

境界層型小型 Test Chamber の開発と試験建材表面の化学物質伝達率に関する実験と CFD 解析

DEVELOPMENT OF BOUNDARY LAYER TYPE SMALL TEST CHAMBER AND ANALYSIS OF CONVECTIVE MASS TRANSFER OF VOCS EMISSION FROM TEST BUILDING MATERIALS BY CFD AND EXPERIMENT

朱 清宇* , 加藤信介** , 村上周三*** , 伊藤一秀****

Qingyu ZHU, Shinsuke KATO, Shuzo MURAKAMI, Kazuhide ITO

This study is performed as a part of the research that examines the emission and diffusion characteristics of volatile organic compounds (henceforth VOCs etc.) from indoor building materials, such as the material of external diffusion like wet paint. In order to measure convective mass transfer from test building-materials, the authors develop a new type of Small Test Chamber in which precise control of airflow along the test materials can be done. The mass transfers coefficient for the surface of liquid decane is measured by the experiment. In the CFD simulation, liquid benzaldehyde, decane, ethyl benzene, toluene and methyl ethyl ketone are used for modeling the surface material of external diffusion like wet paint. The concentration of VOCs (saturated vapor phase concentration) is given at the material surface as the boundary condition. The emission rates and mass transfer coefficients from the surface of building materials in a Small Test Chamber are predicted on the basis of a low-Reynolds number k- ϵ model (Abe-Nagano model). CFD results show good agreement with the experimental results.

Keywords: *Small Test Chamber, VOCs, Mass transfer coefficient, CFD, Experiment*

境界層型小型Test Chamber、VOCs、物質伝達率、数値流体力学、実験

1. 序

近年、住宅・オフィス・学校等において化学物質による空気汚染が顕在化している^{1,2)}。本研究は建材・施工材から放散される化学物質の物理的メカニズムを解明し、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。数値シミュレーションによる室内濃度予測を行うためには、室内に設置される各種建材からの化学物質放散速度、物質伝達率等の境界条件を事前に設定する必要があるが、現状ではこういったデータは十分に整備されていない。

建材からの化学物質放散速度に関しては、小型の chamber を用いてデータベースの構築が推進されている³⁾。特に内部拡散支配型の建材に対しては、ASTM および ECA 等の規格に準じた完全混合型 chamber により放散速度の測定が行われている^{4,5)}。しかしチャンパー内の気流性状に関しては規格化されていない。ペイントおよび接着剤等の蒸散支配型建材からの化学物質放散性状は、建材表面における境界層の性状すなわち物質伝達特性に大きく依存する。そのため、測定にあたっては建材表面での物質伝達率のばらつきを避けるため、表面気流を一律に制御するなど、その物質伝達率特性を特定できる chamber を用いて測定を行う必要がある。建材表面気流制御型の Chamber に関しては、J. Zhang⁶⁾ら、F. Haghghat⁷⁾が Small Chamber を開発し、数種

の建材を対象として化学物質放散速度を測定している。筆者らはこれらの Small Chamber を参考に建材表面での境界層の気流性状を精密に制御する境界層型小型 Test Chamber を開発した^{8~11)}。

本報では、この境界層型小型 Test Chamber の概要とこれを用いて行った蒸散支配型建材からの化学物質放散速度、物質伝達率測定に対応する CFD(Computational Fluid Dynamics)解析を行い、その予測精度を確認した結果を示す。更に、各種の蒸散支配型建材を対象として VOCs 放散速度および物質伝達率の解析を行い、建材表面から気中に至る VOCs の輸送メカニズムを検討する。

2. 建材からの化学物質放散モデル

建材からの化学物質放散性状は、内部拡散(材料内拡散)支配型放散と蒸散(表面蒸発)支配型放散に大別することが可能であり、複合建材は、これらの組み合わせにより放散性状が決定されると推定される。本報では、材料表面における物質伝達特性がその揮発性化学物質の放散特性に影響を与える蒸散支配型放散の建材を対象とする。特に本解析では、蒸散支配型建材を単純にモデル化し、単一成分の液体として取り扱う。この場合、液体内の化学物質輸送抵抗はほとんど無視することが可能であり、液体表面から気中に至る物質伝達率により、化学物質の気中への放散速度が決定される。数値解析を行う際には、液体内部を解析対象とせず、境界条件として液体表面位置に飽和気相濃度

* 東京大学大学院

** 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

**** 東京工芸大学 講師・工博

Graduate student, Univ. of Tokyo

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

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

Assistant Prof., Tokyo Institute of Polytechnics, Dr. Eng.

