒸散+内部拡散支配)の場合、建材からの放散速度が純然たる蒸散支配の case4 の場合により多少小さい。今回壁紙材の厚さが薄いため、蒸散支配の傾向が強くと、放散速度は過小評価されるおそれがある。

注 1) 対応する気化熱は 17W/m² 必要となる。実際の蒸散過程では、今回の等温仮定の成立は容易ではなく、蒸散速度は気化熱の供給に律速されるものと考えられる。2) 物質伝達率は FLEC と Small Test Chamber は入口の濃度 0 を参照濃度として算出。3) 物質伝達率は FLEC と Small Test Chamber の出口濃度を参照濃度として算出。4) 建材表面から FLEC 上側内表面までの距離は入口近傍で最短の L=1mm である(図 1)。キャビティ入口近傍は、流路が極めて薄いため建材表面から放散された物質は直ちに分子拡散により流れ横断方向に拡散する。ここで、分子拡散の特性時間 T(=L²/ν) を L と ν (空気動粘性係数) から求めると、T=0.07(s) となる。入口の流速約 1cm/s に対し極めて短時間に流れ横断方向に拡散が進むことが示唆される。5) 本解析は商用コード Fluent5.0(Fluent Inc. @)を用いている。

参考文献

(1) P. Wolkoff, et al, (1991) Field and Laboratory Emission Cell: FLEC, IAQ91 Healthy Buildings. (2) 村上周三ら (2000), 揮発性有機化合物の放散・吸脱着等のモデリンとその数値予測に関する研究(その 21) CFD による FLEC 内の流れ場・拡散場解析: 日本建築学会年次大会. (3) 安部ら (1992), はく離・再付着を伴う乱流場への適用を考慮した k-ε モデル, 日本機化学論文集(B 編). (4) Xudong, Y. et al (1998) Prediction of Short-Term and Long-Term VOC Emissions from SBR Bitumen-Backed Carpet Under Different Temperatures, ASHRAE. (5) 朱清宇ら (1999), 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 15), 日本空気調和・衛生工学会学術講演梗概集. (6) 化学工学協会編: 化学工学便覧. 改訂三版 (1968 年). (7) 伊藤ら (1999), 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 14), 日本空気調和・衛生工学会学術講演梗概集. (8) 加藤ら (2000): 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 17), カップ法による各種ペイント、壁紙材中の有効拡散係数の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集。

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。