

小型チャンバー-FLEC 内の流れ場・拡散場の 3 次元 CFD 解析

正会員 ○ 朱 清宇*1

同 村上 周三*2 同 加藤 信介*3

同 田辺 新一*4 同 伊藤 一秀*5

CFD VOCs 放散速度

1 序 既報^{文1)}で小型チャンバー-FLEC^{文2)}内の建材からの放散・放散性状を 2 次元 CFD 解析に基づき報告した。本報では、引き続き 3 次元 CFD 解析について報告する。

2 FLEC キャビティの構成 (図 1) 図 1 に FLEC の外形と断面を示す。FLEC キャビティ(釣鐘)と底部の試料建材でチャンバーが構成される。清浄空気は 1 対のパイプを経由して FLEC キャビティの外周部チャンネルに供給され、幅 1mm のスリットより中心に向かって吹出され、キャビティ中央に収束し、上部より排出される。パイプから供給される空気は FLEC 外周部チャンネルに必ずしも均等に分配されず、チャンパー内の気流に偏りが生ずることが実験により報告されている^{文3)}。スリット幅が 1mm と狭いため、実験による風速測定には問題点も多く、これらの点も含めて今回流れ場・拡散場の性状を詳細に解析する。

3 流れ場解析と解析条件 (図 1,表 1) FLEC キャビティの対称性を考慮して 4 分の 1 の領域のみを解析対象とする。流れ場は 3 次元 CFD 層流解析。換気回数 686 回/h と 343 回/h の 2 ケースを行う。CFD 解析条件は注 1) を参照。

4 拡散場解析と試料建材のモデル化(図 1,表 1,2) 流れ場解析後、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。建材は、蒸散支配型と内部拡散支配型の 2 種類。FLEC 流入空気の濃度はゼロとする。**4.1 蒸散支配型建材モデル:** 蒸散支配型建材の場合、境界条件として建材表面での気相濃度を与えることが求められ、その正確なモデル化として建材面に純液面を仮定。ここでは純水(Water)と純液 Decane、p-xylene、nonane の 4 ケースを解析(表 1,2)。表面気相濃度などの条件は、別報^{文4)}の筆者らの開発した境界層型チャンパーでの解析条件参照。**4.2 内部拡散支配型建材モデル:** ここでは合成ゴム(SBR)^{文1)}からの VOCs 放散を扱う。SBR の厚さは 2mm と仮定する。VOCs 初期濃度 C_0 と SBR 内部の有効拡散係数 D_c は表 2 に示す。初期状態において建材内部での VOCs 分布は考慮せず、一様と仮定。SBR 内部は解析メッシュ(300(x)×200(y)×300(z))を設け、建材内と FLEC の全領域を連成して非定常の拡散解析を行う。

5 流れ場の解析結果 (図 2) case1 の場合、キャビティ外周スリットにおいて供給パイプに接する 0° (図 1(2)参照)の場合、風速は 28cm/s と最も早く、パイプから最も遠い 90° の場合、0.2cm/s と極端に小さくなり、キャビティへの吹出風速は均等ではない(図 2-2)。スリット下流の建材設置面近傍でも、風速は 0° →90° の順で遅くなる不均一な分布を示す。またキャビティ中心から半径約 2.5cm 内において風速は急激に小さくなる。これらの傾向は、定量的には実験における風速測定などに問題点があり対応していないが、定性的には実験^{文3)}と良く対応する。FLEC スリット吹出風速とスリット幅により定義した Reynolds 数は case1 で 18、case2,3 で 9 以下、キャビティ内はほぼ完全な層流である。

6 濃度場の解析結果 (図 3,表 3) **6.1 蒸散支配型建材:** case 1, 2 とともに、純水、decane、p-xylene、nonane のいずれの場

