

Small Test Chamber に設置した建材表面の物質伝達率に関する CFD 解析

正会員 ○加藤信介 (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 村上周三 (東大生産技術研究所)
正会員 伊藤一秀 (東京工芸大学)

1. 序

本研究は、ペイント等室内の建材から発生する揮発性有機化合物（以降 VOCs 等）の発生量を予測する研究の一貫として行われたものである^{文1)、2)}。蒸散支配型建材からの VOCs 放散速度の計測は、テスト時の建材表面での物質伝達率のバラツキを避けるため、建材表面の風速を一定に保つ工夫のなされた Test Chamber が使用される。本研究では、この目的のために開発された Small Test Chamber^{文1)}におけるテスト建材表面の物質伝達率を低 Re 型 k-ε モデル^{文3)}に基づく CFD 解析と対応する実験により詳細に検討した結果を示す。本研究では蒸散支配型 VOCs 建材のモデルとして 5 物質: benzaldehyde、decane、ethylbenzene、toluene 及び methyl ethyl ketone の液面からの蒸散性状を解析対象とした。

2. 解析対象 Test Chamber(図 1,2,3)

建材表面の流速を任意に制御できる Small Test Chamber 内の建材からの蒸散性状を対象とする(図 1,2)^{文1)}。Small Test Chamber は建材テストピース表面上を定められた風速で気流が流れる Inner Chamber(図 2 上部)と換気のための supply opening, exhaust opening を持ち、この Inner Chamber を格納する Outer Chamber(図 2 下部)より構成される。詳細は文 1 参照。

3. 流れ場・拡散場の CFD 解析概要(表 1,2,3, 図 3)

3.1 流れ場解析 Outer Chamber 内全体の換気回数を 5 回/h と固定して、表 1 に示すように Inner Chamber 測定胴内の平均風速を 0.01、0.10、0.35、1.20、2.00m/s の 5 ケースに関して解析(表 1)。流れ場解析は低 Re 型 k-ε モデル (Abe-Nagano model)^{文3)} に基づく 3 次元解析^{注1)}。対応する実験データによりその精度を検証。建材表面の第 1 メッシュの壁座標 z^+ は Case1:0.01、Case2:0.03、Case3:0.12、Case4: 0.33、Case5:0.65 とした。Y 方向の空間の対称性により、半分の領域のみを計算する。表 2 に流れ場の計算条件を示す。図 3 に解析メッシュを示す。

3.2 拡散場解析 蒸散支配型放散建材モデルとし



図 1 Small Test Chamber

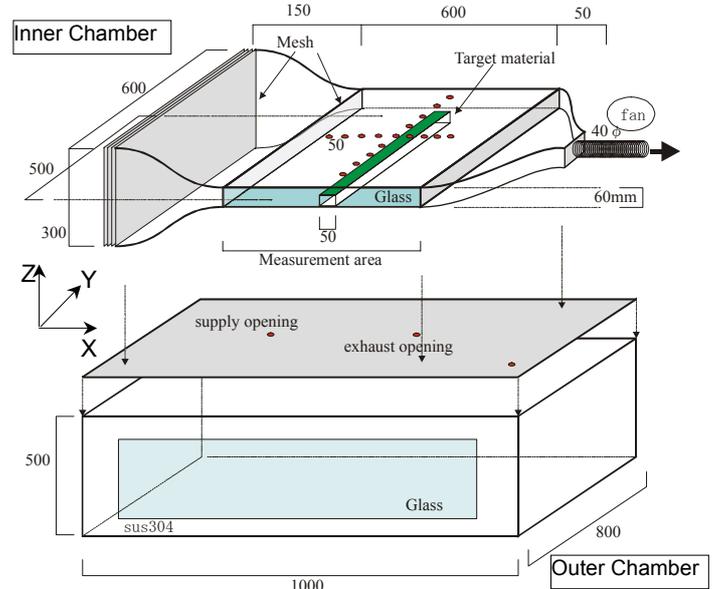


図 2 Small Test Chamber 測定システム

(Inner Chamber は Outer Chamber 内に格納される。)

