

揮発性有機化合物の化学反応等のモデリングとその数値予測に関する研究 (その 8)
CFD による Ozone Deposition モデルを組み込んだ居室模型内濃度分布予測

正会員 〇小川 匠*1 同 伊藤一秀*2
同 加藤信介*3

化学反応 Ozone CFD

1. 序

本報では、前報(その 6)で得られた Mass Accommodation Coefficient の値を用い、(その 7)で示した居室模型実験ケースを対象とした CFD 解析を行うことで、室内 Ozone 濃度分布の予測精度に関して検討を行う。特に室内表面の仕上げ材料が変化した場合を対象として室内に形成される Ozone 濃度場の変化、ならびに Ozone 低減量に関して定量的な検討を行う。

2. 数値解析概要

Ozone の濃度を C [ppm] とした場合、室内空気中における Ozone の輸送方程式は(1)式で表現される。また前報(その 6)で示した固体壁面に対する Deposition Flux 式(2)式)を適用する。本研究では RANS モデルによる解析を前提とし、アンサンブル平均された方程式系を示す。

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_j \bar{C}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(D_o + \frac{\nu_t}{\sigma_t} \right) \cdot \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right) \quad (1)$$

$$J = - \frac{\gamma \cdot \frac{\langle v \rangle}{4}}{1 + \gamma \cdot \frac{\langle v \rangle}{4} \cdot \frac{\Delta y_1}{D_o}} \cdot \bar{C} \Big|_{y=\Delta y_1} \quad (2)$$

2.1 流れ場解析概要

居室模型内流れ場は、境界層粘性底層の拡散現象を解明するために低 Re 型 $k-\epsilon$ model (MKC model)により解析する。即ち、境界層粘性底層における化学物質濃度勾配の正確な予測が可能となる。吹出風速は実験と同条件で、 $U_{in}=3.0$ [m/s] ($=U_o$, 換気回数 144 回/h) ならびに 2.0 [m/s] の 2 種類とし、吹出気流の乱れの強さは実験値に基づき 1.5%とする。解析は模型の中央断面(前報図 1 の $x-z$ 面)を対象とし、2次元で行う^{注1)}。メッシュ数は $220(x) \times 110(z)$ 分割とし、壁座標 $y^+=1$ 以内に 1 メッシュ以上確保している。移流項は QUICK、その他は中心差分を用いる。

2.2 Ozone 汚染源のモデル化

吹出空気に含まれる Ozone は、吹出口位置で実験値に相当する一定濃度($C_{in}=1.00$ ppm)を与える。計算・解析条件を表 1 に示す。室内空間中では模型固体壁面での Ozone Deposition 効果のみを組み込む。解析で用いる各種建材に対する Ozone の Mass Accommodation Coefficient は前報(その 6)で得られた γ 値を用いる。

2.3 解析ケース

数値解析ケースを表 2 に、解析対象の概略を図 1 に示す。解析ケースは実験ケース(前報(その 7)表 2 参照)に対応している。天井面・床面・左右両壁面に設置する建材種類を変化させ、さらに吹出風速 $U_{in}=3.0$ [m/s] の場合ならびに吹出風速 $U_{in}=2.0$ [m/s] の場合のケースを設定する。

3. 数値解析結果

本報では割愛するが CFD による流れ場の解析結果は、前報(その 7)で示した実験模型内の流れ場を精度良く再現することが確認さ

表 1 計算および解析条件

Turbulence Model	Low Re Type $k-\epsilon$ model (MKC model, 2-Dimensional Cal.)
Mesh	220 (x) × 110 (z)
Scheme	Convection Term: QUICK
Inflow Boundary	$U_{in}=3.0$ m/s and 2.0 m/s $k_{in}=3/2 \times (U_{in} \times 0.015)^2$, $\epsilon_{in}=C_{\mu} \times k_{in}^{3/2} / l_{in}$, $C_{\mu}=0.09$, $l_{in}=L_o$ (Slot Width: 0.02) × 1/7
Outflow Boundary	U_{out} = free slip k_{out} = free slip, ϵ_{out} = free slip
Wall Treatment	Velocity; No-slip, $\langle v \rangle = 360$ m/s $k _{wall}$; no slip, $\epsilon _{wall} = 2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$ γ は前報(その 6)の測定データを使用