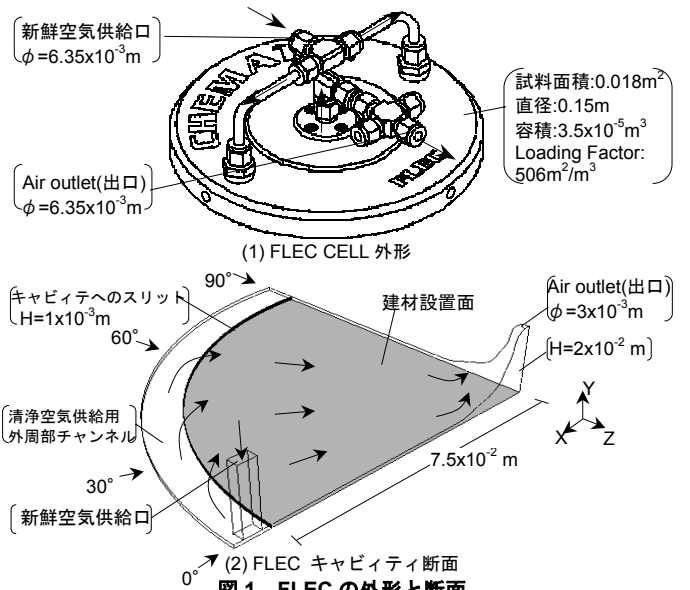


図 1 FLEC の外形と断面

表 1 解析ケースと建材モデル

	換気回数 [回/h]	換気量 [m³/h]	建材モデル	雰囲気温度 [°C]	乱流モデル
case1	686	2.4 × 10 ⁻²	蒸散支配型 {Water, Decane p-xylene, nonane 拡散支配型 (SBR:TVOC)}	23.0	層流
case2	343	1.2 × 10 ⁻²			
case3					

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

	温度 [°C]	C ₀ [g/m³]	C ₀ ' [g/m³]	D _a [m²/s]	D _c [m²/s]
Water	23.0	19.9	192	2.27 × 10 ⁻⁵	1.1 × 10 ⁻¹⁴
Decane		10.0		4.75 × 10 ⁻⁶	
p-xylene		0.05		6.63 × 10 ⁻⁶	
nonane		0.03		5.07 × 10 ⁻⁶	
TVOC				5.94 × 10 ⁻⁶	

合も出口濃度と建材モデル表面気相濃度は等しい(表 3)。純水の試料面平均放散速度^{注 2)} (FLEC キャビティ内の放散面における平均放散フラックス、case1)は 27.06 [g/m²h]^{注 2)}、decane の平均放散速度(case1)は 13.59 [g/m²h]である。換気量が case1 の 2 分の 1 となる case2 の場合、純水、decane の出口濃度は変わらず、平均放散速度は換気量に比例して case1 の 2 分の 1 となる。この種の化学物質放散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な前提となるが、FLEC の場合蒸散支配型建材では試料面積が換気量に対し相対的に過大で、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、蒸散支配型建材すべてについて、表面気相濃度の大小にかかわらずあてはまる。キャビティ内濃度が入口からほんの数 cm 位の距離で試料表面濃度と等しくなるのに対応し、その局所的な放散速度は入口近傍では極めて大きな値を示すが(図 3-2)、すぐ減少し殆どゼロとなる。これに対し換気量に対して試料表面積を相対的に小さくした^{注 5)}境界層 チャンパーの場合、出口濃度は飽和気相濃度よりやや

