

## CFD による FLEC 内の流れ場・拡散場解析

正会員○ 村上 周三<sup>\*1</sup> 同 加藤 信介<sup>\*1</sup>  
同 朱 清宇<sup>\*2</sup> 同 田辺 新一<sup>\*3</sup>  
同 伊藤 一秀<sup>\*4</sup>

蒸散支配型放散 CFD VOCs

**1 序** 別報<sup>文1)2)</sup>で化学物質放散速度計測用の小型チャンパーについて報告した。本報では、FLEC(Field and Laboratory Emission Cell)<sup>文3)</sup>について CFD によりキャビティ内の流れ場、拡散場を解析し、その放散速度測定の特徴を検討する。

**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<sup>文3)</sup>の外形と断面を示す。清浄空気が FLEC キャビティ外周部の幅 1mm のスリットより吹出され、建材表面に沿ってキャビティ中央に収束する。測定時、通常、表 1 に示される大きな換気回数が用いられるため、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には不向きと言われている。今回、その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) 換気量  $2.4 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{h}$  と  $1.2 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{h}$  の 2 ケース。CFD 解析条件は注 1)。解析は、Low-Re  $k-\varepsilon$  モデル(Abe-Nagano model)<sup>文4)</sup>と層流の 2 ケース。

**4 拡散場解析と試料建材のモデル化**(表 1,2,3) 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の解析を行う。建材は、蒸散支配型と内部拡散支配型の 2 種類。それぞれ既知の気相濃度、放散フラックスを境界条件として与える。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** 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速度測定を意図したものではないが、ここでは純水(Water)と純液 Decane の 2 ケースを解析(表 1,2)。その理由は蒸散支配型建材の場合、境界条件として建材表面で気相濃度を与えることが求められ、これを正確にモデル化したいからである。表面気相濃度などの条件は、別報<sup>文1)</sup>の Small Test Chamber での解析条件に合わせた。**4.2 内部拡散支配型建材モデル**<sup>注2)</sup> 建材面で一様放散速度  $3.6 \times 10^{-3} \text{g}/\text{m}^2\text{h}$  を与え、想定した物質の空気中の物質拡散係数  $D_a$  を水蒸気の拡散係数  $D_a$  と同一として拡散場解析を行う。

**5 流れ場の解析結果**(図 2,3) 層流解析(case3)のキャビティ内の風速分布を図 2 に示す。建材設置面近傍のスカラ風速は  $8 \times 10^{-3} \text{m}/\text{s}$  程度である。FLEC 入口の吹出速度  $V_{in}$ ( $1.4 \times 10^{-2} \text{m}/\text{s}$  (case1,3,5)、 $7.0 \times 10^{-3} \text{m}/\text{s}$ (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 3 に示す。 $k-\varepsilon$  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 3)。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。キャビティ内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の発生余地がなく、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**(表 3,図 4,5,6)  $k-\varepsilon$  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 3 に別報<sup>文1)</sup>で示した Small Test Chamber 結果と共にその結果をまとめる。**6.1 蒸散支配型建材** case3,4 とも、また純水、Decane の両者とも出口濃度は建材モデル表面気相濃度と等しい<sup>注3)</sup>(表 3)。化学物質放散速度測定においては、一般に気

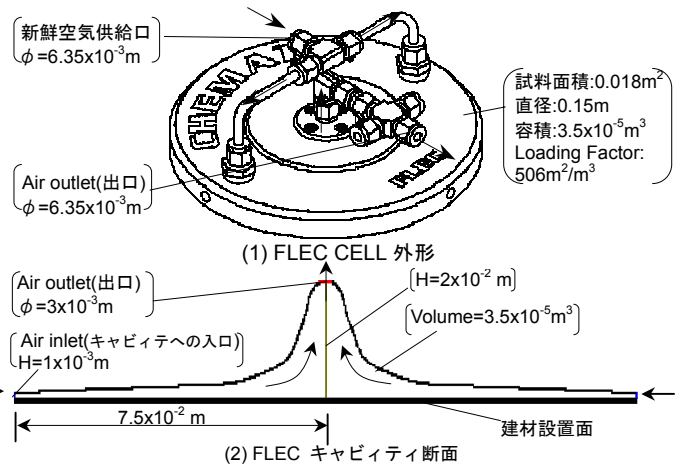


図 1 FLEC の外形と断面

表 1 解析ケースと建材モデル

	換気量 [m <sup>3</sup> /h]	換気回数 [回/h]	建材モデル	乱流モデル
case1	$2.4 \times 10^{-2}$	686	蒸散支配型 (Water、Decane)	Low-Re <sup>文4)</sup>
case2	$1.2 \times 10^{-2}$	343		層流
case3	$2.4 \times 10^{-2}$	686		
case4	$1.2 \times 10^{-2}$	343	拡散支配型 <sup>注2)</sup>	層流
case5	$2.4 \times 10^{-2}$	686		層流