を与えることとなる。なお解析される物質伝達率は気中から建材表面への輸送に対しても有効である。これは建材の気中からの化学物質吸着特性を検討する際に特に重要となる。

3. 実験概要

境界層型小型 Test Chamber を用いた化学物質放散速度および物質伝達率の測定概要を示す。

3-1. 境界層型小型 Test Chamber 筆者らが開発した境界層型小型 Test Chamber を図 1 に示す。境界層型小型 Test Chamber は試験建材(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 1 上部)と、換気のための給気口および排気口を持ち、この inner chamber を格納する outer chamber (図 1 下部)より構成される。境界層型小型 Test Chamber は全て sus304 で構成されている。inner chamber にはファンが設置されており、測定洞内は第 3 種機械換気により換気される。境界層型小型 Test Chamber 内に供給される新鮮空気量と inner chamber 測定洞内の換気回数(建材表面風速)は独立して制御が可能である。inner chamber 内の試験建材設置面積は最大で 500mm×300mm であるが、今回の検討では 500mm×50mm としている。建材上部における平均風速はファンの回転数により 0~0.2m/s の範囲で一定制御が可能である。本報では inner chamber 内の平均風速を 0.10 m/s に制御した実験結果を示す。chamber 内での汚染質発生を防ぐため、モータ部は outer chamber の外側に設置している。境界層型小型 Test Chamber は恒温室内に設置される。

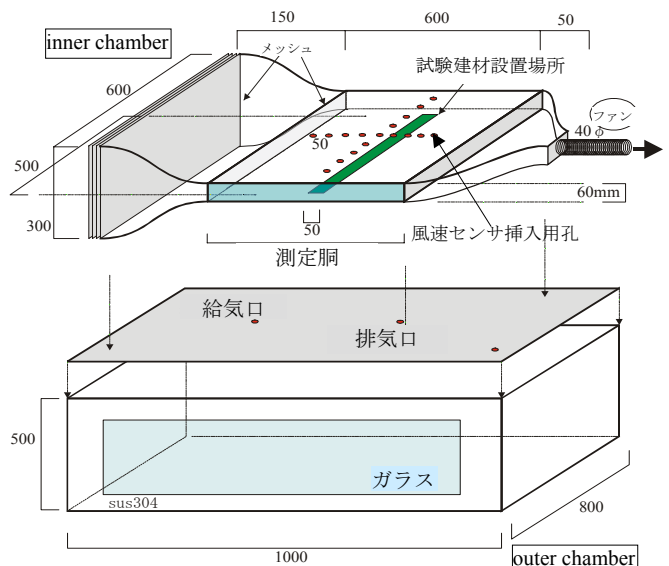
3-2. 風速測定 サーマスタ風速計により inner chamber の測定洞内における平均風速分布を測定する。風速測定位置を図 4 (1) に示す。

3-3. 化学物質サンプリングと分析方法 境界層型小型 Test Chamber を中心とした化学物質サンプリングの一連のフローを図 2 に示す。試験の前に漏気による誤差を確認するため気密性のチェックを行い、その気密性能を確認している^{注1)}。Chamber 内へは N₂: 80%、O₂: 20% の人工空気を換気回数 5.0 回/h で供給する。全ての配管はテフロンチューブを使用している。Chamber 内の空気は Tenax TA により吸着サンプリング(0.033L/min)し、加熱脱着の後、GC/MS により分析を行う。表 1 に GC/MS の分析条件を示す。

4. 数値解析概要

4.1 流れ場解析 実験条件と同様に、outer chamber に対する換気回数は 5.0 回/h と固定して解析を行う。流れ場の解析ケースを表 2 に示す。Inner chamber の測定洞内の平均風速 U_{center} は 0.01 m/s から 2.00 m/s の間で 5 段階に変化させている。流れ場は低 Re 数型 $k-\epsilon$ モデル (Abe-Nagano model)^{文12)} に基づく 3 次元解析を行う。試験建材表面の第 1 メッシュの壁座標 $z^+ (=U^*Z_1/\nu)$ ^{注2)} は、風速が最大の case5 ($U_{center}=2.00$ m/s) の場合で 0.65 である。Y 方向の空間の対称性により、半分の領域のみを解析対象とする。表 3 に計算条件、図 3 に解析メッシュを示す。