表 1 解析ケース

	Inner Chamber 平均風速 (m/s)	レイノルズ $Re=(U_0L_0)/\nu$	温度 (°C)	建材モデル
Case1	0.01	20	23 30 40	蒸散支配型 benzaldehyde decane ethylbenzene toluene methylethylketone
Case2	0.10	200		
Case3	0.35	700		
Case4	1.20	2400		
Case5	2.00	4000		

て、5 物質 benzaldehyde(C_7H_6O)、 decane($C_{10}H_{22}$)、 ethylbenzene(C_8H_{10})、 toluene(C_7H_8) 及び methyl ethyl ketone(C_4H_8O)の液面からの蒸散(物質伝達率)を検討(表 1)^{注2)}。潜熱は考慮せず等温を仮定。流れ場の CFD 解析の後に、Inner Chamber 内の建

材設置位置(図2上部の Target material) に表面気相濃度(飽和気相濃度、表3)を与え^{文4)}、拡散場解析を行う。Chamber の換気用流入空気の濃度を0として定常濃度を求める。

4. 流れ場の解析結果 (図4, 5)

風速は Inner Chamber 測定胴中心位置(図4(3))の Case2 における平均風速 $U_{center}=0.1m/s$ を用いて無次元化して示す。Case2 に関しては実験結果も合わせて示す。図4(1)に示される様に、Inner Chamber 中では下流になるにつれて壁面に沿って境界層の発達により胴内中心風速が上昇する。Case2 における実験との対応に示されるように CFD 解析結果は実験結果と十分な精度で一致(図4(1),(2))。床付近で実験結果にバラツキが存在するのは、計測に用いたサーミスタ風速計のブロッキング効果などによる測定誤差のためと考えられる(図4(2))。

図5に Inner Chamber 中心位置横断面方向(Line Z)における乱流拡散係数 ν_t の分布を示す。 ν_t は U_{center} 及び代表長さ(Inner Chamber 測定胴高さの半幅) L_0 で無次元化。また比較のため、分子拡散係数 ν の値も併せて示す。Case2 より大きな風速では ν_t は ν より大きく、Inner Chamber 中心位置で最も大きい凸型の分布となる。Case1 では ν_t は ν より小さいが、Case2 では約10倍程度、Case3~Case5 ではそれぞれ80倍~1600倍大きい値となる。

5.濃度場の CFD 解析結果と物質伝達率の解析結果(表4,5, 図6)

表4に Small Test Chamber における建材表面からの物質放散速度、物質伝達率の解析結果を示す。物質伝達率は、気中拡散係数 D_a 、測定胴高さ半幅 L_0 で無次元化したシャーウッド数として示す。また図6に測定胴内中心風速に対応する放散速度、物質伝達率、シャーウッド数を示す。各物質のシュミット数が異なるため^{注2)}、拡散場は必ずしも各物質、各温度で相似とはならない。

5.1 実験との対応 対応する実測結果のある Case2 の場合、CFD 解析による decane の放散速度 q は $50(g/m^2h)$ 、Small Test Chamber の exhaust opening での decane 濃度 C_e は $0.62(g/m^3)$ であり、実測での $46(g/m^2h)$ 、 $0.60(g/m^3)$ とそれぞれ良く対応する(C_e の結果の表は紙面の関係で省略^{文2)})。また、Small Test Chamber の exhaust opening の濃度 C_e を参照濃度とした場合の decane の物質伝達率は $5.3(g/(m^2h(g/m^3)))$ となり、実測での $4.9(g/m^2h(g/m^3))$ と良く対応。CFD 解析結果は実験