表 2 液面における物質の飽和気相濃度  $C_0$  と空気中の物質拡散係数  $D_a$ <sup>文5,6)</sup>

	温度(°C)	$C_0$ (g/m <sup>3</sup> )	$D_a$ (m <sup>2</sup> /s)
Water	21.8	19.9	$2.27 \times 10^{-5}$
Decane	22.7	10.0	$4.75 \times 10^{-6}$

中濃度が建材表面濃度より低いことが前提とされるが、FLEC での蒸散支配型建材測定ではこれは成立しない。気中での拡散係数  $Da$  は物質によってそれほど大きく変わらないので、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よらずに定まる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ものと考えられる。図 4 にキャビティ内の濃度分布を示す。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 に示すように建材からの放散速度は入口付近で極端に大きいが、ほんの数 cm 位の距離ですぐゼロ近くに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。純水と Decane の放散速度は換気量に比例しており、換気量が case3 の 2 分の 1 となる case4 の場合、対応して放散量も 2 分の 1 となる。**6.2 拡散支配型建材** 建材表面で均一に  $3.6 \times 10^{-3} \text{g}/\text{m}^2\text{h}$  の放散速度を与える case5 の場合、平均表面濃度は  $1.26 \times 10^{-3} \text{g}/\text{m}^3$  となり、鉛直方向、水平方向に濃度分布が形成されている(図 6)。

**7 物質伝達率** **7.1 蒸散支配型建材モデル** 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近くの極めて限られた領域のみで生じており(図 5)、建材表面平均の物質伝

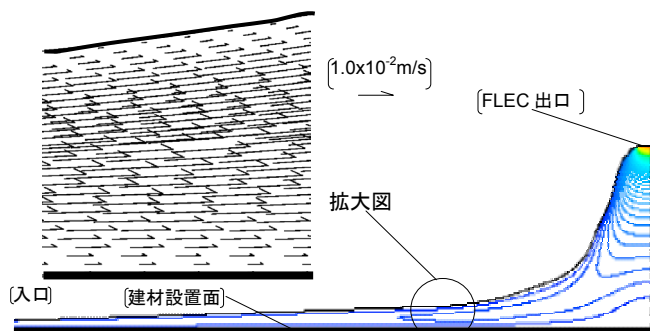


図2 FLEC キャビティ内の流速分布(case3)

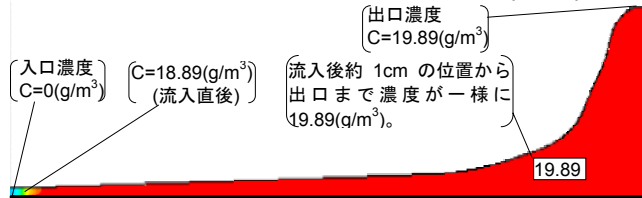


図4 FLEC キャビティ内濃度分布(g/m<sup>3</sup>)  
(蒸散支配建材の場合: case3)

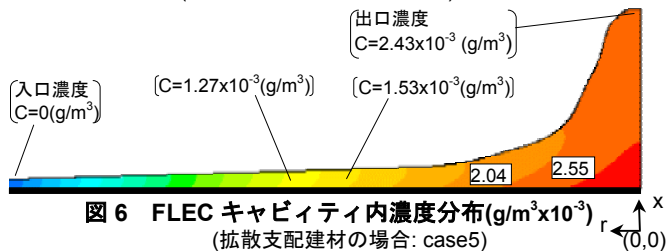


図6 FLEC キャビティ内濃度分布(g/m<sup>3</sup>x10<sup>3</sup>)  
(拡散支配建材の場合: case5)

達率の算出に物理的意味はあまりない。強い FLEC 入口濃度を参照濃度として建材表面での物質伝達率を求めると表 3 に示すように、純水、純 Decane の伝達率はほぼ一致する (case3 で 1.35(g/m<sup>2</sup>h(g/m<sup>3</sup>)))。出口濃度を参照濃度とすると出口濃度が建材表面濃度に一致す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 拡散支配型建材モデル平均伝達率は、FLEC 入口濃度を参照濃度とすると case5 で 2.86 (g/m<sup>2</sup>h(g/m<sup>3</sup>))となる。放散速度が換気回数の影響をあまり受けない拡散支配型建材では、換気回数に反比例して建材表面濃度が低下するため伝達率は換気回数に比例して増加する。FLEC 出口を参照濃度とすると、これが建材表面平均濃度より高いため、伝達率は見掛け上負値(-3.05(g/m<sup>2</sup>h(g/m<sup>3</sup>)))になる。

7.3 問題点 蒸散支配、拡散支配いずれのケースもキャビティの容積が小さく、FLEC 内には入口から出口にわたって大きな濃度分布が存在するため、通常行われている方法で物質伝達率を定義することは困難である。