4.2 拡散場解析 本解析では、蒸散支配型建材を簡易に単一成分の液体としてモデル化して取り扱う。試験建材モデルの種類として、benzaldehyde (C₇H₆O)、decane (C₁₀H₂₂)、ethylbenzene (C₈H₁₀)、toluene (C₇H₈) 及び methyl ethyl ketone (C₄H₈O) の 5 物質を対象とし、液面からの蒸散(物質伝達率)性状を解析する。本解析では、潜熱は考慮せず等温を仮定して解析を行う。すなわち液面からの蒸散速度の律速に気化熱の供給速度の影響はないものと仮定している。流れ場の CFD 解析の後に、inner chamber 内の試験建材設置位置(図 2 上部の Target material) に表面気相濃度(飽和気相濃度)を与え^{文13)}、拡散場解析を行



(Inner Chamber は Outer Chamber 内に格納される)
図 1 境界層型小型 Test Chamber

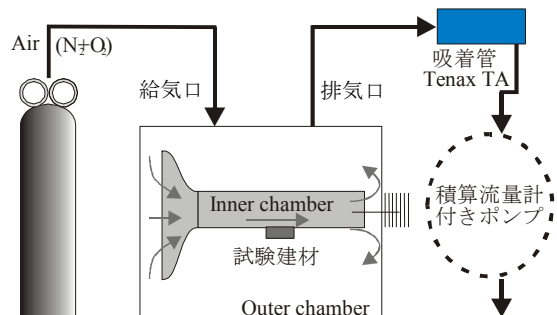


図 2 境界層型小型 Test Chamber を含むサンプリングシステム

表 1 GC/MS の分析条件

GC	HP6890
加熱脱着装置	Gestel TDS (Thermal Desorption System)
加熱脱着温度	20°C(5min) → 60°C/min → 280°C (2min)
CIS 温度	-100°C(0.01min) → 12°C/sec → 300°C (3min)
カラム	HP5 (60m×0.25mm×1μm)
オープン温度	40°C(3min) → 10°C/min → 220°C (10min)
Split 比	300:1
検出器 (MS)	HP5973MSD

表 2 流れ場の解析ケース (数値解析)

	U_{center} (m/s)	Re 数 ($U_0 L_0 / \nu$)	温度 (°C)	換気回数 (回/h)
Case1	0.01	20	23 30 40	5
Case2	0.10	200		
Case3	0.35	700		
Case4	1.20	2400		
Case5	2.00	4000		

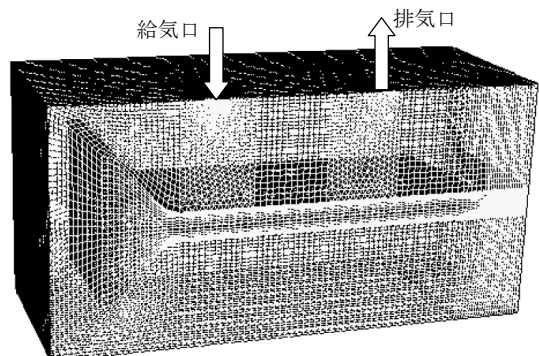


図 3 解析メッシュ

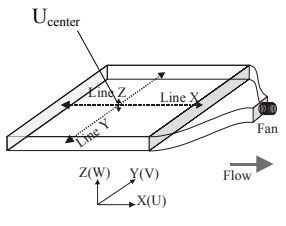
表3 CFD 解析条件

乱流モデル	低 Re 型 k-ε model (Abe-Nagano model) 文 ¹²⁾
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: $U_{in}=14.4\text{m/s}$, $l_{in}=1/7 \cdot L_f$, $k_{out}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.05)^2$, $\epsilon_{in}=C_{\mu} \cdot k_{in}^{3/2} / l_{in}$ (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 内ファン位置の境界条件	Case 毎に速度固定値 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に表面気相濃度(飽和気相濃度)を与え、拡散場解析を行う。	

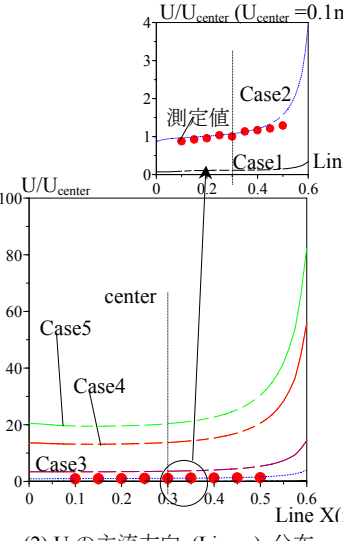
表4 飽和気相濃度 C_0 、空気中における拡散係数 D_a 文¹³⁾

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 VOCs
	30	10	7.64×10^{-6}	
	40	19	8.11×10^{-6}	
② decane	23	10	4.75×10^{-6}	脂肪族炭化水素 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 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 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 VOCs
	30	550	8.77×10^{-6}	
	40	937	9.30×10^{-6}	

