

小型チャンバーADPAC 内の物質放散性状に関する CFD 解析

正会員 ○ 村上 周三*1

同 加藤 信介*2 同 朱 清宇*3

同 田辺 新一*4 同 伊藤 一秀*5

CFD VOCs 放散速度

1 序 前報(その 25)では化学物質放散速度計測用の小型チャンバーFLECに関して報告した。本報では、ADPAC (Advanced Pollution and Air quality Chamber) ^{文2) 文3)} を対象にして CFD によるチャンバー内の流れ場、拡散場の解析結果を報告する。

2 小型チャンバーの構成(図 1) 図 1 に田辺らによって考案された ADPAC の概念図を示す。清浄空気はチャンバー内シャワー管の下向きの三つの穴(番号①~③)よりチャンバー下部に吹出され、パンチ板によって整流され、建材表面に沿ってチャンバー上部の出口から排出される。

3 流れ場解析と解析条件(表 1, 2) 換気回数 0.5 回/h と換気回数 75 回/h の 2 ケースを行う。試料建材面積を換気量で除した単位換気量当りの試料面積は前者で $4.6\text{m}^2/\text{m}^3$ 、後者が $0.03\text{m}^2/\text{m}^3$ であり、前者は FLEC の場合の 0.75 もしくは $1.5\text{m}^2/\text{m}^3$ に比べても多少大きい。CFD 解析条件を表 2 に示す。流れ場解析は、Re 数に対応して層流と Low-Re $k-\epsilon$ モデル(Abe-Nagano model)^{文4)} の 2 種類を用いる。

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) 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。流入空気濃度はゼロ。**4.1 蒸散支配型建材モデル** ここでは純水 (Water) 面と仮定(表 1)。表面気相濃度などの条件は、別報^{文1)} の FLEC での解析条件に一致。**4.2 内部拡散支配型建材モデル** 建材からの VOCs 放散と想定し、建材面で一様放散速度 $1.52 \times 10^{-4}\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ 、TVOC の空気中の物質拡散係数 (D_a) $5.94 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ を与える。

5 流れ場の解析結果(図 2, 3) case1 (換気回数 0.5 回/h, 攪拌なし)のチャンバー内の風速分布を図 2(1)に示す。シャワー管の三つの穴からの吹出風速はそれぞれ①11cm/s、②9cm/s、③9cm/s であり、清浄空気はほぼ均一に下向きに吹出され、可視化結果(図 2(1-3))と一致する。吹出された清浄空気は整流用パンチ板を通過後上向きに建材面に沿って流れ、上部排出口から排出される(図 2(1-2))。建材設置面より 1cm 離れた位置の風速は、case1(攪拌なし)の場合約 $5 \times 10^{-4}\text{cm}/\text{s}$ と case2(攪拌あり)の場合約 $3 \times 10^{-2}\text{cm}/\text{s}$ となる(図 3(2))。case3 (換気回数 75 回/h)の風速分布を図 2(2)に示す。シャワー管の三つの穴からの吹出風速はそれぞれ①8m/s、②19m/s、③24m/s となり、先端部での流量が多い。これも可視化結果(図 2(2-3))と一致する。

6 濃度場の解析結果(図 4, 表 4) **6.1 蒸散支配型建材** 図 4(1)に濃度分布を示す。case1 の場合、チャンバー内濃度を代表する出口濃度($18.4\text{g}/\text{m}^3$)は建材表面濃度($19.9\text{g}/\text{m}^3$)よりやや低いが、殆ど同じとなる(図 4(1-1))。case2 の場合(図省略)、出口濃度は建材表面濃度に近づき $18.7\text{g}/\text{m}^3$ となる。これに対し単位換気量当りの試料面積が 1/150 となる case3 の場合、出口濃度($7.05\text{g}/\text{m}^3$)は建材表面濃度($19.9\text{g}/\text{m}^3$)の約半分であり、単位換気量当りの試料面積の低減に比例せず極めて大きな値となっており、対応して放散速度は case1, 2 の 60 倍の $238\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ となっている^{注1)}。換気量が同じ case1 と case2 で