表2 CFD 解析条件

乱流モデル	低 Re 型 k-ε model (Abe-Nagano model)
メッシュ分割	216,600
差分スキーム	移流項: QUICK
流入境界	Outer Chamber supply opening : $U_{in}=14.4m/s$, $l_{in}=1/7 \cdot L_f, k_{out}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.05)^2$, $\epsilon_{in}=C_\mu \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$ (L_f =inlet 直径、7mm)
流出境界	Outer Chamber exhaust opening : U_{out} =(質量保存による) k_{out}, ϵ_{out} =free slip
Inner Chamber 内 fan 位置の条件	速度固定値 U_{fan} を与える。 $U_{fan}=0.27, 2.69, 13.45, 53.78, 80.0(m/s)$ $k_{out}=3/2 \cdot (U_{fan} \times 0.05)^2, \epsilon_{in}=C_\mu \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$ ($l_{in}=1/7 \cdot L_f, L_f$ =fan の半径、20mm)
壁面境界	No-slip
3次元、対象性を考慮し y 方向は 1/2 の領域で解析。流れ場の解析後、Inner Chamber 測定胴内の建材設置位置(図2参照)に表面気相濃度(飽和気相濃度、詳細は表3)を与え、拡散場解析を行う。	

表3 飽和気相濃度 C_0 、空気中における拡散係数 D_a ^{文4)}

化学物質	温度(°C)	C_0 (g/m ³)	D_a (m ² /s)	備考
① benzaldehyde	23	6	7.32×10^{-6}	アルデヒド類の VOCs
	30	10	7.64×10^{-6}	
	40	19	8.11×10^{-6}	
② decane	22.7	10	4.75×10^{-6}	脂肪族炭化水素の VOCs
	30	14	4.81×10^{-6}	
	40	27	5.11×10^{-6}	
③ ethyl benzene	23	49	6.73×10^{-6}	芳香族炭化水素の VOCs
	30	74	7.02×10^{-6}	
	40	127	7.45×10^{-6}	
④ toluene	23	132	7.79×10^{-6}	芳香族炭化水素の VOCs
	30	192	8.04×10^{-6}	
	40	320	8.52×10^{-6}	
⑤ methyl ethyl ketone	23	380	8.40×10^{-6}	ケトン類の VOCs
	30	550	8.77×10^{-6}	
	40	937	9.30×10^{-6}	

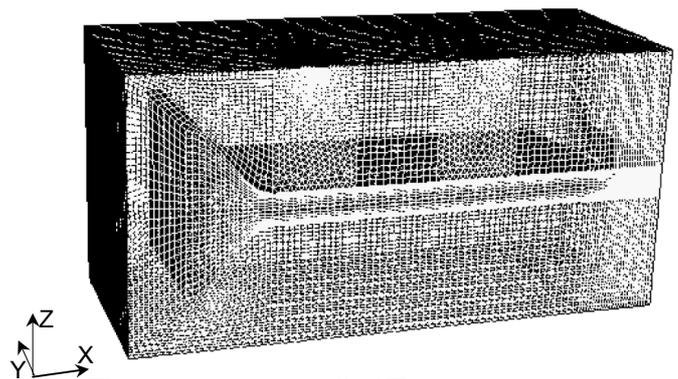
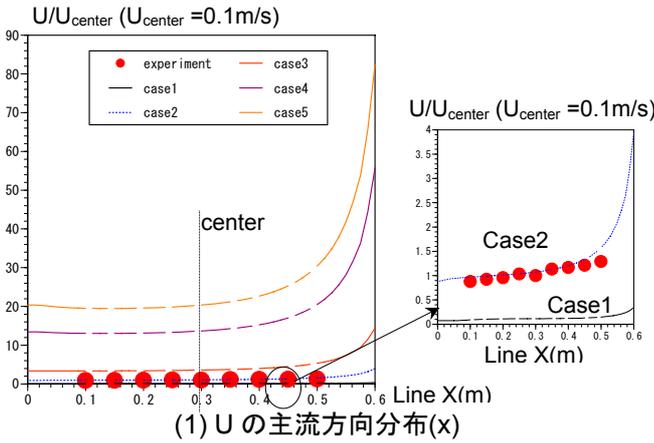