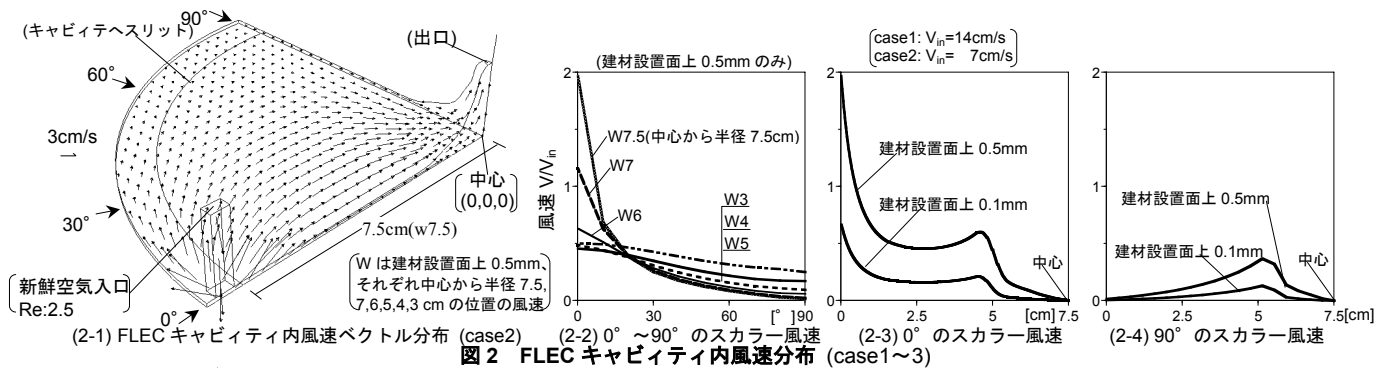


図2 FLECキャビティ内風速分布 (case1~3)

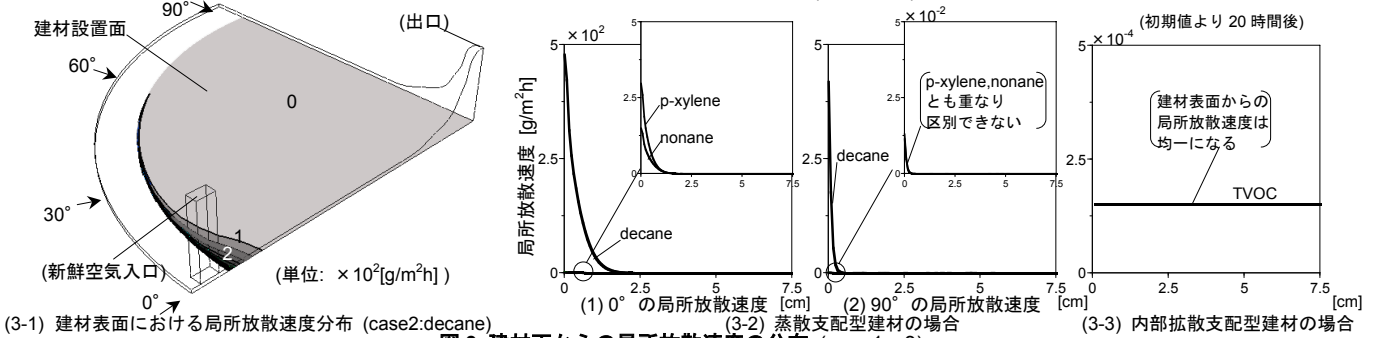


図3 建材面からの局所放散速度の分布 (case1~3)

低く(表3)^{文4)}、試料建材表面境界層の拡散速度が平均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。6.2 拡散支配型建材: 解析開始(初期値)より20時間後の結果を示す。建材面からのVOCsの局所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(図3-3)、23℃の場合に $1.52 \times 10^{-4} [g/m^2h]$ とほぼ一定となる。建材表面平均濃度は、 $1.53 \times 10^{-4} [g/m^3]$ と出口濃度 $2.24 \times 10^{-4} [g/m^3]$ より小さい(表3)。

7 建材面平均物質伝達率 7.1 蒸散支配型建材 2次元解析での結果^{文1)}と同様に、建材表面から気中への物質伝達は入口のごく近くに限られた領域のみで行われている(図3)。参照濃度を出口濃度^{注4)}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、平均物質伝達率①は無限度に近い値になる。参照濃度をFLEC入口の濃度とすると、表3に示すように、純水、decaneの平均物質伝達率②はほぼ一致する(case1で $1.35 [g/m^2h/(g/m^3)]$)。3次元解析結果は2次元結果とほぼ一致し、放散速度算出に対するチャンパー内気流の偏りの影響は小さい(表3)。7.2 内部拡散支配型建材: 合成ゴム(SBR, 2mm)の平均物質伝達率①は、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、平均物質伝達率は見掛け上負値(23℃の場合、 $-1.46 [g/m^2h/(g/m^3)]$)となる。3次元解析結果は2次元結果とほぼ一致し、チャンパー内気流の偏りの影響は放散速度計測には現れない。

8 結論 (1) 流れ場の3次元解析により、キャビティ内の気流分布性状の偏りが観察される。FLECキャビティ内の流れ場は層流。(2) 蒸散支配型建材モデルの場合、試料面積が換気量に比べ相対的に大きいと、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恐れが大きい。(3) 内部拡散支配型建材