①実験の場合 fan の回転数を制御して、Inner Chamber 内の平均風速を 0.1m/s とする。
 ②CFD 解析の場合 fan 位置の固定風速を変化させ、Inner Chamber 内の平均風速を 0.01,0.1,0.35,1.20,2.0m/s とする。



(1) 測定ライン



(2) U の主流方向 (Line x) 分布 (3) U の鉛直方向 (Line z) 分布

図4 inner chamber 内平均風速分布

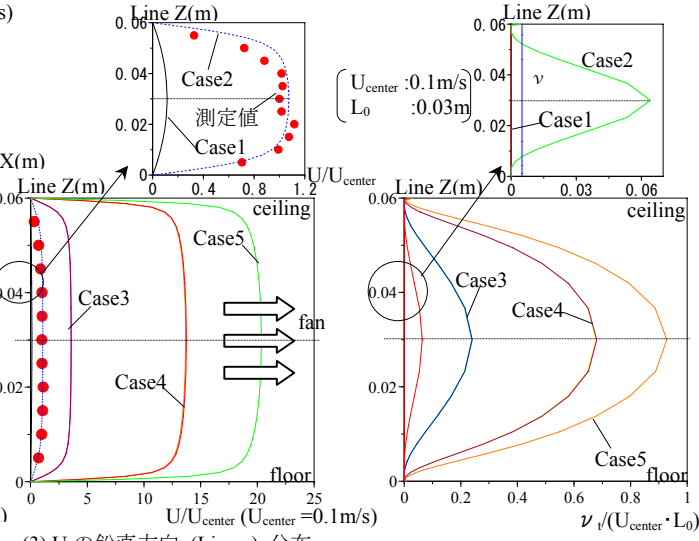


図5 inner chamber 内 ν_i 分布(Line z)

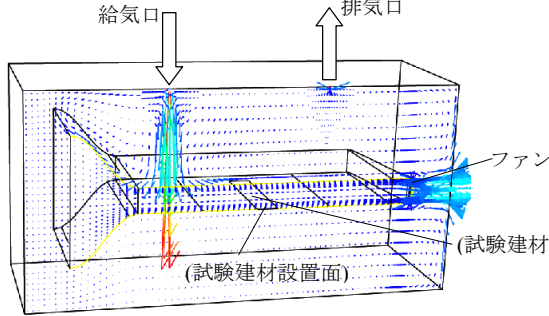


図6 境界層型小型 Test Chamber 内平均風速分布(Case2)

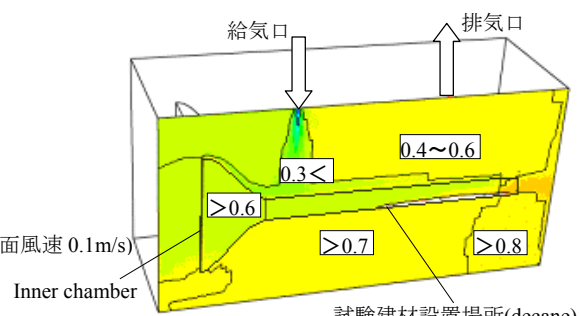


図7 境界層型小型 Test Chamber 内濃度分布 (case2, decane(23°C) 単位: [g/m³])

う。表4に飽和気相濃度 C_0 、空気中における拡散係数 D_a の一覧を示す。outer chamber の換気用流入空気の濃度は 0 とし定常濃度を算出する。

5. 流れ場の解析結果

風速は inner chamber 測定胴中心位置(図1)の Case2 における平均風速 $U_{center}=0.1$ m/s を代表風速として無次元化して示す。実験結果は計算ケースの Case2 に対応している。

図4(2)に示すように、inner chamber 内ではファンが設置された下流に向かうにつれて、境界層の発達により inner chamber 測定胴内中心風

速が上昇する。数値解析による Case2 ($U_{center}=0.1$ m/s) と実験結果を比較すると、流れ場は十分な精度で一致している(図4(2), (3))。床面付近で実験による風速測定結果にバラツキが存在するのは、測定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5に inner chamber 測定胴中心位置横断面方向(Line Z)における乱流拡散係数 ν_i の分布を示す。 ν_i は Case2 における $U_{center}(=0.1$ m/s) 及び代表長さ(inner chamber 測定胴高さの半幅 $L_0=0.03$ m) で無次元化している。また比較のため、分子拡散係数 ν (温度 23°C) の値も併せて示す。

表5 CFDによる建材表面平均放散速度 q ($\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) 解析結果