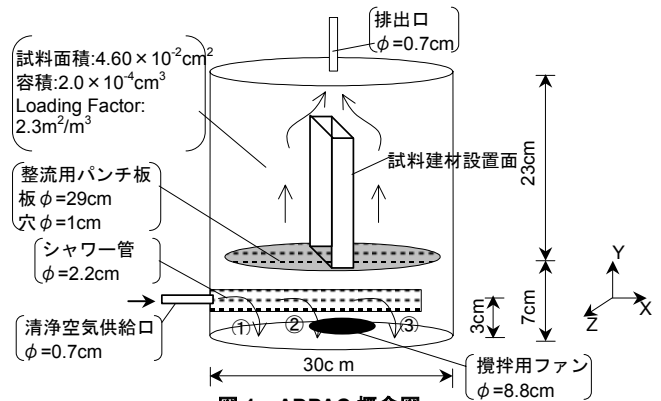


図 1 ADPAC 概念図

表 1 解析ケースと建材モデル(雰囲気温度は 23°C とする)

	換気回数 (回/h)	換気量 (m ³ /h)	建材モデル	乱流モデル
case1 (攪拌なし)	0.5	0.01	蒸散支配型 (Water)	層流
case2 (攪拌あり)			拡散支配型 (Water)	
case3 (攪拌なし)	75	1.50	拡散支配型	Low-Re ^{文3)}

表 2 CFD 解析条件 (3D)

座標系	直交格子と非構造格子	メッシュ数	87,300
移流項	2 次精度風上		
流入境界条件	層流 (case1, 2)	$V_{x,in}=7.2 \times 10^{-2}\text{m}/\text{s}, V_{y,z,in}=0$ case2 の場合、攪拌速度 V_{fan} を与える $V_{y,fan}=4.2 \times 10^{-2}\text{m}/\text{s}, V_{x,z,fan}=0$	
	Low-Re (case3)	$V_{x,in}=10.8\text{m}/\text{s}, V_{y,z,in}=0$ $k_{in}=3/2 \cdot (U_{in} \times 0.05)^2, \epsilon_{in}=C_{\mu} \cdot k_{in}^{3/2} / L_{in}$ $L_{in}=1/7 L_0, L_0=7.0 \times 10^{-4}\text{m}$	
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	$\partial v/\partial x = 0, \partial v/\partial y = 0, \partial v/\partial z = 0$

表 3 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 。

	温度(°C)	C_0 (g/m ³)	D_a (m ² /s)
Water	23	19.9	2.27×10^{-5}
TVOC			5.94×10^{-6}

は、case2(攪拌あり)の場合に、建材表面の風速が多少大きくなるため、建材面平均物質放散速度がやや増加する。case1、2 の放散速度が case3 の 1/60 に止まっているのは単位換気量当りの試料面積が極端に大きく、過大な放散量のため、出口濃度($18.4\text{g}/\text{m}^3$)が建材表面濃度($19.9\text{g}/\text{m}^3$)とほぼ等しく、チャンバー内で建材表面と気中の濃度勾配がなくなったためである。これは例えばフタの閉じられたペイント缶のペイントがなかなか乾燥しない状態に対応している。蒸散支配建材の場合、試料面積を減らすか換気量を増大させないと実物に対して放散速度を過小評価する可能性が大きい。**6.2 内部拡散支配型建材** case1、3 ともチャンバー内に濃度分布が形成される。case3 の場合、case1 比べ建材表面に境界層が形成され、法線方向に大きな濃度勾配が生じ、それより離れた領域で比較的均一濃度となっている(図 4 (2))。

7 物質伝達率(表 4) **7.1 蒸散支配型建材** チャンバー内濃度を代表する出口濃度を参照濃度^{注3)}として算出した純水の試料面平均物質伝達率①は、case1 で $2.61(\text{g}/\text{m}^2\text{h}/\text{g}/\text{m}^3)$ 、case2 で $3.33(\text{g}/\text{m}^2\text{h}/\text{g}/\text{m}^3)$ 、case1 に対しての換気回数が 150 倍の case3 で $18.88(\text{g}/\text{m}^2\text{h}/\text{g}/\text{m}^3)$ 。入口濃度を参照濃度とすると、