8 考察 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(=L<sup>2</sup>/ν)を L と ν (空気の動粘性係数)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。FLEC において蒸散支配の傾向が強い建材を測定する場合、キャビティ内の気中濃度が入口から短い距離で建材表面濃度と同じになり、以後の放散が抑制されて放散速度が建材面で極端な不均一となる可能性に関し、注意が必要である(図 5 参照)。

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

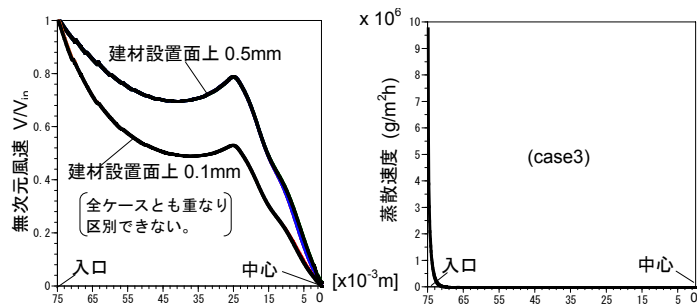


図3 FLEC キャビティ内

図5 水面からの放散速度の分布

建材設置面近傍のスカラー流速分布

表3 物質の放散速度、物質伝達率の予測結果

対象建材モデル	蒸散支配型						拡散支配型
	(Water)			(Decane)			
測定方法	FLEC (case3)	FLEC (case4)	Small Test chamber	FLEC (case3)	FLEC (case4)	Small Test chamber	FLEC (case5)
放散速度 (g/m <sup>2</sup> h)	26.95	13.51	29.9	13.55	6.74	46.4	3.60x10 <sup>-3</sup>
建材表面濃度 (g/m <sup>3</sup> )	19.90			10.00			1.26x10 <sup>-3</sup>
出口濃度(g/m <sup>3</sup> )	19.89	18.0	9.99	0.6	2.44x10 <sup>-3</sup>		
物質伝達率 (g/m <sup>2</sup> h(g/m <sup>3</sup> ))	注 4) 1.35	0.68	1.50	1.36	0.67	4.64	2.86
	注 5) ∞	∞	15.7	∞	∞	4.9	-3.05

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、建材表面の物質伝達率は、換気回数 686 回/h で 2.9 (g/m<sup>2</sup>h(g/m<sup>3</sup>))程度で、伝達率は換気回数に比例。

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。

注 1) 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) <sup>x4)</sup> 、層流		
移流項	QUICK		
流入境界条件	Low-Re	V <sub>r,in</sub> =1.4x10 <sup>-2</sup> m/s(case1,3)V <sub>x,in</sub> =0 V <sub>r,in</sub> =7.0x10 <sup>-3</sup> m/s(case2,4)V <sub>x,in</sub> =0 k <sub>in</sub> =3/2·(U <sub>0</sub> ×0.05) <sup>2</sup> ε <sub>in</sub> =C <sub>μ</sub> ·k <sub>in</sub> <sup>3/2</sup> /L <sub>in</sub> L <sub>in</sub> =1/7 L <sub>0</sub> =1.43×10 <sup>-4</sup> m	
	層流	V <sub>r,in</sub> =1.4x10 <sup>-2</sup> m/s(case1,3)V <sub>x,in</sub> =0 V <sub>r,in</sub> =7.0x10 <sup>-3</sup> m/s(case2,4)V <sub>x,in</sub> =0	
流出境界条件	質量保存 k <sub>out</sub> 、ε <sub>out</sub> =free slip		
壁面境界条件	no-slip 条件 対称面 ∂V <sub>r</sub> /∂r = 0		

2)内部拡散支配型建材モデルとしてある物質を想定し、その物質放散速度一定を仮定し、またその物質の空気中の物質拡散係数 D<sub>a</sub>を水蒸気拡散係数 D<sub>a</sub>と同一としている。3) case3 においては純水の放散速度(放散フラックス)26.95(g/m<sup>2</sup>h)に対応する気化熱は 17W/m<sup>2</sup>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)物質伝達率は入口の濃度 0 を参照濃度として算出。5) 物質伝達率は出口濃度を参照濃度として算出。6)本解析は商用コード Fluent5.0(Fluent Inc. ®)を用いている。

参考文献 (1)伊藤,村上,加藤ら (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。(2)田辺ら(1999),小型チャンバーを用いた壁紙用接着剤からのアルデヒド類放散速度の測定,日本建築学会大会学術講演梗概集,P721,中国。(3)P.Wolkoff, P.A.Clausen, A.Nielsen, Gustafsson,(1991)Field and Laboratory Emission Cell: FLEC, IAQ91 Healthy Buildings。(4)安部,長野,近藤,(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,日本機化学会論文集(B 編)(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)。

\*1 東京大学生産技術研究所 教授 工博

\*2 東京大学院院生

\*3 早稲田大学理工学部建築学科 助教授 工博

\*4 東京工芸大学 助手 工博