物質	温度($^{\circ}\text{C}$)	Sc (ν/D_a)	Case1 (q) $\times 10^2$	Case2 (q) $\times 10^2$		Case3 (q) $\times 10^2$	Case4 (q) $\times 10^2$	Case5 (q) $\times 10^2$
				(CFD)	(実験)			
①benzaldehyde	23	2.05	0.15	0.39	0.46	0.89	1.39	1.68
	30	2.09	0.26	0.67		1.52	2.37	2.85
	40	2.10	0.51	1.32		2.99	4.62	5.56
②decane	23	3.16	0.19	0.50		1.17	1.88	2.28
	30	3.33	0.26	0.71		1.65	2.65	3.21
	40	3.33	0.53	1.41		3.29	5.27	6.39
③ethyl benzene	23	2.23	1.15	3.03		6.96	10.9	13.2
	30	2.28	1.79	4.72		10.8	16.9	20.4
	40	2.28	3.20	8.27		19.1	29.7	35.8
④toluene	23	1.93	3.42	8.93	20.3	31.5	38.0	
	30	1.99	5.09	13.3	30.0	46.5	56.1	
	40	2.00	8.81	23.0	51.6	79.6	95.9	
⑤methyl ethyl ketone	23	1.79	10.4	27.0	60.9	93.9	113	
	30	1.82	15.4	40.2	90.1	138	167	
	40	1.83	27.3	70.9	158	242	291	

表6 CFDによる建材表面平均物質伝達率(シャールウッド数 $Sh=(\alpha L_0)/(D_a \times 3600)$)^{注4)} 解析結果

物質	D_a ($\text{m}^2/\text{s}) \times 10^{-6}$	温度($^{\circ}\text{C}$)	Sc (ν/D_a)	Case1 (Sh)	Case2 (Sh)		Case3 (Sh)	Case4 (Sh)	Case5 (Sh)
					(CFD)	(実験)			
①benzaldehyde	7.32	23	2.05	2.9	8.1	8.6	21	37	50
	7.64	30	2.09	2.9	8.0		21	37	48
	8.11	40	2.10	2.8	7.8		20	36	48
②decane	4.75	23	3.16	3.4	9.3		24	43	56
	4.81	30	3.33	3.3	9.3		24	43	56
	5.11	40	3.33	3.2	9.1		23	42	55
③ethyl benzene	6.73	23	2.23	3.0	8.3		21	38	50
	7.02	30	2.28	3.0	8.2		21	38	50
	7.45	40	2.28	2.9	7.9		21	37	49
④toluene	7.79	23	1.93	2.9	7.9	20	36	48	
	8.04	30	1.99	2.8	7.9	20	36	48	
	8.52	40	2.00	2.8	7.7	20	35	47	
⑤methyl ethyl ketone	8.40	23	1.79	2.8	7.8	20	36	47	
	8.77	30	1.82	2.8	7.6	20	35	46	
	9.30	40	1.83	2.7	7.5	19	34	45	
$Re=(U_0 L_0)/\nu$				20	200	700	2400	4000	

(ここで、 q : 放散速度($\text{g}/\text{m}^2\text{h}$)、 α : 物質伝達率($\text{g}/\text{m}^2\text{h}(\text{g}/\text{m}^3)$)、 $\alpha=q/(C_0-C_c)$ 、 Sh : シャールウッド数= $(\alpha L_0)/(D_a \times 3600)$ 、 U_0 =測定胴中平均風速、 L_0 =測定胴高さ半幅=0.03m、 ν : 空気動粘性係数、 $1.5 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}(23^{\circ}\text{C})$ 、 C_0 : 材料表面気相濃度(g/m^3)、 C_c : exhaust opening の濃度、(g/m^3)、 ν : 空気動粘性係数(m^2/s)、 D_a : 空気中の物質拡散係数(m^2/s)

U_{center} が Case2 の $U_{\text{center}}=0.01\text{m/s}$ より大きい Case3~5 場合、 ν_1 は ν より大きく評価されており、inner chamber 中心位置で値が大きくなる凸型の分布となる。Case1 ($U_{\text{center}}=0.01\text{m/s}$) では ν_1 は ν より小さく、殆どゼロであるが、Case2 ($U_{\text{center}}=0.1\text{m/s}$) では約 10 倍程度、Case3 ($U_{\text{center}}=0.35\text{m/s}$) から Case5 ($U_{\text{center}}=2.00\text{m/s}$) ではそれぞれ 80 倍から 1600 倍程度大きい値となる。

図6に境界層型小型 Test Chamber 内の平均風速ベクトル図を示す。outer chamber 吹出口から供給される空気が inner chamber 上部に衝突する性状、ならびにファンにより inner chamber 内から outer chamber へ循環する様子が観察される。