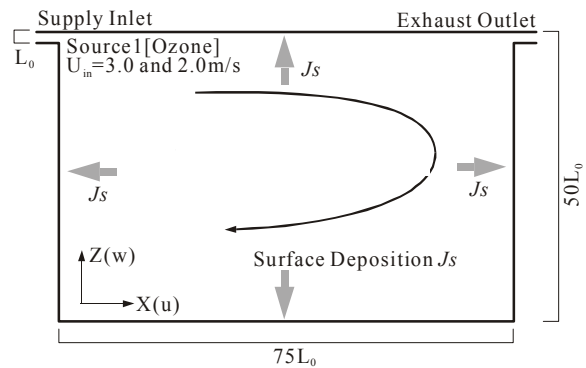


図 1 解析空間

表 2 数値解析ケース

Anal. Case	Building Material	γ	C_{in}	U_{in}
Case (a1-2)	SUS Mirror Polish	5.8e-6	1.00 ppm	2.0 m/s
Case (a2-2)	Water-based Paint	3.7e-6		
Case (a3-2)	Oil-based Paint	4.9e-6		
Case (a4-2)	Wall Paper	3.6e-6		
Case (a5-2)	Plywood	1.4e-5		
Case (a6-2)	SBR Rubber	9.8e-6		
Case (a7-2)	Cedar	8.2e-6		
Case (a1-3)	SUS Mirror Polish	5.8e-6	1.00 ppm	3.0 m/s
Case (a2-3)	Water-based Paint	3.7e-6		
Case (a3-3)	Oil-based Paint	4.9e-6		
Case (a4-3)	Wall Paper	3.6e-6		
Case (a5-3)	Plywood	1.4e-5		
Case (a6-3)	SBR Rubber	9.8e-6		
Case (a7-3)	Cedar	8.2e-6		

れている。

解析は前報(その 7)で示した居室模型 y 方向中心位置(模型中央)の 2 次元断面($x-z$ 平面)を対象として行っている。Ozone 濃度分布に関する数値解析結果を図 2 および図 3 に示す。全ての解析ケースにおいて(2)式で示した Deposition Flux が存在しない場合には、Ozone が室内均一に分布することとなる。各ケースともに、壁面に沿って濃度低下が観察される。当然の事ながら各ケースの濃度低下量は設定した γ 値のオーダーに対応する。

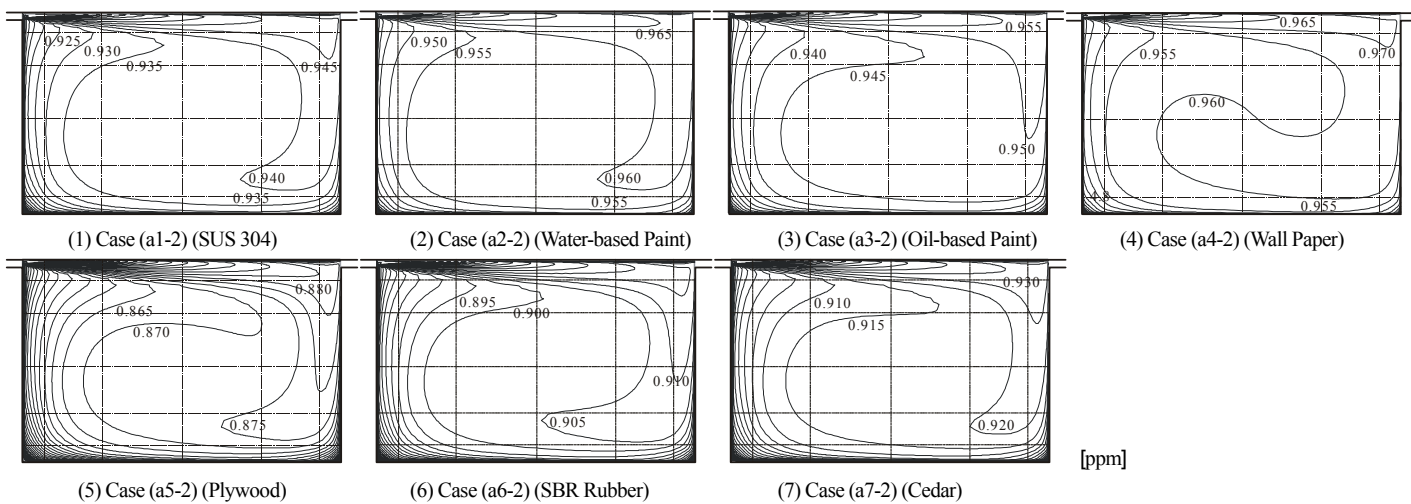


図2 Ozone 濃度分布 ($U_{in}=2.0$ m/s, $C_{in}=1.00$ ppm)