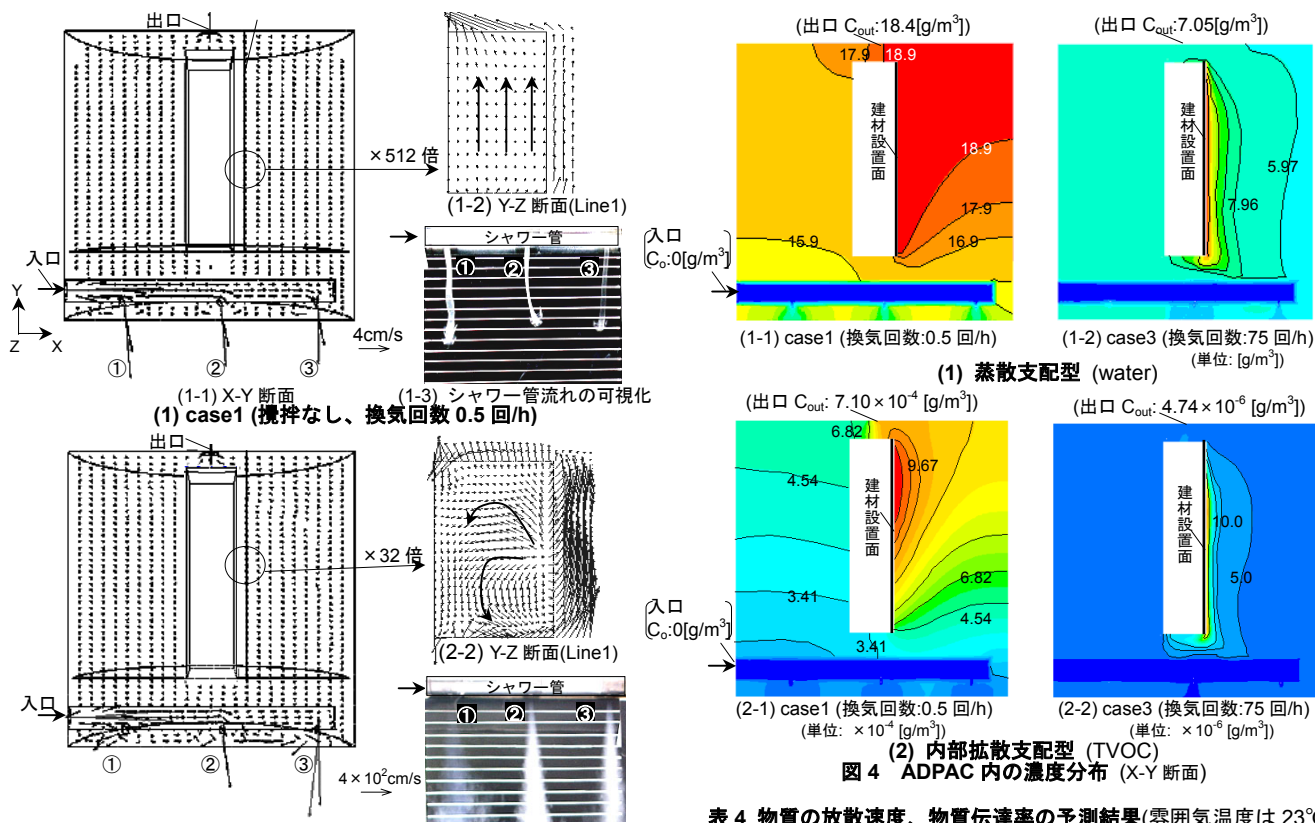


図4 ADPAC内の濃度分布 (X-Y断面)

表4 物質の放散速度、物質伝達率の予測結果(雰囲気温度は23°C)

	蒸散支配型 (Water)				内部拡散支配型 (TVOC)		
	ADPAC (case1)	ADPAC (case2)	ADPAC (case3)	FLEC	ADPAC (case1)	ADPAC (case3)	FLEC
チャンパータイプ							
換気回数[回/h]	0.5		75	686	0.5	75	343
平均放散速度 [g/m ² h]	3.92	3.99	238	27.1	1.52 × 10 ⁻⁴		
建材表面濃 [g/m ³]	19.90				9.28 × 10 ⁻⁴	2.80 × 10 ⁻⁵	1.53 × 10 ⁻⁴
出口濃度[g/m ³]	18.40	18.70	7.30	19.89	7.10 × 10 ⁻⁴	4.74 × 10 ⁻⁶	2.25 × 10 ⁻⁴
物質伝達率 ^(注3) [g/m ² h(g/m ³)]	① 2.61	3.33	18.9	∞	0.69	6.53	1.25
	② 0.19	0.20	12.0	1.35	0.16	5.43	-1.46
換算対流熱 伝達率 ^(注3) [w/m ² °C]	① 0.87	1.12	6.34	∞	0.23	2.19	0.42
	② 0.06	0.07	4.02	0.50	0.05	1.82	-0.49