表3 物質の放散速度、物質伝達率の予測結果 (雰囲気温度:23℃、()内の値は2D解析結果)

チャンパタイプ	Water		蒸散支配型			p-xylene		nonane		拡散支配型 (TOVC)
	FLEC (case1) (3D)	FLEC (case2) (3D)	境界層型 チャンパー注5)	FLEC (case1) (3D)	FLEC (case2) (3D)	境界層型 チャンパー注5)	FLEC (case2) (3D)	FLEC (case2) (3D)	FLEC (case3, 20h) (3D)	FLEC (case3, 20h) (3D)
平均放散速度 $[g/m^2h]$	27.06 (26.95)	13.54 (13.51)	29.9	13.59 (13.51)	6.79 (6.74)	46.4	0.03 (0.03)	0.02 (0.02)	1.52×10^{-4} (1.52×10^{-4})	1.52×10^{-4} (1.52×10^{-4})
建材表面濃度 $[g/m^3]$	19.90			10.00			0.05	0.03	1.53×10^{-4} (1.53×10^{-4})	1.53×10^{-4} (1.53×10^{-4})
出口濃度 $[g/m^3]$	19.89		18.0	9.99		0.60	0.05	0.03	2.24×10^{-4} (2.25×10^{-4})	2.24×10^{-4} (2.25×10^{-4})
飽和気相濃 $[g/m^3]$	19.90			10.00			0.05	0.03		
平均物質伝達率 ^{注4)} $[g/m^2h/(g/m^3)]$	①	∞	∞	15.7	∞	∞	4.90	∞	∞	-1.46 (-1.46)
	②	1.36 (1.35)	0.68 (0.68)	1.50	1.36 (1.35)	0.68 (0.67)	4.64	0.60 (0.60)	0.67 (0.67)	1.25 (1.25)

の場合、FLECキャビティ内の濃度分布と関わりなく、建材表面からの局所的な物質放散速度は建材面で一様となる。SBRのような内部拡散支配型建材に対して、FLECは試験建材面平均放散速度を正しく測定できると考えられる。(4) 建材の平均放散速度及び物質伝達率に対するキャビティ内流れの偏りの影響は小さい。(謝辞はその27にまとめて示す。)

注1) CFDの解析条件(3D)

座標系	直交座標系	メッシュ	260,000
乱流モデル	層流	移流項	QUICK
流入境界条件	$V_{y,in}=14cm/s$ (case1), $V_{x,z,in}=0$ $V_{y,in}=7cm/s$ (case2,3), $V_{x,z,in}=0$		
流出境界条件	質量保存	壁面境界条件	no-slip 条件
対称面	$\partial V/\partial x = 0$ $\partial V/\partial y = 0$ $\partial V/\partial z = 0$		

2) 平均放散速度は、FLECキャビティ内の試験建材の放散面における局所放散速度の平均値である。局所放散速度は、FLECキャビティ内の試験建材の放散面局所における放散速度の値である。3) 対応する気化熱は $17W/m^2$ が必要となる。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支配されるものと考えられる。4) 物質伝達率①、②は、それぞれ参照濃度として出口濃度、入口濃度0を用いたもの。5) 境界層型チャンパーの>Loading Factor $0.06m^2/m^3$ 、単位換気量当りの試料面積は、FLECは $0.75m^2/m^3$ 及び $1.5m^2/m^3$ 、境界層型チャンパーの場合 $0.625m^2/m^3$ 。
参考文献 (1)村上ら(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24)、日本空気調和・衛生工学会学術講演梗概集。(2)P.Wolkoff, et al(1991)、Field and Laboratory Emission Cell: FLEC, IAQ91 Healthy Buildings。(3)E. UHDE, et al(1997)、Characterization of the Field and Laboratory Emission Cell FLEC: Flow Field and Air Velocities, Atmospheric Environment 4) 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14~15)、日本空気調和・衛生工学会学術講演梗概集。

*1 東京大学大学院 院生
*4 早稲田大学理工学部 教授 工博

*2 慶応義塾大学理工学部 教授 工博
*5 東京工芸大学 講師 工博

*3 東京大学生産技術研究所 教授 工博