6. 濃度場の CFD 解析結果と物質伝達率の解析結果

表5に境界層型小型 Test Chamber における建材表面からの平均物質放散速度 ($\text{g}/\text{m}^2\text{h}$)、表6に試験建材表面平均物質伝達率の解析結果を示す。物質伝達率は、気中の物質拡散係数 D_a 、測定胴高さ半幅 L_0 で無次元化したシャールウッド数 Sh として示す。また図8に測定胴内中心風速(Re 数: 測定胴中平均風速 U_0 と測定胴高さ半幅 L_0 で定義)に対応する放散速度、物質伝達率、シャールウッド数を示す。各物質のシュミット数が異なるため、拡散場は必ずしも各物質、各温度で完全な相似とはならない^{注3)}。

6.1 実験との対応 対応する実験結果のある Case2 の場合、CFD 解析による decane の液面からの表面平均放散速度 q は $50\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ 、境界層型小型 Test Chamber の排気口での decane 濃度 C_e は液面での飽和気相濃度 $10\text{g}/\text{m}^3$ の約 6% である $0.62\text{g}/\text{m}^3$ であり、実験での放散速度 $46\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ 、排気口濃度 $0.60\text{g}/\text{m}^3$ とそれぞれ良く対応する。数値解析は十分な精度で拡散場、ならびに放散速度を再現する。数値解析による decane(23°C)の拡散場解析結果 (out chamber 内濃度分布) を図7に示す。測定胴内中心濃度は outer chamber 内濃度と等しい $0.6\text{g}/\text{m}^3$ であり、液面表面極近くの高濃度域 ($10\text{g}/\text{m}^3$ 程度) を除きほぼ一様となっている。液面からの蒸散は、液面上の飽和気相濃度 $10\text{g}/\text{m}^3$ と測定胴内濃度 $0.6\text{g}/\text{m}^3$ の濃度勾配で駆動されている。また、境界層型小型 Test Chamber の排気口の濃度 C_e を参照濃度とした場合の decane の建材表面平均物質伝達率は $5.3\text{g}/\text{m}^2\text{h}(\text{g}/\text{m}^3)$ となり、実験結果の $4.9\text{g}/\text{m}^2\text{h}(\text{g}/\text{m}^3)$ と良く対応している。CFD 解析結果は実験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ことが確認された。

6.2 風速変化の影響 建材表面風速の増加 (即ち Re 数の増加) に伴い、物質伝達率は単調に増加する(図8(1-b))。シャールウッド数 Sh は各物質のシュミット数 ($Sc=\nu/D_a$) がほぼ等しいため、大略的には物質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