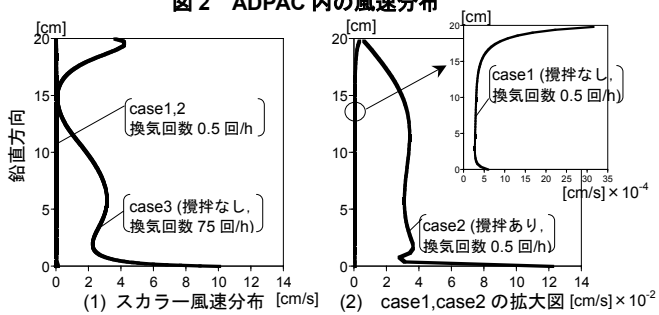


図3 ADPAC内建材設置面より1cm離れた位置の鉛直風速分布 (Line1、Y方向)

case3以外の平均物質伝達率②は極端に小さくなる。**7.2 拡散支配型建材** 出口濃度を参照濃度とする平均物質伝達率①は、case1で0.69 (g/m²h(g/m³))、case3で6.53 (g/m²h(g/m³))となる。

8 考察 室内の一般的な室内の対流熱伝達率 α_c は 2~7w/m²°C程度と考えられる。表4には Lewis の関係^(注2) から求めた各 case の換算対流熱伝達率①、②^(注3) を示す。蒸散支配型建材及び内部拡散支配型建材のいずれも、換気回数 75 回/h の case3 のみ、換算対流熱伝達率は一般的な室内対流熱伝達率と対応する結果となる。実物の居室での放散に対応させたチャンパー放散実験を行う際、内部拡散支配型建材は放散特性がチャンパー内濃度及び物質伝達率にあまり影響されないため、これらにそれほど注意を払う必要はないが、蒸散支配型建材はこれらの条件を実物に対応させる必要がある、そのため建材面積及び換気量を慎重に選択する必要がある。

9 結論 (1) CFD 解析より ADPAC 内の流れ性状を調べた。(2) 換気回数 0.5 回/h の場合、蒸散支配型建材及び内部拡散支配型建材のいずれも、①出口濃度は建材表面濃度よりやや低い程度で、チャンパー内はほぼ一様拡散の状態、②物質伝達率から換

算した対流熱伝達率はかなり小さく、一般的な室内対流熱伝達率に対応しない。(3) 内部拡散型建材に関しては、放散特性がチャンパー内濃度及び物質伝達率特性の影響を受けにくいため、試料面積、換気回数は、その濃度測定が容易となる観点から定められても、問題は少ない。(4) 蒸散支配型建材の場合、一般的な室内環境に対応した結果を得るためには、測定時に換気回数の増加もしくは試料面積の減少が必要となる。

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 慶応義塾大学理工学部教授)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) case1 においては純水の放散速度(放散フラックス)3.92(g/m²h)に対応する気化熱は 21W/m²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。2) Lewis の関係は $\alpha_c / (\alpha' \cdot \rho \cdot C_p) = Le$ で示される。ここで、Le: Lewis Number(g/g)、 α_c : 対流熱伝達率(w/m²°C)、 C_p : 空気比熱(1008J/kg°C)、 ρ : 流体密度(1.2kg/m³)、 α' : 物質(湿気)伝達率(g/m²h(g/m³))。3) 物質伝達率①と対流熱伝達率①は出口濃度を参照濃度として算出、同じく②は入口濃度0を参照濃度として算出。

参考文献 (1)田辺ら(1999),小型チャンパ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。(2)島田,田辺ら(1999),建材からの揮発性有機化合物放散速度測定に関する研究(その1),日本空調調和・衛生工学学会学術講演梗概集。(3)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)。

*1 慶応義塾大学理工学部 教授 工博 *2 東京大学生産技術研究所 教授 工博 *3 東京大学大学院 院生
*4 早稲田大学理工学部建築学科 助教授 工博 *5 東京工芸大学 講師 工博