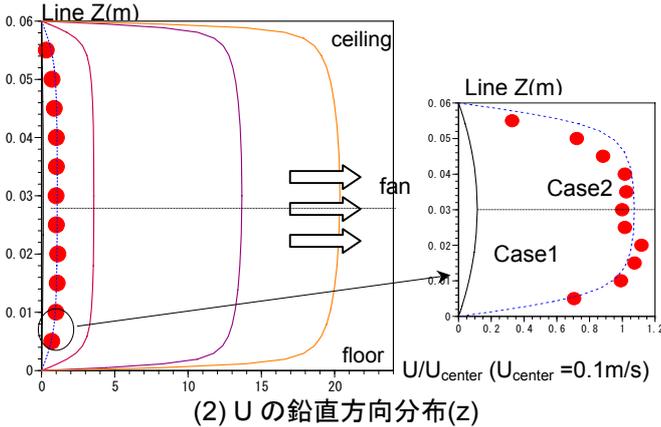
図3 CFD メッシュ分割図(216,600 メッシュ)

結果とほぼ対応しており、CFD 解析は実現象を十分な精度で再現するものと考えられる。

5.2 風速変化の影響 建材表面風速の増加に伴い、物質伝達率は増加する。シャーウッド数は各物質のシュミット数($S_c=\nu/D_a$ ^{注2)})がほぼ等しいため、物質



(1) Uの主流方向分布(x)



(2) Uの鉛直方向分布(z)

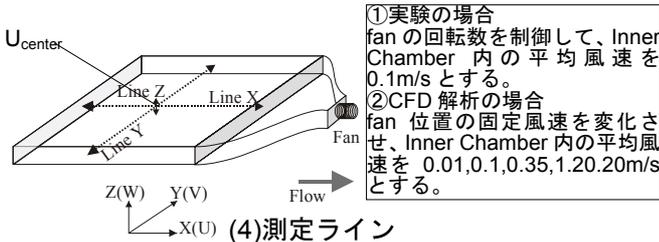


図4 Inner Chamber 測定室内平均風速分布

によらずほぼ一定である。但し、decaneのみはシュミット数が他の物質と多少異なるため、対応してシャーウッド数も多少他の物質の場合と異なっている。シャーウッド数は、Inner Chamber 測定室内平均風速が 0.01(m/s)で約 3、0.1(m/s)で 8、0.35(m/s)で 20、1.2(m/s)で 40、2.0(m/s)で 50 程度の値を示す。物質分散速度および物質伝達率は建材表面の風速増加により明らかに増加する(図 6(1)、図 6(2))。

5.3 温度変化の影響 温度を 23°Cから 40°Cまで上昇させると、物質伝達率はあまり変化しないが、建材表面気相濃度の上昇により分散速度は大きく増加する。decane の分散速度は 23°Cから 40°Cへの上昇で約 2.8 倍増加 (case1: 19→53 (g/m²h)) (表 4)。

5.4 考察 各ケースの流れ場において decane はシュミット数が大きい(気中の拡散係数が小さい)ため、物質伝達率はほかの 4 種類よりやや小さい

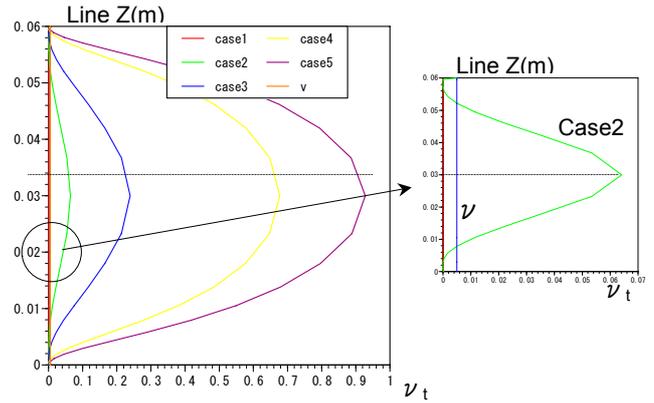


図5 Inner Chamber 内の ν_t 分布(Line Z(m))