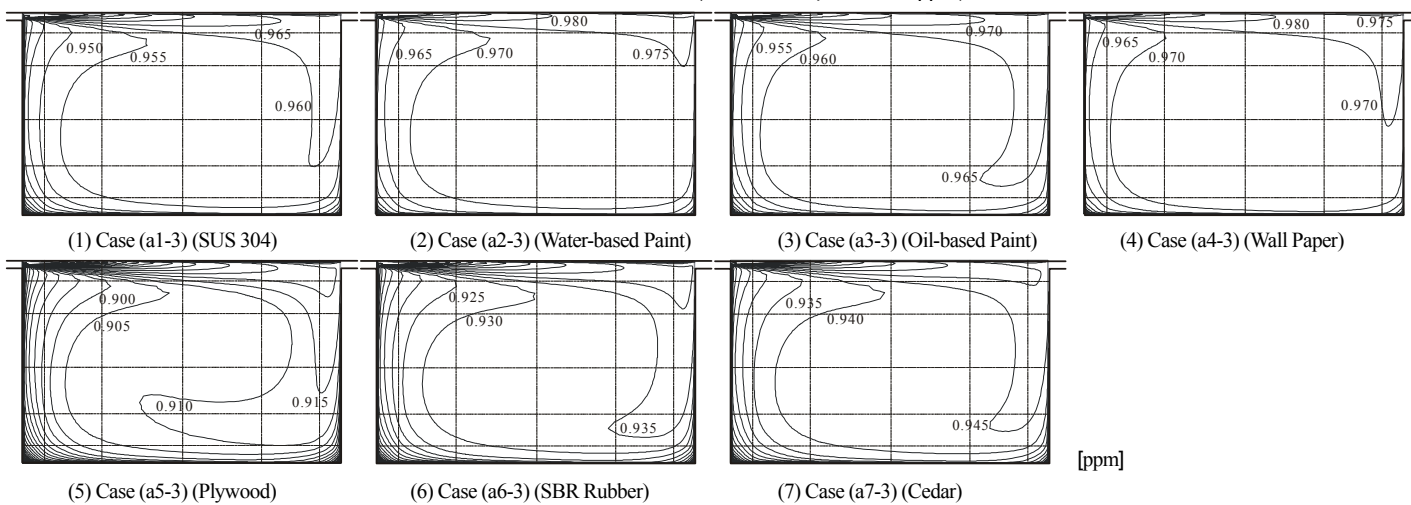


図3 Ozone 濃度分布 ($U_{in}=3.0$ m/s, $C_{in}=1.00$ ppm)

Deposition を組み込んだ場合の室平均 Ozone 濃度の値と換気ならびに Deposition による Ozone の除去割合の値を表 3 に示す。本解析条件の下では、SUS 板を設置した場合に着目すると、吹出風速 1.0 [m/s] の場合、換気による室内からの除去割合が 95 % 程度、Deposition による除去割合が 5 % 程度、吹出風速 3.0 [m/s] の場合、換気による室内からの除去割合が 96 % 程度、Deposition による除去割合が 4 % 程度となり、換気量(すなわち Ozone の滞在時間)に比例して Deposition の効果が大きくなる結果となった。また Paint を設置したケースは前報(その 7)で示した実験結果と十分に対応しない結果となったが、この原因は γ の予測精度に起因する。この点は今後の検討課題である。

5. 結論

- (1) 居室実験模型結果を対象として、本研究で推定した γ 値を用いた固体壁面に対する Ozone Deposition Flux モデルを組み込んだ数値解析を行い、その解析精度の検証を行った。
- (2) 数値解析結果は Paint 類を除き、十分な精度で居室模型実験結果と対応する結果となった。

注

[1] 居室模型中央部では左右の両ガラス面で生じる境界層の影響がほぼ無視可能なことが確認されている。

参考文献

[1] DN Sørensen et al (2002) Modeling gas phase reactions in indoor environments using computational fluid dynamics, Atmospheric Env., 36(1): 9-18
 [2] C.J. Weschler, et al, (2000) The Influence of Ventilation on Reactions Among Indoor Pollutants : Modeling and Experimental Observation, Indoor Air, Vol. 10, No. 2, pp.92-100

表3 室平均濃度 C_{ave} と Ozone の除去割合

Anal. Case	Building Material	排気濃度 C_{ext}	平均濃度 C_{ave}	除去割合 [%]
Case (a1-2)	SUS Mirror Polish	0.943	0.936	Ventilation : 94.3 Reaction : 5.7
Case (a2-2)	Water-based Paint	0.962	0.958	Ventilation : 96.2 Reaction : 3.8
Case (a3-2)	Oil-based Paint	0.950	0.945	Ventilation : 95.0 Reaction : 5.0
Case (a4-2)	Wall Paper	0.963	0.959	Ventilation : 96.3 Reaction : 3.7
Case (a5-2)	Plywood	0.881	0.869	Ventilation : 88.1 Reaction : 11.9
Case (a6-2)	SBR Rubber	0.910	0.901	Ventilation : 91.0 Reaction : 9.0
Case (a7-2)	Cedar	0.923	0.915	Ventilation : 92.3 Reaction : 7.7
Case (a1-3)	SUS Mirror Polish	0.961	0.956	Ventilation : 96.1 Reaction : 3.9
Case (a2-3)	Water-based Paint	0.974	0.971	Ventilation : 97.4 Reaction : 2.6
Case (a3-3)	Oil-based Paint	0.966	0.962	Ventilation : 96.6 Reaction : 3.4
Case (a4-3)	Wall Paper	0.975	0.972	Ventilation : 97.5 Reaction : 2.5
Case (a5-3)	Plywood	0.916	0.907	Ventilation : 91.6 Reaction : 8.4
Case (a6-3)	SBR Rubber	0.937	0.931	Ventilation : 93.7 Reaction : 6.3
Case (a7-3)	Cedar	0.947	0.941	Ventilation : 94.7 Reaction : 5.3

[3] C.J. Weschler (2000). Ozone in Indoor Environments: Concentration and Chemistry. Indoor Air 10 (4), pp. 269-288.

*1 東京工芸大学大学院 Tokyo Polytechnic Univ.

*2 東京工芸大学 助教授 工博 Tokyo Polytechnic Univ.

*3 東京大学生産技術研究所 教授 工博 IIS, University of Tokyo