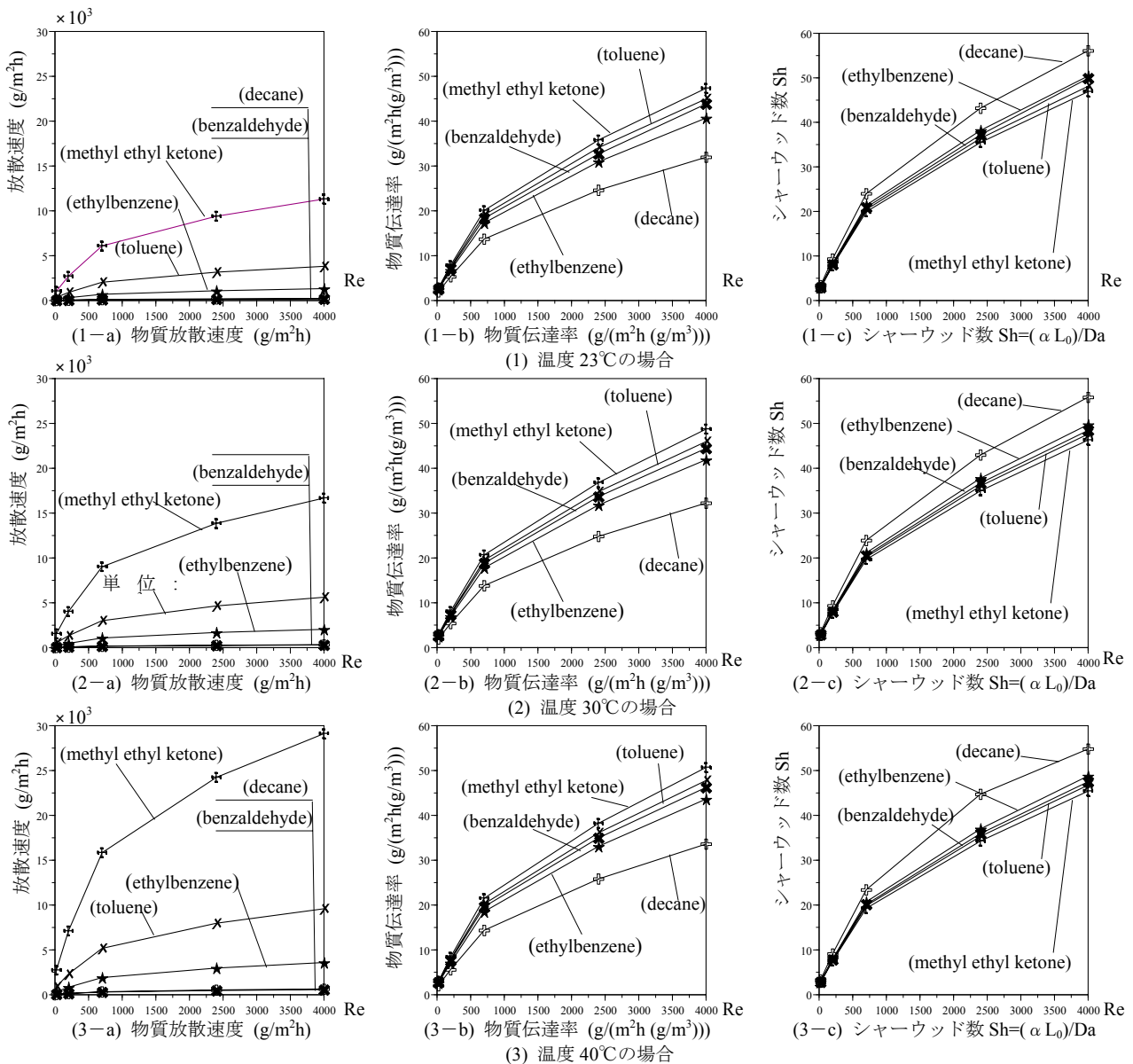


図8 風速変化による inner chamber 内の VOCs 分散速度、物質伝達率とシャーウッド数 Sh の変化

質と多少異なるため、対応してシャーウッド数 Sh も多少他の物質の場合と異なっている。試験建材表面平均シャーウッド数 Sh は、inner chamber 測定洞内平均風速が $U_{center}=0.01$ (m/s)で約3、 $U_{center}=0.1$ (m/s)で8、 $U_{center}=0.35$ (m/s)で20、 $U_{center}=1.2$ (m/s)で40、 $U_{center}=2.0$ (m/s)で50程度の値を示す。試験建材表面平均物質分散速度および物質伝達率は試験建材表面の風速増加(Re 数増加)により明らかに増加する(図8(1))。室内の一般的な対流熱伝達率 α_c は $4\sim 6\text{w/m}^2\text{C}$ 程度と考えられる。ヌッセルト数(Nu)算出の時の長さスケールを今回の解析と一致させて $L_0=3\text{cm}$ とすると、対応するヌッセルト数($Nu=(\alpha_c L_0)/\lambda$ 注5)は約5~7となる。すなわち、実際の室内に対応する物質伝達率で試験建材の分散試験を行う場合は図8(1-c)より U_{center} の速度を約 $0.06\sim 0.08\text{m/s}$ 程度とすることになる。

6.3 温度変化の影響 図8(2)に30°Cの場合、図8(3)に40°Cの場合の分散速度、シャーウッド数 Sh の変化を示す。温度を23°Cから40°Cまで上昇させると、シュミット数 Sc の変化が小さいため、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

増加する (case1 : $19\rightarrow 53$ (g/m²h)、表5)。

6.4 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、物質伝達率は他の4種類よりやや小さい結果となった(図8(1-b))。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2 m/s(Re 数4000)までの範囲内で Re 数依存性を示した(表6、図8(1-c))。境界層型小型 Test Chamber 測定洞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が、室内での分散特性に対応させた分散実験を行うためには、室内での物質伝達率特性(シャーウッド数)に対応させた chamber 内分散実験が必要となる。

7 結論

- (1) CFD による Inner Chamber 測定洞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 により求められた境界層型小型 Test Chamber の建材テスト面

におけるシャーウッド数 (無次元物質伝達率) 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、シャーウッド数も他の物質と多少異なる。

(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、その放散速度は大きくなる。

(6) 室内の表面对流熱伝達率 $4\sim 6\text{w/m}^2\text{C}$ に対応する物質伝達率で建材からの放散実験を行う場合には、境界層型小型 Test Chamber 内の中心風速 U_{center} を $0.06\sim 0.08\text{m/s}$ 程度で検討することになる。