(図 6(2))。但し、物質伝達率を無次元化したシャーウッド数は逆に decane のみ多少大きい値を示す。建材表面の風速が速く、Re 数が大きくなると、シャーウッド数 $Sh=(\alpha L_0)/D_a$ は大きくなり、風速 2m/s(Re 数 4000)までの範囲内で Re 数依存性を示した。Small Test Chamber 測定室内の流れ場は必ずしも実物の室内建材近傍の流れ場と対応しないことも含めて実物の室内建材への換算は注意が必要である(表 5、図 6(3))。

6 結論

- (1)CFD による Inner Chamber 内測定室内の風速分布は実験結果と良く一致した。
- (2)CFD による decane の分散速度は実験結果と良く一致した。CFD は物質伝達率を十分な精度で解析する。
- (3)CFD により求められた Small Test Chamber の建材テスト面におけるシャーウッド数は、物質のシュミット数が約 2 の場合、Inner Chamber 内平均風速が 0.01(m/s)で約 3、0.1(m/s)で 8、0.35(m/s)で 20、1.2(m/s)で 40、2.0(m/s)で 50 となり、この範囲で Re 数依存性を示す。
- (4)decane はシュミット数が他の物質と多少異なるため、シャーウッド数も多少異なる。
- (5)温度変化によりシャーウッド数は殆ど変化しないが材料面での気相濃度が大きく上昇するため、その分散速度は大きくなる。

注 1) 本 CFD 解析は Fluent5.0 (Fluent Inc.®) を用いて行った。2) 各物質のシュミット数 $Sc=\nu/D_a$

物質 温度	benzaldehyde	decane	ethyl benzene	toluene	methyl ethyl ketone
23	2.05	3.16	2.23	1.93	1.79
30	1.96	3.12	2.14	1.87	1.71
40	1.85	2.94	2.01	1.76	1.61

ν : 空気の動粘性係数(m²/s), D_a : 空気中における物質拡散係数(m²/s),

表 4 放散速度 q

物質	温度 (°C)	case1 (CFD) $\times 10^2$	case2		case3 (CFD) $\times 10^2$	case4 (CFD) $\times 10^2$	case5 (CFD) $\times 10^3$	
			(CFD) $\times 10^2$	(実験) $\times 10^2$				
物質放散速度 q (g/m ² h)	①benzaldehyde	23	0.15	0.39	0.46	0.89	1.39	0.17
		30	0.26	0.67		1.52	2.37	0.29
		40	0.51	1.32		2.99	4.62	0.56
	②decane	23	0.19	0.50		1.17	1.88	0.23
		30	0.26	0.71		1.65	2.65	0.32
		40	0.53	1.41		3.29	5.27	0.64
	③ethyl benzene	23	1.15	3.03		6.96	10.9	1.32
		30	1.79	4.72		10.8	16.9	2.04
		40	3.20	8.27		19.1	29.7	3.58
④toluene	23	3.42	8.93	20.3	31.5	3.80		
	30	5.09	13.3	30.0	46.5	5.61		
	40	8.81	23.0	51.6	79.6	9.59		
⑤methyl ethyl ketone	23	10.4	27.0	60.9	93.9	11.3		
	30	15.4	40.2	90.1	138	16.7		
	40	27.3	70.9	158	242	29.1		

表 5 物質伝達率(シャード数)

物質	D _a (m ² /s) $\times 10^{-6}$	温度 (°C)	case1 (CFD)	case2		case3 (CFD)	case4 (CFD)	case5 (CFD)
				(CFD)	(実験)			
①benzaldehyde	7.32	23	2.9	8.1	8.6	21	37	50
	7.64	30	2.9	8.0		21	37	48
	8.11	40	2.8	7.8		20	36	48
②decane	4.75	23	3.4	9.3		24	43	56
	4.81	30	3.3	9.3		24	43	56
	5.11	40	3.2	9.1		23	42	55
③ethyl benzene	6.73	23	3.0	8.3		21	38	50
	7.02	30	3.0	8.2		21	38	50
	7.45	40	2.9	7.9		21	37	49
④toluene	7.79	23	2.9	7.9	20	36	48	
	8.04	30	2.8	7.9	20	36	48	
	8.52	40	2.8	7.7	20	35	47	
⑤methyl ethyl ketone	8.40	23	2.8	7.8	20	36	47	
	8.77	30	2.8	7.6	20	35	46	
	9.30	40	2.7	7.5	19	34	45	
Re=(U ₀ L ₀)/ν			20	200	700	2400	4000	

(ここでは、q:放散速度(g/m²h)、α:物質伝達率(g/m²h(g/m³))、α=q/(C₀-C_e)、Sh:シャード数=(αL₀)/D_a、U₀=U_{center}、L₀=測定胴高さ半幅、0.03mm、ν:空気の動粘性係数、1.5x10⁻⁵m²/s、C₀: supply opening の濃度、g/m³、C_e: exhaust opening の濃度、g/m³)

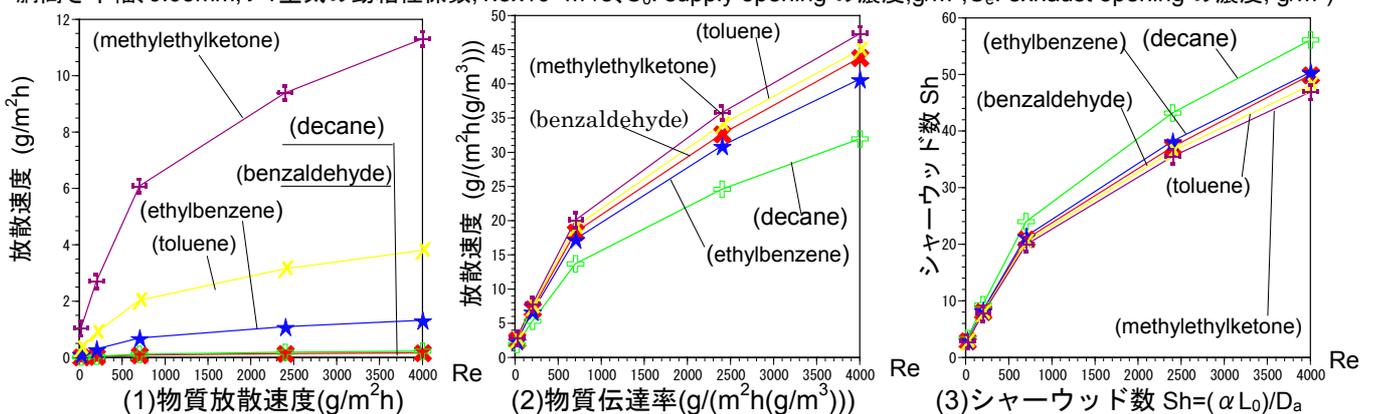


図 6 風速変化による Inner Chamber 内の VOCs の放散速度、物質伝達率とシャード数 Sh の変化(23°C)

参考文献

(1) 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), 空気調和・衛生工学会学術講演梗概集。(2) 神ら: 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 16~21), 日本建築学会梗概集, 2000.9。(3) 阿部, 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), 58 巻, 554 号, pp. 57-64。(4) 化学工学協会編: 化学工学便覧, 改訂三版 (1968 年)。

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次第である。