注

[1] 加圧法により配管を含む境界層型小型 Test Chamber 全系統の気密性を測定した結果、相当開口面積は 0.97mm^2 (10Pa 時) であり、十分な気密性が確保されていることを確認している。

[2] 建材表面の第 1 メッシュの壁座標 $Z^*=U^*Z_1/\nu$ 。ここでは、

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (1), \quad \tau_w = \rho \nu \left. \frac{\partial u}{\partial z_n} \right|_{\text{wall}} \quad (2)$$

τ_w : 壁面せん断応力 (N/m²), ρ : 流体密度(kg/m³), Z_n : 壁面鉛直方向座標(m), ν : 分子動粘性係数(m²/s), u : 壁面接線方向速度(m/s)。

[3] 無次元化されたスカラー量 (ϕ) の輸送方程式を以下に示す:

$$\frac{\partial \phi^*}{\partial t^*} + \frac{\partial (u_i^* \phi^*)}{\partial x_j^*} = \frac{1}{\text{Re} \text{Sc}} \left\{ \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 \phi^*}{\partial x_j^{*2}} \right\} \quad (3)$$

ここで、添え字*は量を表し、 ϕ^* : VOC 濃度, $u_i^* = u_i/U_0$, $x_j^* = x_j/L_0$, $t^* = t/(L_0/U_0)$, L_0 : 代表長さ(m), U_0 : 代表速度(m/s), レイノルズ数 $\text{Re} = (U_0 L_0)/\nu$, シュミット数 $\text{Sc} = \nu/D_a$, ν : 空気動粘性係数(m²/s), D_a : 空気中における物質拡散係数(m²/s), $i=(1,2,3)$, $j=(1,2,3)$ 。

(3) 式よりレイノルズ数 Re およびシュミット数 Sc が等しい場合、 ϕ の拡散場は完全な相似となる。本解析は対象とする物質によりシュミット数 Sc が異なるため拡散場は相似とならない。

[4] 物質伝達率は時間(hour)、拡散係数は秒(sec)で定義していることに注意。

[5] ヌッセルト数 $\text{Nu} = (\alpha_c L_0)/\lambda$ 。ここで、 α_c : 対流熱伝達率(w/m²C), L_0 : 代表長さ(m), λ : 熱伝導率(w/mC), $\lambda = a \times \text{Cp} \times \rho$, a : 熱拡散係数(m²/s), $a = \text{Pr}/\nu$, Pr : プラントル数(0.7), ν : 空気動粘性係数($1.5 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$), Cp : 空気の比熱(1008J/kgC), ρ : 流体密度(1.2kg/m^3)。

参考文献

- [1] 田辺新一 (1997) 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, D-2, 767-768
- [2] Steve M. Hays, Indoor Air Quality, Solutions and Strategies, McGraw-Hill, Inc., 1995
- [3] Bluysen, 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.
- [4] ASTM-D5116-90, (1990) Standard Guide for Small-Scale Environmental Chamber Determinations of Organic Emissions from Indoor Materials/Products
- [5] European Concerted Action, (1991) Indoor Air Quality & Its Impact on Man, Report No.8, Guideline for the characterization of Volatile Organic

Compounds Emitted from Indoor Materials and Products Using Small Test Chambers

- [6] Zhang, J.S. et al., (1996) Study of air velocity and turbulence effects on organic compound emissions from building materials/furnishings using new small test chamber, ASTM STP1287, Philadelphia, PA, 189-199
- [7] Haghighat, 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] 伊藤一秀, 村上周三, 加藤信介, 近藤靖史, 朱清宇 (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 7) 建材表面気流精密制御 Small Test Chamber の開発とその基本性能, 日本建築学会年次大会, D-2, 701-702
- [9] 伊藤一秀, 村上周三, 加藤信介, 近藤靖史, 朱清宇 (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) 建材表面気流精密制御 Small Test Chamber の開発と物質伝達率の測定, 空気調和衛生工学会講演論文集, II, 493-496
- [10] 朱清宇, 村上周三, 加藤信介, 近藤靖史, 伊藤一秀, (1999) Small Test Chamber 内の揮発性有機化合物放散速度、物質伝達率の数値解析, 第 13 回数値流体力学シンポジウム, D10-3
- [11] 神卓也, 村上周三, 加藤信介, 伊藤一秀, 近藤靖史, 朱清宇 (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 16) Small Test Chamber を用いた各種ペイントからの化学物質放散量測定, 日本建築学会年次大会, D-2, 879-880
- [12] Nagano, Y., et al. (1994) A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows- 1. Flow field calculations, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 38. No.1., 139-151
- [13] 化学工学協会編 (1968 年), 化学工学便覧.改訂三版

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。